







*A Carlo, che cercava la scienza  
e l'ha trovata nell'arte*

I lettori che desiderano  
informazioni sui volumi  
pubblicati dalla casa editrice  
possono rivolgersi direttamente a:

Carocci editore  
via Sardegna 50,  
00187 Roma,  
telefono 06 42 81 84 17,  
fax 06 42 74 79 31

Visitateci sul nostro sito Internet:  
<http://www.carocci.it>



# Restauro e tecnologie in architettura

a cura di Donatella Fiorani



Carocci editore

Il PAR. 3.1 è di Francesca Romana Liserre (FL); i PARR. 3.2, 3.3 e 6.1 sono di Carla Bartolomucci (CB); il PAR. 4.1 è di Barbara Malandra (BM); il PAR. 4.2 di Simona Rosa (SR); il PAR. 5.1 di Adalgisa Donatelli (AD); il PAR. 5.2 di Alessia Placidi (AP) e il PAR. 6.2 di Lorenzo Cantalini (LC). Degli stessi autori e di Mauro De Meo (MDM) sono le voci di glossario.

1<sup>a</sup> edizione, gennaio 2009  
© copyright 2009 by Carocci editore S.p.A., Roma

Finito di stampare nel gennaio 2009  
per i tipi delle Arti Grafiche Editoriali Srl, Urbino

ISBN 978-88-430-4813-7

Riproduzione vietata ai sensi di legge  
(art. 171 della legge 22 aprile 1941, n. 633)

Senza regolare autorizzazione,  
è vietato riprodurre questo volume  
anche parzialmente e con qualsiasi mezzo,  
compresa la fotocopia, anche per uso interno  
o didattico.

# Indice

<b>Premessa</b>	<b>11</b>
di <i>Donatella Fiorani</i>	
<b>1. Orientamenti teorici e di metodo nel restauro</b>	<b>15</b>
di <i>Giovanni Carbonara</i>	
1.1. Introduzione	15
1.2. Il concetto di “bene culturale”	16
1.2.1. Monumenti e restauro / 1.2.2. Beni storico-artistici, beni naturali e ambientali	
1.3. Natura e compiti della conservazione	19
1.3.1. Restauro e conservazione / 1.3.2. Recuperare, riusare, consolidare	
1.4. Gli orientamenti teorici	22
1.4.1. L'eredità del Novecento / 1.4.2. Il “restauro critico” e i suoi sviluppi / 1.4.3. La pura conservazione e la manutenzione-ripristino / 1.4.4. Altre recenti proposte / 1.4.5. La proposta critico-conservativa	
1.5. L'unità di metodo	31
1.5.1. Dall'archeologia all'arte contemporanea / 1.5.2. Il restauro dell'architettura contemporanea / 1.5.3. Le altre arti: musica, cinema, letteratura	
1.6. Filologia e restauro	36
1.7. Materiali e tecniche, antiche e moderne, a confronto	37
1.8. Conclusioni	38
<b>2. Conoscenza e restauro dell'architettura: ruolo e casistica delle tecnologie</b>	<b>43</b>
di <i>Donatella Fiorani</i>	
2.1. Il restauro fra acquisizione di conoscenze, elaborazione “oggettiva” e proposta creativa	43
2.1.1. Architettura, restauro e scienza / 2.1.2. Scienza, tecnica, tecnologia / 2.1.3. Fini e mezzi nella scienza della conservazione / 2.1.4. Orientamenti del restauro e scelte tecnologiche / 2.1.5. Interdisciplinarietà e multidisciplinarietà	

2.2.	Principi teorici e operatività tecnica	57
	2.2.1. Autenticità, minimo intervento, compatibilità, reversibilità / 2.2.2. La questione etica	
2.3.	Tecnologie conoscitive e d'intervento	61
	2.3.1. Studio e diagnosi sull'esistente / 2.3.2. Il progetto e il cantiere di restauro in architettura / 2.3.3. L'indagine senza il restauro: monitoraggio e prevenzione	
2.4.	Conclusioni	67
<b>3.</b>	<b>Tecnologie per la conoscenza della fabbrica</b>	<b>69</b>
	di <i>Francesca Romana Liserre e Carla Bartolomucci</i>	
3.1.	Indagini sull'edificio	69
	3.1.1. Tecnologie digitali per la fotografia, il rilievo e la restituzione virtuale / 3.1.2. Comprensione dei problemi storici e datazione dell'architettura / 3.1.3. Fra comprensione e diagnostica	
3.2.	Documentazione informatica	98
	3.2.1. Il problema della documentazione nel restauro / 3.2.2. La documentazione dello stato di conservazione / 3.2.3. Le prime esperienze di "documentazione informatizzata" / 3.2.4. I sistemi informativi geografici per la documentazione in ambito conservativo / 3.2.5. La documentazione a livello territoriale: la Carta del Rischio del patrimonio culturale e il Sistema informativo generale del catalogo / 3.2.6. La documentazione a livello del singolo oggetto: esperienze recenti	
3.3.	Materiali e indagini	110
	3.3.1. Materiali dell'edilizia storica / 3.3.2. Materiali lapidei naturali / 3.3.3. Il legno / 3.3.4. Materiali lapidei artificiali / 3.3.5. Malte e calcestruzzi / 3.3.6. Coloriture / 3.3.7. Materiali metallici / 3.3.8. Vetri	
<b>4.</b>	<b>Tecnologie per i problemi di umidità</b>	<b>131</b>
	di <i>Barbara Malandra e Simona Rosa</i>	
4.1.	Umidità e diagnostica	131
	4.1.1. Introduzione / 4.1.2. L'acqua e l'interazione con la costruzione / 4.1.3. Riconoscimento preliminare e indagine visiva: impostazione della diagnostica / 4.1.4. Diagnosi strumentale / 4.1.5. Monitoraggio ambientale. Indagini microclimatiche e termografiche / 4.1.6. Alcune esemplificazioni	
4.2.	Interventi contro l'umidità nelle fabbriche storiche	163
	4.2.1. Introduzione / 4.2.2. Tecniche di intervento / 4.2.3. Una panoramica esemplificativa	
<b>5.</b>	<b>Tecnologie per i problemi strutturali</b>	<b>193</b>
	di <i>Adalgisa Donatelli e Alessia Placidi</i>	
5.1.	Diagnostica strutturale	193
	5.1.1. Introduzione / 5.1.2. Lettura complessiva dell'organismo edilizio / 5.1.3. Indagini di approfondimento per la diagnostica strutturale / 5.1.4. Monitoraggio statico e dinamico	

5.2.	Interventi di restauro statico nella fabbrica storica	236
	5.2.1. Introduzione / 5.2.2. Cenni sul comportamento statico delle fabbriche antiche / 5.2.3. Cedimenti fondali e metodologie d'intervento / 5.2.4. I terremoti e la riduzione della vulnerabilità alle sollecitazioni dinamiche / 5.2.5. Criteri e tecniche d'intervento nelle strutture in elevazione / 5.2.6. Il recupero della capacità portante delle strutture lignee / 5.2.7. Il restauro statico di archi e volte	
<b>6.</b>	<b>Tecnologie per la conservazione delle superfici materiche</b> di <i>Carla Bartolomucci e Lorenzo Cantalini</i>	285
6.1.	Superfici dell'architettura e diagnostica	285
	6.1.1. Il concetto di "degrado" / 6.1.2. Cause e meccanismi di degrado / 6.1.3. Il degrado sui diversi materiali / 6.1.4. Gli effetti del degrado: lessico delle forme di alterazione / 6.1.5. Le indagini strumentali	
6.2.	Interventi sulle superfici	304
	6.2.1. La progettazione dell'intervento sulle superfici / 6.2.2. Preconsolidamento / 6.2.3. Pulitura / 6.2.4. Consolidamento / 6.2.5. Protezione	
<b>7.</b>	<b>Tecnologie per l'uso della fabbrica</b> di <i>Mauro De Meo</i>	335
7.1.	Introduzione	335
7.2.	Impianti tecnici e problemi di rapporto con l'edilizia storica	336
7.3.	Prevenzione e protezione antincendio	337
7.4.	Impianti per il superamento delle barriere architettoniche	342
7.5.	Altre misure di adeguamento per la sicurezza	353
7.6.	Conclusioni	354
	<b>Glossario</b>	355
	<b>Riferimenti bibliografici</b>	373



# Premessa

di *Donatella Fiorani*

Il notevole sviluppo dell'apparato tecnologico a cui si è assistito negli ultimi anni ha sempre più assorbito l'attenzione e l'impegno degli operatori e ha finito col porre in subordine i nessi che legano l'investigazione all'interpretazione, i fini ai mezzi, la tecnica al restauro. Questo, naturalmente, non ha inficiato il lavoro di coloro che, soprattutto nel settore pubblico, possono contare su una struttura organizzata e complessa, come gli Istituti del MIBAC, alcune Soprintendenze e qualche centro di ricerca, ma non ha molto aiutato a orientare correttamente le professionalità singole e la formazione.

Chi si trova ad affrontare, come studente o professionista, il problemi della tecnologia del restauro in architettura si confronta con una realtà oggi complessa e disorganica, contrassegnata da una straordinaria ricchezza di possibilità, ma non veicolata da un apparato informativo altrettanto accessibile né, soprattutto, da strumenti (amministrativi e gestionali) in grado di facilitare il coordinamento di questa complessità.

Ciò non significa, naturalmente, che non esista una vasta e solida letteratura: molta parte di essa è riportata nei *Riferimenti bibliografici* posti al termine del presente volume e appare più volte citata nel testo, per consentire i necessari rimandi e approfondimenti; la maggior quantità degli studi, però, si rivolge sempre più in maniera specialistica agli "addetti" di un determinato settore (caratterizzazione dei materiali, diagnostica chimico-fisica e strutturale, consolidamento ecc.), sviluppando problematiche tecniche particolari, suggerendo nuovi avanzamenti, illustrando i risultati conseguiti.

Molto meno numerosi sono i testi che mettono in evidenza lo stretto vincolo che deve essere assicurato fra premesse teoretiche, conoscenza dell'architettura, proposta progettuale e tecnica applicativa e che cercano di trattare in maniera coordinata, pur se necessariamente sintetica, tutti gli aspetti operativi che possono essere investiti dall'azione conservativa. Dal pionieristico saggio di Piero Sanpaolesi (1973), che costituisce uno dei primi generosi e utili tentativi d'illustrare la pratica operativa nel restauro (ispirata a un pragmatismo fortemente segnato da una profonda conoscenza dell'architettura storica), al libro curato da Amedeo Bellini (1986), che consolida il proprio approccio teoretico anche attraverso la programmatica trattazione delle tecniche per la conservazione materiale dell'esistente, le prime pubblicazioni di questo tipo rie-

scono ancora a condensare efficacemente all'interno di agili volumi lo spettro di interessi, problemi e soluzioni che possono guidare l'orientamento del restauratore in architettura.

Già dagli scorsi anni novanta l'obiettivo di una sintesi onnicomprensiva diventa di non facile realizzazione e occorrono i numerosi tomi del *Trattato di Restauro* curato da Giovanni Carbonara (UTET, 1996-) per restituire un panorama sufficientemente articolato e completo delle questioni teoretiche, operative e tecniche inerenti al restauro, così come il medesimo intento viene perseguito, soprattutto da Benito Paolo Torsello e Stefano Musso, nell'arco di più proposte editoriali, di volta in volta dedicate all'illustrazione dei nessi fra teoria e tecnica (Torsello, 1988) e alle problematiche applicative ricorrenti (Torsello, Musso, 2003; Musso, 2004). In ogni caso, viene sempre rifiutata la scorciatoia del "manuale", ovvero del prontuario immediatamente utilizzabile, dal quale attingere la soluzione diretta del problema senza effettuare quello scarto critico che nobilita e restituisce alla sua reale e indispensabile dimensione culturale il lavoro del restauratore.

Nello scenario appena delineato, il presente testo vuole aggiungere un piccolo ma forse utile tassello, ovvero un lavoro di ricucitura dell'esistente particolarmente attento alla questione delle tecniche, ai loro ultimi aggiornamenti, alle possibilità a esse connesse e, non ultimo, alle problematiche di contenuto che queste hanno finito con il sollevare in epoca recente.

La forte specializzazione degli ultimi anni ha, da una parte, incrementato le competenze del settore e, dall'altra, ridotto il dialogo fra di esse, mancando spesso il faticoso e umile lavoro di attenzione reciproca, di "traduzione" dei linguaggi, d'interconnessione. Come s'è detto, la quotidianità del restauro non è fatta di grandi gruppi di lavoro, quanto piuttosto d'isolati professionisti che devono scegliere come orientare le proprie indagini e il proprio progetto e, per farlo, non hanno il tempo, l'interesse, la capacità di gestire l'immensa biblioteca di testi che in trenta anni sono stati prodotti.

Questo libro vuole direzionare tale necessità di comprensione, orientare ulteriori e necessari approfondimenti, fornire una panoramica "ordinata" della complessità. Perché la comprensione della complessità del restauro non rappresenta il punto d'inizio, ma il livello intermedio di una crescita culturale che deve giungere a formulare interpretazioni e proposte: all'origine di questo percorso, infatti, c'è solo l'ingenua e pericolosa pretesa di ridurre il restauro a una serie di ricette da scegliere di volta in volta.

L'obiettivo descritto spiega pertanto l'indice del volume, che muove da un'indispensabile panoramica dei temi di fondo presenti nel dibattito attuale sul restauro (G. Carbonara), si sofferma sulle problematiche strettamente relative al rapporto fra restauro, scienza, tecnica e tecnologie (D. Fiorani), per poi illustrare in forma sintetica tutti i settori nei quali il recente sviluppo tecnologico ha offerto un apporto rilevante: dalla conoscenza fisica e storica della fabbrica alla caratterizzazione dei materiali (F. Liserre e C. Bartolomucci), riservando uno spazio particolare alla gestione della documentazione (C. Bartolo-



mucci), fino ai principali ambiti della diagnostica e dell'intervento sulla materia: l'umidità (B. Malandra, S. Rosa), i dissesti strutturali (A. Donatelli, A. Placidi) e il degrado superficiale (C. Bartolomucci, L. Cantalini); tecniche e tecnologie interferiscono, poi, alla scala "architettonica" per le questioni di adeguamento impiantistico e per la sicurezza, a esse è pertanto rivolto un breve quadro di riferimento (M. De Meo). Concludono il volume la bibliografia e un glossario, che illustra sinteticamente le principali tecniche strumentali oggi disponibili nella diagnostica e nel restauro.

Esclusa l'impostazione del ricettario o del manuale, la modalità scelta per descrivere l'universo delle tecniche, in relazione alle premesse storico-critiche che lo indirizzano, è stata quella di presentare i dati tecnico-scientifici anche attraverso l'illustrazione di numerosi esempi. Si vuole così dimostrare come le diverse soluzioni si adattino di volta in volta al contesto, spesso si affianchino fra di loro, in certe circostanze, addirittura, si sostituiscano, perché il riscontro finale dello stato di fatto può apparire diverso da quanto previsto anche dopo aver assicurato la migliore diagnostica o perché si sono aggiunte informazioni di altra natura che spingono a modificare gli assunti originali dell'intervento.

Nel richiamare la necessità del dubbio che deve costantemente guidare la gestione della tecnica nel restauro, non si vuole dimostrare l'intrinseca fragilità – e quindi l'inessenzialità – dell'approccio tecnico-scientifico o ridimensionarne il ruolo: piuttosto si cerca di sottolineare i rischi che possono nascere dall'abbandono di un atteggiamento critico nei confronti degli strumenti e dei risultati investigativi od operativi conseguiti.

Così come i migliori restauri sono compiuti dagli architetti in grado di "fare un passo indietro", nel rispetto delle esigenze del monumento, la diagnostica e gli interventi tecnici più validi, nonché le riflessioni più interessanti in questo campo, nascono sempre da un atteggiamento di fattiva e collaborativa umiltà: di questo beneficiano, insieme con la fabbrica storica, tutti i componenti di un'*équipe* che dovrebbe fondare la propria forza sull'efficacia del lavoro di squadra molto più che sulle capacità del singolo.

La stesura del presente testo si è avvalsa del prezioso contributo di molte persone: restauratori, architetti, ingegneri, liberi professionisti, docenti universitari, funzionari della tutela, studiosi. Dati il numero e la varietà delle competenze e degli apporti, si preferisce ricordare semplicemente in ordine alfabetico, senza il riferimento a titoli e mansioni, le persone da ringraziare, la maggior parte delle quali è peraltro nota e non necessita di presentazioni. Un sentito ringraziamento, pertanto, va a Franco Adamo, Alessandro Bozzetti, Roberto Bugini, Carlo Cacace, Giovanna Cantalini, Maurizio Caperna, Gisella Capponi, Carolina Caetani, Giuseppe Carluccio, Adele Cecchini, Giorgio Croci, Stefano D'Amico, Stefano De Vito, Fabio Fratini, Alessandro Furlan, Nazzareno Gabrielli, Pietro Galifi, Eugenio Mancinelli, Ippolito Massari, Michela Monte, Stefano Moretti, Anna Maria Pandolfi, Renato Pennino, Leucio Rossi, Alessandro Rufo, Cristiano Russo, Giorgio Torraca, Giuseppe Tosti, Antonio Zaccardo, Pietro Zander.



# Orientamenti teorici e di metodo nel restauro

di *Giovanni Carbonara*

## I. I

### Introduzione

Il restauro è una disciplina relativamente giovane, che affonda le sue radici tanto nella moderna ricerca storica e nella critica quanto nelle tradizionali pratiche di manutenzione tese a preservare un oggetto, cui si riconosceva un valore (artistico, di memoria, economico), dal degrado.

Le origini storiche della conservazione (atteggiamento, secondo alcuni, costitutivamente diverso dal restauro) intesa quale esigenza di mantenere e trasmettere al futuro gli antichi manufatti, così come ci sono pervenuti, nella loro integrità e originalità materiale, risalgono già ad alcune forme di collezionismo del passato, ma assumono maggiore chiarezza e coscienza teorica nell'età della Controriforma, non a caso in relazione al rinnovato culto delle reliquie. Si datano a quei tempi, fra Cinque e Seicento, con riferimento a personaggi di formazione letteraria e non artistica, i primi casi di attenta, reale conservazione di beni o frammenti architettonici (arredi sacri d'età medievale ecc.) non per ragioni d'uso o economiche, ma per riguardo alla loro "veneranda antichità". Non recupero a fini pratici, quindi, né volontà di rinnovo o d'adeguamento ai canoni estetici del tempo, ma autentico rispetto e vera tutela.

Alle soglie del XIX secolo le anticipazioni conservative di cui s'è detto assumono maggiore rigore e chiarezza. La conservazione e il restauro, modernamente intesi, tendono a confluire in un tipo d'attività che assume su di sé la volontà e la responsabilità della perpetuazione delle testimonianze storico-artistiche, i cosiddetti "monumenti", del passato. Siamo all'incirca in età napoleonica e il processo definitivo di maturazione è abbastanza rapido.

Va subito precisato che il panorama di riferimento, da allora in poi, sarà quasi esclusivamente europeo e occidentale, mentre al suo interno un ruolo preponderante sarà svolto dall'Italia; in paesi di cultura radicalmente diversa, come quelli dell'Asia o dell'Africa, infatti, le idee sulla conservazione hanno stentato, sino a oggi, ad affermarsi per una differente concezione del tempo e della storia.

È utile ribadire lo stretto legame che unisce, nel restauro, la tecnica al fondamento storico-critico di cui s'è detto, per cui la prima non potrà mai co-

stituire una variabile indipendente, ma dovrà sempre confrontarsi con i “valori” di cui il monumento è portatore e ricondursi entro i binari delineati dall’indagine storica. Il che significa che nel ventaglio delle soluzioni tecniche possibili andrà sempre effettuata una selezione, ulteriore e definitiva, in termini di valutazione critica. Certe opzioni tecniche di per sé efficacissime e, forse, meno dispendiose potranno essere escluse, mentre altre, forse più complesse, saranno preferite, perché le prime potrebbero rivelarsi incompatibili, a breve o a lungo termine, con l’oggetto dell’intervento. L’incompatibilità potrebbe sussistere tanto sul piano tecnico quanto su quello storico; si pensi, ad esempio, alle questioni che pone, in opere di rafforzamento fondale, la presenza d’uno strato archeologico immediatamente sottostante l’edificio su cui si lavora.

Proprio questa complessità tecnica e applicativa lascia intravedere come il restauro sia un’operazione aperta ai più vari contributi specialistici, che richiede una continua elaborazione multidisciplinare e una preparazione specifica, sostenuta da vivi rapporti con le scienze chimico-fisiche. Aprire un campo di ricerca applicata inteso esplicitamente alla conservazione; verificare tecniche d’intervento e di calcolo non derivate di peso dalla tecnologia del nuovo, ma studiate appositamente per le antiche strutture; possedere tecniche e materiali moderni prodotti e studiati proprio per il restauro, tutto ciò costituisce una sfida che il nostro tempo ci pone e che bisognerà affrontare con decisione, percorrendo fino in fondo una strada, per altro, già in alcuni settori intrapresa.

Va pure ribadita l’importanza d’una manualità storicamente consapevole e sapiente, non meramente esecutiva, ma capace d’aggiustamenti o varianti in corso d’opera, circostanze frequenti nel cantiere di restauro, e di porsi in attiva relazione con tecnologie sempre più sofisticate.

## 1.2

### Il concetto di “bene culturale”

I termini oggi correntemente impiegati sono già, in parte, diversi da quelli usati anche solo una quarantina d’anni fa. Rispetto a espressioni come “monumento”, “cose d’interesse storico-artistico” e via dicendo, la dizione oggi più diffusa, anche in campo internazionale, è invece quella di “bene culturale”, “patrimonio storico-artistico” o “eredità storica”.

Eppure dicendo “bene culturale” si sostituisce pericolosamente all’originale connotazione di cultura una di sapore economico, propria dei sostantivi “bene”, “eredità” o “patrimonio”; quest’ultimo, per sua natura, è costretto a rendere, altrimenti lo si liquidava. Cosa palesemente assurda, se riferita alle antiche testimonianze di civiltà, di storia e d’arte (Argan, 1976).

Infatti non è la rendita economica né tanto meno quella finanziaria che giustifica alla radice la conservazione, ma una resa in termini di civiltà e di educazione, più lontana e mediata, ma non per questo meno valida. Ciò non

significa che si voglia negare il sussistere di un'implicazione economica dei beni culturali, ma che si stimano questi ultimi, anche se non in condizioni di rendere, meritevoli comunque d'essere conservati e tramandati, per sole ragioni d'ordine spirituale, prima fra tutte la tutela della memoria e dell'identità d'un popolo.

Sarebbe più corretto definire i beni culturali come "oggetti d'arte e storia", secondo la vecchia locuzione ottocentesca, avendo semplicemente cura di assumere un più moderno concetto di "storia".

Ciò vale anche per le cosiddette testimonianze "povere" o "minori" ma importantissime, proprio perché oggi si condivide una concezione della storia più estesa che solo cinquant'anni fa, legata a una prospettiva antropologica e d'attenzione alla "lunga durata" dei suoi fenomeni.

### 1.2.1. Monumenti e restauro

Il concetto di "restauro" è strettamente legato a quello di "monumento", inteso come una realtà che, mantenendo o no il suo uso primitivo, è divenuta simbolo di qualcos'altro, assumendo una connotazione culturale e morale, di ammonimento, documento e ricordo, proprio le parole che nella lingua latina costituiscono l'etimo di *monumentum*.

Se nel parlare corrente "monumento" significa ancora l'oggetto grandioso o la straordinaria espressione architettonica – per intenderci, il Partenone, il Colosseo o il Duomo di Milano – a rigor di termini tale accezione non è completamente giusta. "Monumento" significa memoria, documento (di qualcosa di storico o bello) e, secondo una moderna definizione, anche la semplice «testimonianza materiale avente valore di civiltà» (Titolo I, Dichiarazione I, in *Per la salvezza dei beni culturali in Italia*, 1967, vol. I). Comunque, su questo termine e sulla distinzione fra "monumento intenzionale" e "monumento non intenzionale" o "involontario", ma divenuto tale per antichità e qualità d'arte, un punto fermo è stato posto, agli inizi del Novecento, dalla riflessione (1903) di Alois Riegl (1858-1905).

Si può, nella sostanza, affermare che il Medioevo e lo stesso Rinascimento non conobbero il restauro nel senso moderno, perché a quelle epoche mancò la coscienza del valore artistico e storico del monumento quale noi possediamo ora. Tuttavia, fra chi giudica il restauro come un atteggiamento prettamente moderno e chi lo vede, al contrario, quasi come una costante del fare umano il confronto è aperto, anche perché mutevole e per certi aspetti sfuggente è il concetto stesso di "restauro" (come atto storico-critico e di cultura, come atto pratico di riutilizzazione, come semplice manutenzione, come nostalgia dell'antico e culto della rovina, come recupero e studio di modelli di bellezza ecc.), mutando il quale variano anche i termini della sua delimitazione cronologica.

Sembra, in ogni modo, che sia possibile riconoscere, a partire da una serie di confusi e difformi atteggiamenti verso le preesistenze, un lento processo d'avvicinamento all'attuale concetto storico-critico di "restauro", anche se la parola è antica e risale alla lingua latina, ove ricopriva un campo semantico diverso e per certi aspetti più esteso, valendo inoltre come sinonimo di "ricostruzione".

#### 1.2.2. Beni storico-artistici, beni naturali e ambientali

Ai beni "materiali" storico-artistici vanno accostati altri di natura "immateriali" cui alle volte ci si riferisce, per esempio in campo archeologico (Vlad Borrelli, 2003) o in merito a questioni di tutela dell'ambiente ("restauro ambientale"). Anche qui, secondo alcuni, esclusi i beni naturali che competono piuttosto alle scienze naturali, si definirebbe come "ambiente" tutto il non-costruito antropizzato, anch'esso da sottoporre a conservazione con metodologia non dissimile da quella del consueto restauro (ricerca storica, studio delle modalità di degrado, definizione dei tipi d'intervento, delimitazione dei possibili interventi d'innovazione, gestione, manutenzione), ma con un più ricco e complesso apporto di competenze specialistiche.

Eppure in tal senso, insistendosi sull'aspetto umano delle trasformazioni indotte, più che d'ambiente dovrebbe parlarsi di territorio e di "restauro territoriale", con maggiori analogie al "restauro urbano". Ma questo genere di definizioni è pur sempre ambiguo perché, a mano a mano che ci si allontana dalla scala del singolo manufatto (artigianale, artistico, architettonico) verso realtà più complesse ed estese, il restauro sembra perdere le sue specifiche connotazioni, anche tecniche, e risolversi in qualcosa di diverso, venendo a rappresentare le ragioni della conservazione in un cammino progettuale volto ad altri interessi (riequilibrio territoriale, reti e infrastrutture di servizio e trasporto, economia del territorio, sfruttamento del sottosuolo ecc.). Per questo, mutando la scala di riferimento, il restauro, più correttamente, da sostantivo tenderà a porsi come aggettivo d'elaborazioni di natura strutturalmente diversa; sarà corretto, quindi, non tanto parlare di restauro del territorio o dell'ambiente quanto di "aspetti conservativi della pianificazione territoriale" e via dicendo.

Un deciso richiamo all'unità di metodo che, fondata sul comune riferimento storico, dovrebbe coinvolgere gli aspetti territoriali del restauro, il restauro urbano e quello architettonico distingue alcuni autori che arrivano a proporre, con buone ragioni, l'espressione "restauro della città" (Spagnesi, 1989) o "delle città e del territorio" (Spagnesi, 2007). Con esso intendono definire un procedimento oscillante fra momenti propriamente urbanistici e pianificatori ed altri propriamente edilizi, in un'alternarsi di fasi, collegate ma distinte, di volta in volta culturali e politiche: fasi culturali come l'avvicinamento storico-critico

al problema, politiche come le scelte di piano, nuovamente culturali al momento del restauro dei singoli edifici, politico-amministrative nella susseguente gestione di quanto s'è fatto. Il tutto in una prospettiva che vede il restauro non come puro mantenimento dell'esistente, per altro impossibile a ottenersi, né come velleitario ripristino d'un vagheggiato passato, ma come controllata trasformazione attuata assumendo le inevitabili responsabilità di progetto.

Sul medesimo versante urbanistico del problema, infine, è da rilevare la crescente attenzione odierna alle grandi periferie urbane, nelle quali si riscontrano valenze estetiche e culturali fino a qualche tempo fa improponibili: espressioni d'una "cultura di massa", marginale (come certe formulazioni pop-art) e insieme vitale; immagini d'una città de-costruita e caoticamente creativa sino a oggi espunte da ogni riferimento alla tutela ma che pur fanno indiscutibilmente parte del nostro tempo e della civiltà attuale.

### 1.3

#### Natura e compiti della conservazione

La *Carta di Venezia* (1964), all'art. 9, spiega che scopo del restauro è di conservare e rivelare i valori formali e storici del monumento e che tale azione si fonda sul rispetto della sostanza antica e delle documentazioni autentiche. Successivamente la *Carta del restauro del ministero della Pubblica Istruzione* (1972) ha precisato, all'art. 4, che «s'intende per restauro qualsiasi intervento volto a mantenere in efficienza, a facilitare la lettura e a trasmettere integralmente al futuro le opere e gli oggetti» d'interesse artistico, storico, paesistico e ambientale.

Nel "conservare-rivelare" o nel "mantenere in efficienza-facilitare la lettura" si riconosce quindi l'elemento caratterizzante l'atto di restauro, che non può essere sola conservazione, da un lato, ma neanche "rivelazione" spinta fino al ripristino e alla cancellazione delle tracce storiche, dall'altro.

Sin dalle origini vediamo fronteggiarsi due opposte e valide tendenze: la prima attribuisce, pur nel rispetto della materia antica, alla disciplina un compito di sostanziale difesa del dato figurale e artistico, quando presente; l'altra vi riconosce contenuti differenti, d'ordine documentario, sociale e antropologico.

I due modi corrispondono a diversi e compresenti aspetti della nostra civiltà. Sono l'esito di due sistemi paralleli e storicamente legittimi: "restauro critico" da un lato, "pura conservazione" dall'altro. Sembra tuttavia oggi lecito declinare il restauro critico, approfittando di alcuni suggerimenti impliciti proprio nel pensiero di Cesare Brandi (1906-1988) e di Renato Bonelli (1911-2004), relativi al concetto di "rudere" e di "letteratura architettonica", in modo totalmente aperto alla tutela degli oggetti "di storia" e non solo "d'arte", quindi alle esigenze della massima conservazione; come si vedrà, in un senso che può già definirsi "critico-conservativo".

## 1.3.1. Restauro e conservazione

Negli ultimi anni il termine “conservazione” è stato, sulla scorta di suggestioni provenienti dall’uso anglosassone del vocabolo, adoperato di preferenza e sempre più di frequente per designare le concrete operazioni in difesa dei beni culturali; esso, in adesione all’orientamento di pensiero volto a privilegiare la natura “conservativa” rispetto a quello “reintegrativa” e “rivelativa” dell’intervento, ha mirato a soppiantare la più antica e consolidata dizione di “restauro”. Lo stesso vale per la parola “monumento”, vista come incapace di designare l’attuale allargato interesse per la totalità dei beni culturali e architettonici.

In realtà, la dizione di “restauro” e quella conseguente di “restauro dei monumenti” meritano d’essere conservate, proprio per aver subito, nel linguaggio scientifico italiano e più generalmente neolatino, un processo di rinnovamento semantico e di aggiornamento dei contenuti. “Restauro” da intendere, in prima definizione, come intervento diretto sull’opera e anche come sua eventuale modifica, condotta pur sempre con somma cautela; “conservazione”, come opera di prevenzione e salvaguardia, da attuare proprio per evitare che si debba poi intervenire col restauro, il quale costituisce pur sempre un evento traumatico.

Se ogni “oggetto” di restauro gode d’una doppia polarità (Brandi, 1963a), quella “storica” e quella “estetica”, che lo caratterizzano e che sovente si pongono in contrasto fra loro, specie quando si tratti di questioni di “rimozione delle aggiunte” o di reintegrazione delle lacune, compito del restauratore sarà di riuscire a contemperare, con senso critico, tali opposte istanze. Nel caso di un’antica pregevole tavola più volte ridipinta potrebbe l’istanza estetica reclamare la rimozione degli strati di colore non originali e, contemporaneamente, la storica esigerne il pieno rispetto quali testimonianze depositatesi nel tempo. Il contrasto esiste ed è inutile negarlo, né si possono far valere criteri oggettivi o automatici di scelta. Si configura un rapporto dialettico fra le due istanze che andrà attivato e risolto, volta per volta, nella sintesi d’un giudizio che varrà a orientare il successivo, materiale atto di restauro.

Per completezza va, infine, sgombrato il campo da possibili equivoci, definendo con chiarezza che cosa di certo non è restauro. Non il semplice “ripristinamento”, il “risarcimento” di una struttura, la “riparazione” funzionale di un oggetto, il “rifacimento” più o meno integrale di un manufatto (che è operazione da collocare, in certo modo, oltre il restauro); non lo è neanche il cosiddetto “riuso”, con i suoi derivati e analoghi, quali la “rivitalizzazione”, il *recycling*, il “recupero”, tanto in auge oggi in campo architettonico e, ancor più, in quello normativo e urbanistico.

Il riuso, infatti, è un semplice mezzo per assicurare la conservazione d’un manufatto storico e per volgerlo, se possibile, a scopi sociali, ma non è il fine primario né può pretendere di risolvere in sé l’intera problematica del restauro. Il recupero si volge indifferentemente, sempre per motivazioni pratiche e



in primo luogo economiche, a tutte le preesistenze maltenute o sottoutilizzate, ma non coltiva per sua natura l'interesse conservativo e le motivazioni scientifico-culturali del restauro.

Non sono restauro neanche la "salvaguardia", la "manutenzione" e la "prevenzione", attività fra le più importanti, ma ricadenti ancora nel campo della "conservazione", quindi "al di qua" del restauro propriamente detto. Non lo sono la salvaguardia e la prevenzione, anche perché provvedimenti che non implicano «l'intervento diretto sull'opera» (*Carta del restauro*, 1972, art. 4); né la manutenzione, perché, pur contemplando un tale tipo d'intervento, non richiede se non un embrionale impegno storico-critico, che del restauro è condizione essenziale e fondativa.

### 1.3.2. Recuperare, riusare, consolidare

Collocandosi il problema della destinazione d'uso nella sua giusta prospettiva, interna alla disciplina stessa del restauro, non d'un qualsiasi "riuso" si dovrà parlare, ma solo di quello compatibile con le vocazioni che il monumento, indagato con intelligenza storica, saprà rivelare. Non necessariamente dell'uso originale (anche se questo sarà pur sempre preferibile, quando sia possibile conservarlo o riproporlo), ma d'un uso corretto e rispettoso della realtà materiale e spirituale del monumento.

Non a caso, nella dizione di "recupero", il senso letterale è quello di "ritornare in possesso", "riavere", ancor meglio "riscattare" un oggetto perduto o trafugato; da qui alla concezione della tutela e del riuso come "riappropriazione" dei beni culturali, con i prevedibili esiti strumentali, politico-ideologici e consumistici, il passo è breve. È stato inoltre notato che il recupero "tecnologico" privilegia le categorie del comfort, della funzione, della durevolezza, sì da poter reimmettere il bene nel circuito del mercato.

All'equivoca identificazione di "restauro" e "recupero" si affianca l'altra, ugualmente diffusa, di "restauro" e "consolidamento" strutturale o dei materiali. Carattere proprio del restauro, non del recupero, è il fatto che conoscenze storiche e competenze tecnico-scientifiche non possano esservi considerate come variabili indipendenti, anche se ciò si manifesta nella pratica. Lo stesso avviene per il restauro e il consolidamento, quando li si ponga a confronto. Basti considerare l'artificiosa distinzione fra "progetto di consolidamento" e "progetto di restauro" che fonda sull'assunto, tutto da dimostrare, che in un'antica costruzione i problemi statici e quelli dei singoli materiali possano essere isolati e trattati separatamente dalla più generale comprensione dell'organismo architettonico; e che possano, di conseguenza, venire studiati da un esclusivo punto di vista tecnico, fisico e matematico, senza riferimento alla ricerca storico-critica, l'unica in grado d'illuminare la temperie culturale e la "volontà" artistica, il *Kunstwollen* (Riegl, 1903), che ha prodotto la struttura in esame.

Il consolidamento invece deve rispondere a quelle stesse regole che guida-

no il restauro (oltre che alle leggi proprie della statica, della scienza delle costruzioni ecc.) e divenire un'accezione del restauro stesso.

#### 1.4

### Gli orientamenti teorici

Dopo la fase di prevalenza assoluta della cultura francese (Eugène Emmanuel Viollet-le-Duc, 1814-1879) e grazie ai benefici influssi di parte della riflessione inglese (John Ruskin, 1819-1900) fondamentali progressi del moderno restauro si manifestano in Italia nel periodo a cavallo fra Otto e Novecento col diffondersi dei principi del “restauro filologico” e “scientifico”; poi del “restauro critico”, negli anni della Seconda guerra mondiale (Roberto Pane, 1897-1987, e Bonelli); infine della *Teoria* di Brandi (1963b), che costituisce ancora oggi un ineguagliato punto di riferimento e rappresenta il definitivo affermarsi del pensiero e della prassi italiani in campo europeo, quindi mondiale.

Brandi, muovendo dai medesimi presupposti filosofici del restauro critico, ne ha sviluppato in modo originale le prospettive teoretiche con l'apporto della fenomenologia e dello strutturalismo. Il tutto, non solo a parole, ma anche con un impegno operativo di grande qualità come quello fornito dall'ICR (Istituto Centrale del Restauro) in Roma.

Circa trent'anni fa Liliana Grassi (1980; cfr. anche Crippa, Sorbo, 2007), tratteggiando il panorama ultimo e allora più recente del restauro, passava in rassegna dapprima le Carte del 1964 e del 1972, poi l'“integrazione dell'immagine”, infine la “conservazione integrata” (restauro e contestuale attribuzione di adeguate funzioni, secondo il dettato della *Carta Europea del Patrimonio Architettonico*, detta *Carta di Amsterdam*, 1975) coi relativi sviluppi in campo urbanistico. Individuava come discutibili deviazioni la cosiddetta “appropriazione dei beni culturali”; i portati della “linguistica”, privi di esiti soddisfacenti; il “restauro tipologico”, rispondente al “principio della falsificazione”; e concludeva affermando piena sintonia coi fondamenti del “restauro critico”.

Delle posizioni profeticamente biasimate dall'illustre studiosa oggi non resta più traccia. Anche il restauro tipologico, che ha tenuto il campo più a lungo, per la sua buona rispondenza a una visione burocratica e semplificata del restauro, non è più veramente attuale.

Sono emerse, nel frattempo, posizioni nuove e più solidamente costruite, che si affiancano, una da sinistra e una da destra si potrebbe dire, a quelle del restauro critico, assolutizzandone gli aspetti conservativi, in un caso, quelli reintegrativi, nell'altro. Si tratta della “pura conservazione” e della “manutenzione-ripristino”. Fra esse, maggiori riserve merita la linea del ripristino, per i più rischiosi esiti applicativi che comporta; mentre sulla pura conservazione si può concordare o no, senza però dimenticarne il carattere prudenziale che la distingue e la spontanea adesione al salutare criterio del “minimo intervento”.

## 1.4.1. L'eredità del Novecento

Già nell'Ottocento, quale reazione e antitesi al "restauro stilistico" (Viollet-le-Duc; George Gilbert Scott il Vecchio, 1811-1878; August Essenwein, 1831-1892; Paul Tornow, 1848-1921), visto come pratica di arbitraria e profonda alterazione e manipolazione del monumento, si manifesta una spinta al rispetto totale e assoluto dell'opera (movimento "antirestauro": Ruskin, William Morris, 1834-1896). Si tratta del venire a maturazione di quelle tendenze "conservazioniste" presenti sin dagli esordi del moderno pensiero.

Se il restauro stilistico appariva generalizzante se non generico, fondato sul criterio d'analogia, sulla trasposizione da esempi simili, sulla presunta divinazione di ciò che l'antico artista, redivivo, avrebbe oggi fatto, nelle successive formulazioni del cosiddetto "restauro storico", invece, per prima cosa si fa riferimento alla ricerca documentaria (Luca Beltrami, 1854-1933; Louis Clouet, 1849-1920). La restituzione e il ripristino non vengono rifiutati *a priori*, ma dovranno limitarsi alla corretta riproposizione di ciò che manifestamente è esistito, non procedendosi per via analogica ma d'indagine storica.

Parallelamente si configura il cosiddetto "restauro scientifico" o "filologico" o "teoria intermedia", prima moderna definizione dottrinarica, elaborata in ambiente italiano (Camillo Boito, 1836-1914; Gustavo Giovannoni, 1873-1947), sintesi equilibrata delle tendenze che abbiamo visto fronteggiarsi. Non si trattò d'un semplice accomodamento o contemperamento d'istanze diverse, come il nome potrebbe erroneamente lasciar intendere, ma d'un effettivo e concreto passo avanti, con riflessi corposi in ambito europeo (Gyula Foster, 1846-1932; Paul Léon, 1874-1962; Leopoldo Torres Balbás, 1888-1960). Esso ha risentito della più generale maturazione sopravvenuta in campi collaterali e allora d'avanguardia, come l'archeologia, la ricerca storica pura (si pensi a Johann Gustav Droysen, 1808-1884) o quella filologico-letteraria, volta soprattutto alla critica testuale in ambito classico.

Per decenni lo si è considerato una formulazione d'assoluto rigore, quasi l'ultima parola in fatto di restauro, per la perfezione e la coerenza dei principi; ma, come tutti i portati storici, anche i postulati del restauro scientifico sono stati scossi e minati sia dagli eventi drammatici della Seconda guerra mondiale, che ne hanno dimostrato la non generale applicabilità, sia dalle nuove acquisizioni estetiche e del pensiero sull'arte, che ne hanno evidenziato l'inattualità e i limiti concettuali.

Questa visione del restauro s'è rivelata, a un'attenta analisi, più filologica che scientifica nel senso pieno del termine; insufficiente ai fini della comprensione storica profonda del monumento, che richiede tutto un "lavoro ulteriore" (Benedetto Croce, 1866-1952) di ripercorrimiento critico e d'apprezzamento estetico; squilibrata rispetto alle due istanze, la storica e l'estetica, a favore della prima, con la conseguenza di svuotare il restauro di buona parte del suo significato.

## 1.4.2. Il “restauro critico” e i suoi sviluppi

Dall'estetica neoidealista e spiritualista crociana ha preso le mosse (Pane, 1987; Bonelli, 1995) una linea di pensiero volta in primo luogo alle manifestazioni artistiche (ma poi, con felici aperture, estesa a tutto il costruito d'interesse storico-culturale), per cui se la storia dell'arte e dell'architettura sono riconoscimento e valutazione, cioè critica, il restauro medesimo è da intendersi come “atto critico”, storiografia e critica insieme, prolungamento di queste nella pratica operativa. In tal modo tutte le conquiste del restauro lo sono anche della storia, della critica e viceversa.

Esso risponde all'esigenza di conservare o ristabilire, senza interventi falsificanti, l'unità dell'immagine figurata. Da qui anche l'accezione del “restauro critico” come “atto creativo”, non arbitrario ma condotto su precisi binari storico-critici, e la considerazione che ogni intervento costituisce un caso a sé, non inquadrabile in categorie (come quelle meticolosamente precisate dai teorici del “restauro scientifico”: completamento, liberazione, innovazione, ricomposizione ecc.), né rispondente a regole prefissate o a dogmi di qualsiasi tipo. Sarà l'opera stessa, indagata con sensibilità storico-critica e competenza tecnica, a suggerire la via più corretta da intraprendere.

Ciò in relazione ai problemi basilari che il restauro comunemente pone: di reintegrazione delle lacune, rimozione delle aggiunte, distinguibilità dell'intervento, controllo delle tecniche e così via. Problemi che richiedono, a differenza dell'attività storiografica vera e propria, risposte non soltanto verbali, ma concretissime: date necessariamente dipingendo e non solo parlando quando si tratti di restauro pittorico, plasmando nel restauro scultorio, facendo architettura nel caso di quello edilizio.

La cosiddetta “reintegrazione dell'immagine” (Carbonara, 1976) si riconosce come una particolare declinazione del “restauro critico”: attenta in particolar modo alle implicazioni “creative” del restauro stesso, comunque ineliminabili; aperta alle questioni di reintegrazione delle lacune e, ugualmente, di rimozione delle aggiunte, pur nel rispetto dell'enunciato brandiano che considera queste ultime come “eccezionali”; capace di far nuovamente godere quell’“in più” di quanto materialmente sussista, nell'opera frammentaria sottoposta a restauro, senza pregiudizio per la sua fisica sussistenza.

Sempre nell'alveo del “restauro critico” può ricondursi la riflessione di Brandi (1963a, 1963b), sistematica e ricca d'autonomi approfondimenti di metodo.

Premesso che il restauro si riferisce a quello «speciale prodotto dell'attività umana a cui si dà il nome di opera d'arte» (Brandi, 1963b, p. 32), definendo la dialettica delle due istanze, la storica e l'estetica, Brandi conferma la prevalenza di quest'ultima, perché la singolarità dell'opera sta proprio e in primo luogo nella sua artisticità. Egli non reputa di dover aggiungere l'istanza dell’“utensilità”, chiamata in causa, al contrario, da molti autori, specie in riferimento all'architettura.

Scopo del restauro è il ristabilimento dell'unità potenziale dell'opera d'arte, senza per questo commettere un falso artistico né un falso storico e senza cancellare le tracce del passaggio del tempo, che vedono nella "patina" dei materiali un segno e un arricchimento estetico meritevoli di rispetto.

Durissima è la sua polemica contro il ripristino e ogni forma di restauro retrospettivo che presuma reversibile il cammino della storia.

Per concludere, è interessante notare il confluire su tali orientamenti di studiosi e operatori provenienti da settori o ambienti culturali del tutto diversi, come la chimica polacca Hanna Jedrzejewska (1976), che con ragioni scientifico-tecniche rivendica i diritti della selezione e del giudizio, ponendosi a difesa del versante "critico" del problema, o numerose significative esperienze ungheresi di restauro architettonico, impegnate sul fronte "creativo" (archh. M. Horler, K. Ferenczy, J. Sedlmayr). Interessante è anche l'originale riflessione di Paolo B. Torsello (2006), che muovendo da posizioni rigorosamente conservative ha colto l'esigenza di un'apertura in questo senso, tale da non rifiutare *a priori* questioni di valutazione della "qualità" del manufatto e della "cura" dell'intervento che lo riguarda.

#### 1.4.3. La pura conservazione e la manutenzione-ripristino

L'orientamento di pensiero a favore della manutenzione-ripristino s'accompagna, nell'ambito del restauro architettonico, a una reiterata pretesa d'autonomia di quest'ultimo dalle altre arti.

Si può notare come esso discenda inopinatamente dal severo richiamo alla "conservazione" attuato, agli inizi degli scorsi anni settanta, da alcuni autorevoli critici e storici dell'arte (Maurizio Calvesi, Mina Gregori) non a caso interessati al recupero del pensiero, rigorosamente ed eticamente conservativo, di Max Dvořák (1874-1921) quale emerge dal suo *Katechismus* (1916). Richiamo subito accolto, ma poi sviluppato secondo due linee antitetiche, quella della "pura conservazione" e quella, appunto, della "manutenzione-ripristino". Gli intenti, almeno nelle affermazioni di principio, sembravano concordare, ma proprio sul senso, sui limiti e sui metodi dell'atto manutentivo e sulla conseguente "mutazione" che esso induce nell'oggetto hanno finito per divergere radicalmente e la teoria e la pratica.

In questa seconda linea, l'istanza conservativa s'è incontrata e saldata con l'estendersi dell'attenzione ai problemi delle opere d'arte all'aperto, esposte a un crescente inquinamento e logorio materiale; con l'apporto della ricerca scientifica (con felici trasposizioni dalla termodinamica e dalla fisica tecnica), tuttavia senza un'adeguata mediazione critica e teoretica; col recupero delle tecniche antiche, che lasciava intravedere lusinghieri risultati.

Questa serie di stimoli, tradotta con semplificazioni pratiche e concettuali nel campo dei monumenti architettonici, in specie di quelli che una volta si sarebbero detti "vivi" (Cloquet, 1901-02), ha portato a risultati che sono la negazione più radicale delle premesse da cui ci si era mossi. Dal conservare

integralmente si è pervenuti a proposte che puntano, nella sostanza, al rifacimento, con tecnica tanto più sottilmente falsificatoria quanto più filologicamente e documentariamente fondata.

Né si può dire che sulla gravità dei danni da inquinazione, evocata come la ragione prima d'una tale visione del restauro, gli specialisti siano in accordo; tanto meno sembrano esserlo sui rimedi da proporre. Diagnosi e cura, per esempio in merito alle superfici "povere" (intonacate e tinteggiate), oggi sono tutt'altro che univoche, come lasciano intendere alcune note affermazioni, esortanti alla massima prudenza, di studiosi come Guido Biscontin, Federico Guidobaldi e Giorgio Torraca.

Negli ultimi tempi s'è più chiaramente dichiarato l'intento di fondo, riconoscibile nel voler riportare l'edificio alla sua "originalità", per restituirgli così pieno valore e significato. Non si è però considerato che preconditione per la salvaguardia e perpetuazione d'ogni valore era proprio il geloso mantenimento del massimo d'autenticità materiale dell'oggetto, quale stabile supporto a ogni successivo riconoscimento di senso, indagine storica o corretta fruizione.

Sul versante della "pura conservazione", al contrario, s'è negata la dialettica stessa delle due istanze e ogni efficacia al "giudizio di valore", reputato arbitrario e inaffidabile nel costituire gerarchie riguardo a ciò che si debba o meno tutelare: nessun procedimento storico-critico potrà mai giustificare la condanna irreversibile d'una qualsiasi testimonianza, stratificazione o perfezione, tanto meno appellandosi a soggettive predilezioni estetiche.

In sostanza, ci si volge alla sola istanza storica, mentre del concetto stesso di "storia" si assume una versione poco selettiva e valutativa, con forti venature neopositivistiche.

Tale scelta viene giustificata con gli sviluppi della moderna riflessione storiografica quale si è andata configurando, nel nostro secolo, grazie soprattutto alla scuola delle "Annales" e agli apporti della *nouvelle histoire* (Lucien Febvre, Fernand Braudel). Il documento materiale assume il preminente valore di fonte d'informazione autentica, che non ha limiti nella sua potenzialità documentaria, a seconda di come lo s'interroghi; il restauratore, di conseguenza, se non vuole che tale potenzialità rischi d'essere annullata, deve trasformarsi in puro conservatore.

Ma anche tale questione è tutt'altro che appianata e gli orientamenti storiografici mostrano ampie divergenze: per esempio, Edward H. Carr (1961) ci rammenta che i "fatti" storici che noi conserviamo non s'identificano, come alcuni vorrebbero, con tutto l'esistente, ma soltanto con ciò che è riconosciuto o interpretato come tale. D'altra parte è nota la differenza crociana fra storia e cronaca.

Certamente noi abbiamo, grazie anche agli studi storico-sociali e agli apporti dell'antropologia culturale, una concezione più larga e comprensiva della storia, ormai aperta alle testimonianze più povere, ordinarie e quotidiane di vita. Da qui la giusta esigenza di più conservazione, ma non fino a negare le

prerogative del giudizio storico e bandire il problema stesso della “rimozione delle aggiunte” e finanche quello della “reintegrazione delle lacune”.

In tal senso una proposta “critico-conservativa” del restauro, che assuma su di sé il dovere di quest’allargata coscienza di tutela, senza rinnegare alla radice la complessità e la dialettica del restauro, sembra adeguata e convincente. Al contrario, la rinuncia ad avvalersi della ragione critica del restauro comporta il rischio, di fronte alla necessità d’intervenire e di scegliere, di scivolamenti verso ragioni d’altro tipo, assai meno sensibili alle esigenze dei beni culturali.

#### 1.4.4. Altre recenti proposte

Sono da considerare con interesse alcune più recenti proposte facenti capo a storici dell’arte e dell’architettura investiti anche di responsabilità operative.

Paul Philippot (1998), pur apprezzando il superamento dell’approccio artigianale alla disciplina e il suo volgersi alle scienze, si è sempre rifiutato di ridurre il restauro al suo substrato tecnico, affermando che la conservazione presenta innanzitutto un carattere culturale, insieme storico ed estetico, mai riconducibile alla semplice opera di manutenzione. Ha poi rilevato il pericolo insito nella convinzione che l’impiego di metodi nuovi costituisca di per sé una garanzia di successo, riconoscibile al contrario in una seria collaborazione interdisciplinare.

Fautore dell’attento giudizio caso per caso e alieno da ogni dogmatismo, Philippot fa discendere le sue proposte di restauro dalla natura stessa delle opere da conservare. Il compito è di rendere alla “struttura estetica” del bene la chiarezza perduta, nella coscienza che ogni restauro resta essenzialmente un’ipotesi critica, proposizione sempre modificabile senza alterazione dell’originale (concetto di “reversibilità”); ipotesi non espressa verbalmente, ma in atto, realizzata con il linguaggio medesimo dell’oggetto dell’intervento. Da qui la considerazione che il restauro è soprattutto un «lavoro artistico e richiede una cultura pratica dell’immaginazione visiva» (Philippot, 1998, p. 24).

Suo è anche l’avvertimento circa l’impossibilità di ristabilire, tramite il restauro, l’opera nel suo “stato originale”, mentre si può rivelare, al massimo, lo “stato attuale” della materia antica. Da qui la definizione di “patina” come concetto “critico” e non meramente “fisico”.

Le proposte che vengono oggi dall’ICR, la più alta autorità in materia nel campo delle opere d’arte, muovono dall’intento perseguito da Giovanni Urbani (direttore dal 1974 al 1983) di giungere alla definizione non empirica d’una vera e propria “scienza della conservazione”. Questa, attenta in primo luogo alle modalità d’analisi dei materiali e dei processi di degrado, avrebbe dovuto esercitarsi secondo i criteri d’una “manutenzione programmata”, che commisurasse fragilità e rischi delle opere a tempi e consistenza economica degli interventi.

Successivamente, sotto la direzione di Michele Cordaro (1994, da cui si cita, ma anche 2000), questa linea ha trovato nell’ICR nuova forza propulsiva,

ma sempre accompagnata dal richiamo all'importanza del risultato estetico, oltre che conservativo, d'ogni intervento. Appare, infatti, «evidente che né i nuovi procedimenti tecnici né l'applicazione di strumentazioni scientifiche risolvono di per sé la problematicità di scelte che investono la determinazione critica e storica dell'opera pittorica, per esempio la rimozione o il mantenimento di rifacimenti o ridipinture o il livello cui fermarsi nel procedimento di pulitura delle superfici dipinte».

Con diretto riferimento all'architettura, si sviluppa la riflessione di Gianfranco Spagnesi (1995, 2007), fondata su assunti meritevoli d'attenzione: l'opera architettonica è cosa diversa da quella pittorica e scultoria perché essa è vincolata alla destinazione d'uso. Inoltre, un'opera di pittura o scultura mantiene nel tempo una fisicità in gran parte autentica e originale; non così l'architettura, più profondamente segnata dal trascorrere del tempo, costantemente manipolata nelle sue forme e nei materiali.

Se quindi in pittura e scultura l'istanza storico-critica coincide col riconoscimento delle qualità originarie dell'opera, in architettura il valore non potrà che risiedere nella sua consistenza attuale, frutto di stratificazioni spesso secolari. Lo stesso vale, a maggior ragione, per i centri storici. Ne consegue che per l'architettura si può soltanto parlare di molteplicità di momenti storici e la corretta ricostruzione di tali momenti o fasi è compito d'una sorta di "restauro mentale", per dirla con Roberto Longhi (1940), che si presenta come validissimo strumento di conoscenza del valore attuale, storico e artistico, dell'edificio.

Il vero e proprio restauro è invece altra cosa: trascendendo ogni considerazione di pratica convenienza, esso si volge alla fisicità del costruito per trasmettere valori e segni che testimonino il passaggio del tempo. Nel metodo esso si fonda sulla conoscenza della realtà presente e sull'individuazione e tutela del valore attuale, legato al riconoscimento di qualità dell'oggetto. Tutto ciò mantenendo e conservando l'autenticità dei materiali delle singole architetture, testimonianze delle fasi del loro processo di trasformazione. Tale modello si può estendere agli spazi urbani, dove i valori storici prevalgono, in genere, su quelli artistici.

Anche in questa prospettiva il restauro è visto come atto critico fondato sulla storia e assume, nel riferimento all'architettura, un valore di rigorosa e più convinta conservazione.

Altri elementi di novità si riconoscono nel pensiero di Paolo Fancelli (1994, da cui si cita, ma anche 1998a e 2006), attento alla conservazione in quanto interpretazione aggiornata del restauro, ma non aderente all'idea della "pura conservazione", da lui considerata posizione agnostica e indifferenziata. Giusta è, invece, la "tendenza conservativa", sviluppatasi fin dagli anni ottanta grazie a puntuali ricerche avviate in campo scientifico e ai percepibili sviluppi della disciplina. Essa «contempla nel proprio seno pure mirate asportazioni» e «oculati, distinti, seppur limitati, risarcimenti, ma sempre nel supremo interesse della salvaguardia dell'integrità dell'opera, nella sua complessità, nella sua materialità e nella sua diacronica originalità».



Tale proposta si fonda su un sistema di valori che sono «quelli di uno storicismo non assoluto», «di una reale saldatura tra filoni cosiddetti umanistici e scientifici», «di un'estetica della formatività, nell'ambito di una visione etica laica del mondo». In questo senso permane, come nel restauro critico, «prioritaria la penetrazione storica dell'opera dall'interno», nel suo processo generativo e trasformativo, nei suoi valori, sicché l'indagine precederà sempre il restauro, fornendogli strumenti e dati conoscitivi, da cui sarà poi ulteriormente illuminata, in un circolo virtuoso di sicura efficacia.

Il panorama europeo, nel quale lungo tutto il Novecento s'è distinto il contributo italiano, si presenta ancora oggi alquanto deludente. La Gran Bretagna, come i paesi extraeuropei di cultura anglosassone, è ripiegata su posizioni di totale empirismo, sensibile alle ragioni tecniche del conservare ma immune da qualunque riflessione. La Francia, per lungo tempo legata a ottocentesche modalità stilistiche d'intervento, più di recente (Bady, 1985, ma cfr. anche Vitale, 2006) s'è aperta ai criteri prudenziali del restauro scientifico italiano d'inizio secolo, riscoprendo come nuove acquisizioni ormai consolidate (rispetto delle stratificazioni, minimo intervento ecc.); si distingue, però, l'originale speculazione di Françoise Choay (1992) sul più ampio tema del patrimonio storico e delle sue prospettive nella società attuale.

La Germania sembra aver superato solo da qualche anno la situazione d'emergenza, non solo pratica ma in qualche modo anche psicologica, della ricostruzione postbellica, che ha implicato una prassi, spesso frettolosa, non accompagnata da un pensiero altrettanto vivace. Difatti oggi notiamo il riaccendersi d'interesse per il dibattito teorico, già vivissimo all'inizio del secolo (Georg Dehio, 1850-1932 ed altri, accanto agli austriaci Riegl e Dvořák): si sono subito delineate, com'era prevedibile, le due linee forti della conservazione e del ripristino (da un lato Georg Mörsch, attivo in Svizzera, dall'altro Jörg Traeger), mentre chi più è rimasto in contatto con la cultura italiana, come Wolfgang Wolters o Heinz Althöfer, persegue un'equilibrata visione critica del restauro (Fiorani, 2006).

Anche la Spagna oscilla fra modalità tardostilistiche, ormai decisamente minoritarie, e puntate modernizzanti o, in certi casi, neostilistiche, non insensibili agli influssi del *post-modern*. Un più recente tentativo anglospagnolo di "fondazione" d'una, finalmente aggiornata e moderna, "teoria" si è risolto nei termini d'una riconsiderazione del restauro sotto il profilo economico; della ricerca di consenso "democratico" e sociale nei confronti dei suoi criteri operativi e delle sue stesse scelte di fondo; della verifica, quale criterio di giudizio, della "soddisfazione dei fruitori". In sostanza, a nostro avviso, in un disinvolto empirismo, molto britannico, accompagnato da un relativismo, molto ispanico, dei complessi temi in questione. A Barcellona, tuttavia, studiosi come Salvador Tarragó guardano con interesse e originalità di pensiero ancora una volta all'Italia e alle sue esperienze, così anche Ascensión Hernández Martínez a Saragozza. I paesi dell'Europa centrale sono stati legati per decenni a indirizzi di restauro segnati, si potrebbe dire, dagli echi del "realismo socialista": così la

Germania orientale, ma anche i Paesi Baltici, la Russia e, in parte, la Polonia. Da qui la spinta a superate pratiche estesamente ricostruttive, motivate da esigenze sociologico-didascaliche e dalla fiducia in uno “storicismo” garante di verità. Solo l’Ungheria ha seguito una strada propria, feconda e originale, aperta alla sperimentazione delle facoltà critiche e creative del progetto di restauro: ancora una volta, secondo esplicite e ufficiali testimonianze, accogliendo ed elaborando suggestioni italiane e in specie le raccomandazioni della *Carta di Venezia*, documento di carattere internazionale ma di matrice culturale, nuovamente, italiana (Roberto Pane e Pietro Gazzola; cfr. Fiorani, 2007, ma anche, per completezza, Jokilehto, 2007 e Mugayar Kühl, 2007).

#### 1.4.5. La proposta critico-conservativa

S’è detto della moderna, estensiva accezione del termine “monumento” e della sua apertura alle testimonianze più povere, anche della più ruvida cultura materiale.

Le conseguenze pratiche di tutto ciò sono l’estendersi dell’attenzione conservativa e di restauro a una quantità di beni molto più ampia di quanto potesse concepirsi anche solo settant’anni fa, quando vennero promulgate le due leggi di tutela ancora vigenti pochi anni or sono (nn. 1089 e 1497 del 1939) e oggi sostituite dal nuovo *Codice dei Beni Culturali e del Paesaggio*.

S’è detto anche delle più recenti proposte, aperte tanto alla critica quanto alla conservazione. Da qui le ragioni della linea critico-conservativa (Carbonara, 1996b, 1997) cui già s’è fatto cenno: essa accoglie l’istanza d’una più estesa tutela, assume un ruolo tendenzialmente aperto al massimo di conservazione, sia riguardo ai beni da salvaguardare che alle loro stratificazioni storiche, nel convinto rispetto dei segni stessi del tempo trascorso. Tuttavia, non per questo esclude alla radice la dialettica delle due istanze. Così facendo, si andrebbe incontro a gravi incongruenze e si toglierebbe al restauro e alla conservazione uno strumento di giudizio e d’orientamento formidabile, lasciando il campo ad altre meno valide e proprie forme di selezione (le ragioni tecniche lasciate a sé, quelle economiche, quelle pratiche e d’uso, quelle politico-rappresentative ecc.).

Il fondamento critico del restauro e la sua interna dialettica restano pienamente validi, ciò a difesa, in primo luogo, delle espressioni d’arte ma anche di tutto ciò che si presenta come semplice documento di storia (come s’è detto, anche il rudere, i centri urbani antichi e le tracce dell’antropizzazione sul territorio). Non quindi monumenti di prima e seconda scelta, ma uguale attenzione per tutte le testimonianze del passato; non disinvolti rifacimenti né altrettanto facili demolizioni, ma rigore e cautela massimi, senza escludere che si reputi possibile, per questo, l’eventualità della rimozione delle aggiunte.

In conclusione, la menzionata linea “critico-conservativa” ambisce a una duplice compiutezza: di essere “conservativa” perché muove dal presupposto che il monumento chieda, in primo luogo, d’essere perpetuato e trasmesso al

futuro nelle migliori condizioni possibili; inoltre perché tiene conto del fatto che l'attuale coscienza storica impone di conservare, come si è detto, molte più "cose" che in passato. "Critica" per l'esplicito richiamo alle formulazioni teoriche omonime (R. Bonelli, R. Pane, ma anche C. L. Ragghianti) e anche poiché muove dal convincimento che ogni intervento costituisca un episodio a sé, non inquadrabile in categorie, non rispondente a regole prefissate, ma da studiare a fondo ogni volta, senza assumere posizioni dogmatiche o precostituite (Carbonara, 2005).

### 1.5

#### L'unità di metodo

Si è finora parlato indifferentemente di "restauro", "restauro dei monumenti" e "restauro architettonico", come se si trattasse, per certi aspetti, della stessa cosa. Infatti il restauro generalmente inteso e il restauro architettonico non hanno nulla che, sul piano concettuale, possa differenziarli. Il secondo costituisce una particolare accezione del primo, dal quale si distingue non in linea di principio, ma nella pratica, per la diversa consistenza e dimensione degli oggetti di cui si occupa.

L'architettura come arte (analogamente alla pittura e scultura) o, per la sua antichità, come oggetto di storia postula una difesa che ricade a pieno titolo e senza eccezioni nel campo del restauro. Non a caso Brandi, nella sua *Teoria*, non considera mai l'architettura separatamente dalle altre espressioni artistiche, se non per raccomandare attenzione alla tutela del suo spazio-ambiente, che con essa forma un'inscindibile unità.

Non sembra quindi corretto parlare di un restauro architettonico distinto da quello delle cosiddette "opere d'arte mobili". Più precisamente si dovrebbe parlare d'unità di metodi e di principi, nella pluralità delle tecniche applicative, riferendosi a quella coesione teorica indagata da Brandi, affermata dalla *Carta* del 1972 e ribadita da Umberto Baldini (1978-81).

Ciò contro il rischio di deviazioni in senso pseudoscientista e tecnicistico (come se per restaurare un'architettura servisse più competenza tecnica di quanta ne occorra, ad esempio, per il restauro di un antico bronzo), ma anche socioeconomico (restauro "sociale" e sopravvalutazione finanziaria dei beni culturali, visti soprattutto come risorse da sfruttare), ideologico, funzionalistico, praticistico e malamente "creativo" o, meglio, ripristinatorio (per la naturale tendenza di architetti e ingegneri, addestrati in primo luogo alla progettazione e costruzione del nuovo, a superare i limiti del restauro correttamente inteso e, fra questi, il fondamentale criterio del "minimo intervento").

In questo senso la pur netta "eccettuazione" dell'architettura proposta da Spagnesi (1995) non cade negli equivoci sopra menzionati ma, al contrario, mantiene saldi i legami con la ricerca storico-critica e invita a intraprendere la strada della massima conservazione.

## 1.5.1. Dall'archeologia all'arte contemporanea

I problemi archeologici di conservazione e restauro sono fortemente legati al momento dello scavo e non intervengono soltanto in una fase successiva; di qui la necessità d'interventi già "sul campo", eventualmente predisposti in anticipo. Relativamente all'anastilosi (letteralmente, "rialzamento" di colonne o di un monumento, ma dizione ormai accolta nel senso di ricostruzione per rimontaggio di conci fra loro contigui, sin dall'origine posti in opera "a secco" e la cui posizione relativa sia certa) il migliore criterio è quello di procedere sempre nel rispetto del criterio del "minimo intervento", facendo quanto davvero necessario, anzi indispensabile, e di quello della "reversibilità" (o "distinguiibilità"), tuttavia senza disturbare la percezione del manufatto.

La linea conservativa ha in quest'ambito spontaneamente prevalso nei passati decenni, eppure anche qui, di recente, si sono visti esempi di spinto ripristino, spesso accompagnati da gravi manchevolezze filologiche, per non dire degli eccessi che si registrano in gran parte del mondo europeo e soprattutto extraeuropeo. Ciò nonostante si nota pure una certa maggiore sensibilità a difesa dei vecchi restauri, che cominciano a essere considerati parte della storia del rudere e dell'archeologia stessa.

Problemi non troppo diversi da quelli finora esaminati presentano le cosiddette arti minori, anche per la complessità tecnica degli interventi che richiedono, per gli apporti di laboratorio, per l'ausilio delle scienze chimico-fisiche. Così, ad esempio, tanto per il mosaico quanto per i libri e i manoscritti relativamente ai quali, tuttavia, più tarda è stata l'acquisizione d'un moderno concetto conservativo. Grazie a esso, finalmente, tante opere non sono state più affidate solo ad abili artigiani, i quali rimettevano a nuovo e ripristinavano pesantemente gli antichi manufatti, ma a veri restauratori, consapevoli delle implicazioni concettuali e di metodo del loro lavoro. Il restauro della produzione artistica contemporanea (dalle opere di Alberto Burri e Lucio Fontana fino all'arte povera di Jannis Kounellis o Piero Manzoni, per citare solo alcuni degli autori che più convintamente hanno usato materiali comuni e deperibili) non ha sviluppato ancora un suo statuto teorico e metodologico. Abbiamo la peculiarità di materiali sempre più d'origine industriale e, in molti casi, l'invecchiamento e la morte dell'opera programmati dallo stesso artista. Ma se questa è, alle volte, l'intenzione dell'artista, può non essere la nostra; proprio la testimonianza materiale di quella volontà poetica di lenta e "naturale" consunzione rappresenta ciò che oggi miriamo, contrastandola con tutti i mezzi, a conservare. Ciò vale sempre, tanto per il nuovo quanto per l'antico come, ad esempio, le effimere scritte elettorali pompeiane.

Anche le manchevolezze, gli errori e i difetti, involontari oppure in qualche modo voluti (in tal caso da intendere come "trasgressioni" al codice linguistico e tecnologico del momento), rientrano a pieno titolo nella storicità delle opere e vanno tutelati, limitandone soltanto i possibili effetti d'ulteriore degrado. Sembra, comunque, che il richiamo ai criteri e metodi del restauro

tradizionale possa oggi risolversi in un vantaggio per un settore operativo e di studi tuttora giovane.

È stato giustamente affermato che il giardino è opera d'arte vivente. In quanto "vivente", la sua conservazione e il suo restauro non potranno prescindere dalle leggi biologiche e genetiche del mondo vegetale; in quanto "opera d'arte", da quelle della più generale riflessione sulla tutela dei beni culturali.

In via provvisoria e facendo espresso riferimento ai contributi sul tema di Bonelli e Pietro Petrarola (Cazzato, 1989), si può anche in questo caso asserire, con tutte le conseguenze di metodo che ciò comporta, che la difesa dei giardini storici rientri a pieno diritto nel più generale problema di conservazione e restauro dei beni storico-artistici e in specie dell'architettura, cui l'accomuna il carattere d'un inscindibile legame col sito. Soprattutto appaiono illuminanti le affermazioni di Petrarola (1989, p. 177) circa l'analogia del giardino, vivo e per questo in continua trasformazione, con la «evoluzione della forma urbana».

Il fatto che nel giardino si tratti di opere deperibili non ci allontana più di tanto dalle questioni di restauro delle opere d'arte figurativa propriamente dette, specie contemporanee.

### 1.5.2. Il restauro dell'architettura contemporanea

Il tema del restauro del "moderno" o del "nuovo" pone, in primo luogo, il problema della sua collocazione teoretica e concettuale, se nell'alveo del restauro tradizionale e onnicomprensivo (architettura e arti del passato, in unità di metodo), se in quello dell'arte contemporanea o, infine, se in una sorta di altro genere, proprio dell'architettura in sé e di quella contemporanea in specie.

Per tentare di fornire una risposta sarà necessario riconsiderare il tema in una prospettiva più ampia, risalendo alle ragioni prime e fondative del restauro, riconoscendone le caratteristiche, distinguendole da quelle pertinenti ad altre modalità di approccio alle preesistenze che, tuttavia, non sono né restauro né conservazione.

Se "restauro" è intervento attuato, come si è detto, a fini di conservazione e trasmissione al futuro d'un oggetto cui si riconosca un valore storico, artistico, di cultura o, in altre parole, di "testimonianza materiale di civiltà", si dovrà concludere che non tutti gli interventi sulle "preesistenze" sono restauro (come s'è già detto, ad esempio, del "recupero" edilizio e urbano) e che non tutto il costruito è di per sé bene culturale, ma solo quello che sia riconosciuto tale attraverso un giudizio storico-critico.

Si conserva e restaura, quindi, per ragioni di cultura, di memoria e più generalmente scientifiche, mentre si recupera o si ristruttura l'esistente per ragioni in primo luogo economiche e d'uso.

Se si passa, a questo punto, a considerare l'architettura contemporanea, in

gran parte prodotto industriale o similindustriale, non sembra che sussistano fondate ragioni per isolarla dalla più generale riflessione appena svolta. Il punto d'avvicinamento al restauro (e non a una semplice esperienza di recupero, riuso o ristrutturazione) sta proprio nel preventivo riconoscimento di valore, storico-testimoniale o artistico, del manufatto, pur se prodotto in tempi a noi relativamente vicini, vale a dire nel corso del Novecento. Per capire il tema in questione si pensi ad alcune opere dei grandi maestri del secolo scorso o ad altre, non necessariamente qualificate sotto il profilo artistico, collegate a un importante evento storico o espressive di una determinata temperie culturale o di civiltà.

Quindi il giudizio storico-critico, spesso trascurato e osteggiato dagli stessi critici militanti e dai restauratori presi solo dalla componente tecnica del loro lavoro, torna prepotentemente a eccettuare e identificare nel continuo flusso di produzione di cose, artistiche e no, ciò che (non per casuali vicende selettive della storia o per fortuito ritrovamento dopo secoli di abbandono) già oggi riteniamo – con un atto di cultura che è nostro e solamente nostro, figlio del tempo presente, con quanto di positivo e negativo tale circostanza comporta – meritevole d'essere tramandato alle generazioni future.

Di fronte all'edificio di qualità, ad esempio il Palazzo dei Congressi di Adalberto Libera a Roma-EUR, non dovrebbero sorgere dubbi: esso può giudicarsi meritevole di tutela e restauro già per il solo valore artistico, in totale indipendenza dalla sua età e anche se il suo autore fosse tuttora vivente.

Il “distacco temporale” necessario alla formulazione del giudizio di cui s'è detto si coglie con maggiore evidenza, rispetto all'architettura, nel campo, per esempio, dei prodotti industriali. Per poter dichiarare “storica” o, almeno, “d'epoca” un'automobile, con tutto ciò che ne consegue in termini di tutela, di normativa specifica e di rispetto della sua “autenticità”, indispensabile perché il manufatto possa continuare a essere iscritto nell'apposito registro, bastano venti-trent'anni.

In conclusione, come non esistono motivi per separare le altre arti del disegno dall'architettura, così non ce ne sono per separare, ulteriormente, l'antico dal nuovo; tutto ricade sotto la solida unità di metodo del restauro generalmente inteso, quale si è sostanziata nel corso di secoli d'affinamento e di sperimentazione.

L'esigenza conservativa o, più precisamente, quella d'un rallentamento drastico degli inarrestabili processi naturali di degrado (eliminando, se possibile, quelli d'origine antropica) investe l'oggetto inteso quale “monumento-documento” o “testimonianza materiale” indipendentemente da come esso è stato in origine concepito. Ciò gli deriva, come s'è detto, dalle differenti coordinate temporali, storiche e culturali nelle quali noi oggi l'inquadriamo, lo apprezziamo e quindi lo tuteliamo, pur con le sue manchevolezze o “errori” costruttivi.

Di conseguenza l'intervento correttivo, imposto, per esempio, a molti edifici antichi e moderni in tutta Europa, anche se con qualche maggiore riserva in

Italia, e oggi propugnato da chi si richiama alle buone “regole dell’arte” del costruire e al loro inderogabile rispetto, non ha in effetti diritto di sussistere, se non come eccezione e comunque a margine del restauro. Ha invece pieni titoli, come si vedrà, nel campo propriamente filologico (quello dell’edizione critica dei testi, per espungere eventuali errori dei copisti su antichi codici o pergamene) perché, in tal caso, si lavora sempre su trascrizioni, mai sugli originali. In architettura e nel campo delle arti figurative (a parte, forse, il cinema e la fotografia) s’è invece costretti a operare, come s’è detto, sempre e solo su originali, in una permanente situazione di rischio; quindi le cose stanno molto diversamente e la massima prudenza s’impone, a favore della conservazione.

### 1.5.3. Le altre arti: musica, cinema, letteratura

Il problema del restauro non riguarda soltanto il campo figurativo. Questioni analoghe pongono, infatti, altre espressioni artistiche ed altre forme di lacunosità, evidenti in specie nel caso di lavori lasciati incompleti dai loro stessi autori o giunti a noi, per svariate ragioni, mutili. Qui il riferimento alla musica è immediato e pertinente, quando solo si pensi alla *Settima* e alla *Decima Sinfonia* di Franz Schubert o, diversamente, alla *Lulù*, su testo da Frank Wedekind, di Alban Berg.

Le tre opere citate, oggi tutte reintegrate, rivestono uno speciale interesse, perché non si tratta di completamenti “d’artista”, ma di casi condotti utilizzando mentalità e strumenti propri del critico e del restauratore. In campo letterario, non diversamente, abbiamo l’esempio d’una messa in scena, alcuni anni fa, degli incompiuti *Giganti della montagna* di Luigi Pirandello, guidata dall’intento di proporre una conclusione gestuale, visiva e scenografica, nell’impossibilità di tentarne, per la dimensione stessa delle lacune, una direttamente testuale.

Per l’opera di Berg, grazie a un “restauro” condotto con rigore scientifico e cautela, godiamo oggi d’un lavoro compiuto, frutto dell’impegno, non di un artista, ma d’un musicologo. Né si trattava del capriccio d’eliminare certe lacune, ma d’una precisa scelta critica, derivante dalla considerazione che i completamenti avrebbero consentito di recuperare l’organicità dell’opera e le sue interne simmetrie.

Operazioni analoghe si stanno conducendo sull’intero repertorio verdiano.

È importante subito notare certe significative rispondenze con alcuni celebri restauri in campo figurativo: dalla dilatazione dei tempi di lavoro (superiori a quelli di stesura delle opere stesse, come per la michelangiolesca volta della Sistina) alla chiamata in causa non di “artisti”, ma di “musicologi” (capaci di padroneggiare tanto le tecniche e il linguaggio specifico, quanto il versante storico-critico del problema, esattamente come si richiede ai veri restauratori). Né diverso è il caso dell’accurato restauro condotto da Sergej Jutkevic sulla più famosa opera cinematografica di Sergej M. Eisenstein, *La corazzata Potëmkin* (1925).

Lo storico della letteratura Giuseppe Petronio (1990), trattando di “restauri letterari”, sente l’esigenza di rammentare l’impossibilità che la critica possa «ricostituire un’opera così come fu immaginata e composta» (ivi, p. 4). Il che, ricondotto al nostro tema, sta a significare l’impossibilità della completa restituzione e tanto più della ricreazione, quasi noi fossimo gli antichi artefici redivivi. Trova invece conferma la strada dell’interpretazione critica come atto sempre soggettivo e provvisorio, in quanto tale capace di garantire, anche nel futuro, la piena leggibilità del testo, non alterato, ma trasmesso nei suoi caratteri d’autenticità. Ciò tramite un «giudizio che non sarà vero in assoluto», scrive Petronio, «ma sarà storicamente vero» (ivi, p. 9); per noi tanto vero da poter trapassare in cosciente e corretta operatività.

## 1.6

### Filologia e restauro

Va notato che finora s’è fatto ampio riferimento a forme d’arte in qualche modo meccanicamente riproducibili (il cinema) o per le quali, comunque, il supporto materiale non s’identifica con l’opera stessa ma ne costituisce il semplice “stimolo” materiale alla riproduzione estetica e all’interpretazione (si pensi alla musica, che non è tale sulla carta ma lo è nel suo venir eseguita e ascoltata, o alla poesia nel suo essere letta o declamata).

Senza entrare in sottili questioni filosofiche, qui basti notare che, circa il rapporto fra materia e opera d’arte, lo spartito musicale non si pone come la tavola del dipinto o il marmo della statua; esso non perde d’originalità, dal punto di vista strettamente musicale e poetico, se invece del foglio vergato di propria mano dall’autore si tratta d’una sua copia, anche fotostatica, così come la poesia di Dante non è diversa se letta su un manoscritto del XIV secolo o su una buona edizione moderna.

Tale genere di considerazioni, se trasferito nel campo propriamente figurativo o, meglio, delle arti “del disegno” (pittura, scultura, architettura e cosiddette arti minori o applicate), non vale; il rapporto fra opera d’arte e materia è qui di strettissima interdipendenza, né l’opera sussiste fuori dell’immediatezza dei suoi materiali. Essa coincide totalmente con la sua fisicità, in una visione materialistica e pragmatista; oppure, in una idealistica e fenomenologica, nella materia trova lo stimolo sensoriale indispensabile alla riproduzione dell’esperienza estetica, in altre parole, alla sua “epifania”.

Ne discende, quale provvisoria conclusione, che nel campo figurativo il restauro lavora sempre e soltanto su “originali”, con tutti i rischi d’errore e di danno, quindi con tutta la prudenza che tale circostanza comporta.

Risultano, a questo punto, meglio delineate le affinità, ma soprattutto le differenze, anche di responsabilità, che sussistono fra l’operare, in termini di reintegrazione e in particolar modo d’espunzione, su di un testo musicale o letterario e su di un’opera pittorica o architettonica. Diversità che, tuttavia, non inficiano i fondamentali criteri operativi di restauro, metodologicamente



anteriori alla precisazione della forma d'arte implicata ma inerenti, invece, alla natura del danno (lacuna, alterazione materiale, aggiunte improprie ecc.), alla sua dimensione e alle ragioni stesse del conservare.

Non a caso, quindi, nel restauro delle opere d'arte figurative s'insiste, accentuando se possibile il rigore stesso della filologia, sui criteri prudenziali (reversibilità, minimo intervento, distinguibilità, compatibilità fisico-chimica) e, più precisamente, sul carattere "diacritico" (cioè distintivo) di ogni intervento, d'aggiunta o d'espunzione che sia. Ecco perché, ad esempio, G. De Angelis d'Ossat (1995) si sofferma sul tema delle reintegrazioni murarie, illustrando procedimenti e modi capaci di garantire, a vista, la piena anche se garbata distinguibilità di parti antiche e di restauro; oppure Brandi (1963b) discute il metodo del tratteggio ad acquerello o "rigatino", approfondisce in termini di psicologia della forma il rapporto fra immagine e lacuna, rifiuta ogni criterio analogico e di ripristino, anche se fondato sullo specioso padroneggiamento delle "tecniche" antiche; Umberto Baldini (1978-81, vol. 1, p. 28) esclude «sia l'imitazione che la competizione» e sperimenta i criteri operativi della selezione e dell'astrazione cromatica; gli architetti ungheresi sperimentano raffinate e "astratte" integrazioni in calcestruzzo e rete metallica, come nella medievale torre Salomon a Visegrád.

Diversamente, alcuni autori invocano molteplici ragioni, da quelle d'ordine manutentivo e conservativo ad altre celebranti il recupero della manualità antica per sostenere l'idea d'un restauro "in continuità" con l'opera, senza preoccupazioni distintive, anzi con l'intento di riportarla alla sua freschezza originale. Spesso tali pratiche di ripristino sono spacciate, nella pubblicistica, come "restauri filologici", pur se della filologia e dei suoi principi costituiscono la più radicale negazione.

### 1.7

#### **Materiali e tecniche, antiche e moderne, a confronto**

Forse prima nel campo archeologico che in altri s'è andata sviluppando una critica, in gran parte giustificata, all'impiego dei materiali moderni nel restauro. Questa ha però finito con l'assumere toni aspri e preconetti che l'hanno allontanata dalla possibilità di cogliere il centro del problema; non ha infatti molto senso condannare e proscrivere i materiali in sé, tradizionali o moderni che siano, dipendendo il risultato non certo da essi, ma dall'operatore che si è assunto la responsabilità di tradurli in un più o meno valido progetto.

Il motivo per cui nei decenni passati l'impiego delle antiche tecniche s'è drasticamente ridotto nel campo del restauro sta di certo in ragioni pratiche ed economiche, di rinnovo del cantiere edilizio, di scadimento della qualità della mano d'opera e via dicendo. Si tratta di riscontri validi, ma tutti esterni alla realtà propria del restauro, che nella sua più qualificata riflessione, almeno dai tempi di Boito e con anticipazioni già in Viollet-le-Duc e Anatole de Baudot (1834-1915), s'era prefissato, a difesa dell'autenticità materiale ed estetica

dell'oggetto, l'intento di superare – proprio con l'apporto delle tecniche più attuali, traendole dal campo del nuovo e magari applicandole, dapprima, in maniera sperimentale ed inconsapevolmente brutale – i limiti invalicabili di quelle tradizionali. Significativi, a questo riguardo, l'anticipatrice guglia in ghesa della cattedrale di Rouen, progettata da Jean-Antoine Alavoine (1776-1834) ed accolta favorevolmente dalla popolazione, e altri sagaci contemporanei tentativi di rafforzamento statico esperiti da ingegneri, in latente conflitto con gli architetti, più sensibili alle tecniche tradizionali, anche a costo del rifacimento *à l'identique*. Da notare, in passato, la posizione degli archeologi, per amor d'autenticità inopinatamente più vicini ai primi che ai secondi.

In ogni modo, secondo Cordaro (1994) «questo è davvero un falso problema, connotato da un forte ideologismo, dal momento che l'unico criterio che di volta in volta può far preferire un materiale piuttosto che un altro è la verifica sperimentale, controllata scientificamente e con l'attenzione dovuta al risultato conservativo e alla determinazione delle modifiche che possono interferire con l'aspetto storicamente definito».

## 1.8 Conclusioni

Ci si domandava prima se, dietro l'apparenza, da qualche tempo a questa parte, d'un crescendo d'interesse nei confronti dei “beni culturali” si nascondesse una realtà d'effettiva cura e sollecitudine per le antiche memorie o si trattasse, invece, d'un fenomeno superficiale, senza vero radicamento nella sensibilità comune, gonfiato ad arte dai mezzi di comunicazione per la sua innegabile “correttezza” politica e, in fondo, per la capacità d'attrarre consensi.

Senza voler fare del facile catastrofismo, questa seconda ipotesi sembra più attendibile, ove la si estenda, al di là dell'interesse politico, a un'attenzione economica legata allo sfruttamento turistico, ormai di natura “industriale”, di tali beni. Essi si conservano, in sostanza, per ragioni produttive e di consumo, quali veri “giacimenti culturali” (per usare un'equivoca espressione in voga alcuni decenni or sono) da coltivare con criteri imprenditoriali (industria del “turismo culturale”, preferibilmente concentrato in poche, redditizie “città d'arte”) e, come s'è detto, anche di consenso politico, meno per profonda convinzione da parte dei singoli cittadini e della cosiddetta “società civile”. Spesso si tutela e si restaura senza capire né condividere le ragioni di fondo che inducono alla conservazione e trasmissione al futuro delle antiche testimonianze, ragioni in primo luogo culturali, educative e di memoria, molto lontane, quindi, dallo sfruttamento e dal consumo turistico, tanto che risulta corretto parlare oggi non di amore e rispetto per i beni culturali, ma d'un “ben-culturalismo” di maniera, che bene o male s'interessa del patrimonio senza avere chiaro né il perché né il come ciò debba essere fatto. La tutela di tale patrimonio, quindi, da fine primario a vantaggio di tutti si è ridotta a mezzo sussidiario d'alcune, pur importanti, attività economiche terziarie.

In effetti, se un interesse nuovo s'è sviluppato e diffuso (in Italia ma, nella sostanza, anche in Europa) in questi ultimi anni, arrivando a coinvolgere ogni strato della popolazione, esso riguarda piuttosto la difesa dell'ambiente e della natura, non tanto e non solo per l'azione, in questo campo, di un attivo associazionismo, quanto per la facile constatazione, da parte di tutti, del legame fra salvaguardia ambientale e qualità della vita di ognuno, ivi comprese le possibili ricadute sulla salute delle presenti e delle future generazioni. Si è qui parlato appositamente di "ambiente" senza citare il termine "paesaggio" perché, malauguratamente, questo è assimilato alla tematica propria dei beni culturali, con tutte le incomprensioni e distorsioni di cui s'è detto. Sussiste poi l'aggravante che il paesaggio, nonostante la sua fondamentale importanza, finisce per costituire l'anello debole della catena poiché non ne è riconosciuta la rilevanza sotto il profilo ambientale né rientra espressamente in quel "benculturalismo" di maniera prima citato, che si fa paladino delle filiere di consumo turistico-industriale concentrate, come s'è detto, nelle sole "città d'arte", trascurando insieme territorio e "patrimonio minore".

Tutela puntuale e ben calcolata dunque, ma sostanziale disinteresse, a parte qualche meritevole associazione privata e, ovviamente, l'indiscusso impegno del competente ministero, per il paesaggio, che, inoltre, paga lo scotto d'interferire sovente con le aree più appetite dalla speculazione edilizia. Nei centri storici, almeno allo stato attuale, cinquant'anni di battaglie conservazioniste hanno consolidato un atteggiamento di tutela integrale, più o meno efficace, ma, almeno, chiaro nelle sue intenzioni, tanto che la pressione speculativa ha finito con l'assumere altre forme; non più quella consueta e sbrigativa della demolizione e ricostruzione, con ampio incremento di volumi fuori e sotto terra, ma quella della "ristrutturazione" e del "recupero" legalizzati, ma non, per questo, meno distruttivi. Sul territorio, invece, l'assalto speculativo continua pesantemente e con speciale accanimento nelle zone pregiate, quindi paesisticamente rilevanti, com'è facile verificare.

In altra sede ci si domandava, dunque, se la civiltà odierna fosse ancora in grado di riservare un ruolo alla memoria, alla storia, al valore delle tradizioni, alla stessa bellezza, con il ragionevole dubbio d'una risposta negativa. Si notavano i rischi prodotti da un avvenuto capovolgimento di valori e d'orientamenti esprimendo il timore che un'autentica sollecitudine per il patrimonio, la sua conservazione e il suo restauro fosse, al di là delle apparenze, l'espressione residuale d'una cultura borghese, d'impronta propriamente otto-novecentesca, ormai prossima all'estinzione. Cultura fondata su basi filosofiche storicistiche che si sta dissolvendo a favore d'un pragmatismo economicistico che tutto consuma e che fa prevalere, anche nell'immaginario collettivo, la presunta indiscutibile positività dello "svecchiamento", del rinnovo e della riconfigurazione, magari secondo il modello nordamericano e d'alcune metropoli asiatiche socialcapitalistiche, del nostro ambiente e dei tessuti antichi, privilegiando, su tutte, le ragioni del profitto e della sua esaltazione pubblicitaria, percepite

come ragioni “vitali” a confronto di quelle, vecchie e avvizzite, della conservazione.

Concludevamo allora, ma oggi non si ha motivo di giudicare diversamente, esprimendo l'impressione che «il restauro sia ormai avviato verso la sua estinzione, dopo avere avuto una crescita e una diffusione che sembravano continue ed irreversibili» (Carbonara, 2000).

Esiste tuttavia anche un'altra possibilità, legata a un carattere basilare dell'attuale società, vale a dire la sua complessità e apertura “relativistica” a valori diversi e spesso contrapposti. Stranamente, proprio questa situazione delinea qualche prospettiva di riscatto. Scrivevamo, infatti, che nulla vieta «che possa sussistere un modesto settore residuo di persone dedicate agli studi storici e quindi alla conservazione, in una situazione, per altro, di sostanziale disinteresse pubblico e sociale al problema» (*ibid.*). È ormai improbabile, a nostro parere, che la tutela dei beni culturali possa godere in futuro dello stesso riconoscimento sociale che ha contraddistinto l'Ottocento e buona parte del secolo scorso; riconoscimento motivato da precise ragioni di cultura, d'educazione e di ricerca d'una migliore e più umana qualità di vita, legate al mantenimento d'un equilibrato rapporto fra conservazione e innovazione.

In tale più circoscritta prospettiva futura, che però avrà il pregio (e l'obbligo) di tenere alto il livello dell'approfondimento concettuale e dell'operatività, probabilmente assisteremo a una maggiore apertura d'interessi o, se si vuole, all'affermarsi di un concetto più estensivo di “bene culturale”: in architettura si svilupperà l'attenzione per le periferie e le loro specifiche valenze; per i temi del restauro della produzione “moderna”, anche di quella oggi considerata deteriorata; per l'innesto di antico e nuovo, sperimentato secondo vari modi e plurime intenzionalità; per la mescolanza e la contaminazione di forme artistiche diverse, pittoriche, scultorie e architettoniche, colte e popolari.

Solo attraverso un processo di radicale ripensamento, dunque, potrebbe intravedersi la strada d'una continuità di vita dell'idea stessa di conservazione e “valorizzazione” del patrimonio. Sul concetto di “valorizzazione” va subito detto, a scanso di equivoci, che la sua corretta interpretazione non è da intendersi, nuovamente, in termini di resa economica e d'uso, ma culturali; cioè, in primo luogo, di riconoscimento di beni nascosti o dimenticati e poi d'una loro rispettosa fruizione.

Tutto ciò considerato, si può chiudere tentando di riassumere, in un'articolata definizione, che cosa sia, per noi, il restauro (Carbonara, 2000).

S'intende per “restauro” qualsiasi intervento volto a conservare e a trasmettere al futuro, facilitandone la lettura e senza cancellarne le tracce del passaggio nel tempo, le opere d'interesse storico, artistico e ambientale; esso si fonda sul rispetto della sostanza antica e delle documentazioni autentiche costituite da tali opere, proponendosi, inoltre, come atto d'interpretazione critica non verbale ma espressa nel concreto operare. Più precisamente come ipotesi critica e proposizione sempre modificabile, senza che per essa si alteri irreversibilmente l'originale.

In questa prospettiva, si può definire come restauro dei monumenti un'attività rigorosamente scientifica, filologicamente fondata, diretta a ritrovare, conservare e mettere in evidenza, consentendone una lettura chiara e storicamente corretta, le opere che ricadono nella sua sfera d'interesse, cioè i beni architettonici e ambientali, in un campo esteso dal singolo edificio alla città, non esclusi il paesaggio e il territorio.

Nel restauro hanno parte preminente le operazioni di carattere strettamente conservativo, tese a preservare dal deperimento i materiali che concorrono alla costituzione fisica delle opere. In questo senso il restauro dei monumenti è da intendersi come disciplina che gode d'un fondamento storico-critico, sostanziato dagli apporti delle tecniche di analisi, rilevamento, rappresentazione grafica e, più propriamente, costruttive, oltre che delle scienze fisiche e chimiche. Tali apporti non dovranno mai costituire un'inerte sommatoria di competenze specialistiche, ma troveranno unità espressiva e concettuale in una soluzione anche estetica del problema, da perseguire con le modalità proprie del linguaggio architettonico.



# Conoscenza e restauro dell'architettura: ruolo e casistica delle tecnologie

di *Donatella Fiorani*

## 2.1

### **Il restauro fra acquisizione di conoscenze, elaborazione “oggettiva” e proposta creativa**

#### 2.1.1. Architettura, restauro e scienza

L'architettura si è modificata nel tempo anche attraverso la trasformazione della sua tecnica, intesa come bagaglio di solide conoscenze operative che venivano attuate tramite l'impiego di strumenti e materiali di lunga durata. Nel campo dell'arte del costruire, la pratica, veicolata dalla tradizione e trasmessa perlopiù sul campo, svolgeva un compito dominante rispetto al calcolo e alle verifiche teoriche. Naturalmente, la costruzione di alcune fabbriche, come ad esempio gli acquedotti romani, si è avvalsa delle conoscenze acquisite sul piano teorico, nella fattispecie dalla fisica greca, per il controllo del comportamento dei fluidi, e dalla geometria euclidea, per il tracciamento topografico, ma il rapporto fra il bagaglio di contenuti scientifici e l'apparato di conoscenze pratiche era nettamente sbilanciato a favore di quest'ultimo. Gli stessi dispositivi tecnologici utilizzabili erano in genere scarsi e poco differenziati, perlopiù limitati alle dotazioni impiantistiche annesse agli edifici privati e pubblici più ricchi e importanti. La storia dell'architettura scorre così, a lungo, parallelamente all'avvicinarsi delle tecniche costruttive, mentre l'ingresso della scienza sperimentale nel contesto edilizio è riconducibile al Settecento, con la maturazione della “scienza delle costruzioni” per il calcolo della resistenza strutturale da una parte e la caratterizzazione dei materiali e del loro degrado dall'altra (Cordaro, 1991); l'affermazione di una vera e propria tecnologia emancipata dalla tecnica costruttiva viene sostenuta dalla produzione industriale a partire dal XIX secolo.

Se si guarda agli sviluppi dell'architettura nella storia, dalle terme romane riscaldate dagli ipocausti agli edifici contemporanei dotati di sistemi automatici per il filtraggio della luce solare sulle facciate trasparenti, viene da pensare che nel passato era l'architettura stessa a fornire gli strumenti della tecnologia, mentre nell'epoca attuale è la tecnologia a volersi sempre più definire in termini architettonici, dando origine, fra l'altro, a una trasformazione sul piano

figurativo che manifesta in modo palese un significativo rovesciamento di ruoli.

In un arco temporale più ristretto, anche il rapporto fra restauro e tecnologia si è modificato, con il progressivo incremento del peso della componente scientifica che, da mero strumento investigativo, si è trasformata in potente fattore di condizionamento delle scelte e delle stesse metodologie operative. Come sta succedendo con l'architettura contemporanea, questa presenza rivendica spazi sempre più consistenti che non mancano di generare ricadute dirette, oltre che sul piano conservativo, anche su quello dei risultati figurativi e percettivi; a differenza, però, di quanto accade nella progettazione del nuovo, in cui la ricerca formale dialoga con la tecnologia in uno scambio reciproco di sollecitazioni e risposte, nel mondo del restauro il confronto si esercita perlopiù fra un'architettura esistente, figlia della pratica edilizia della tradizione, e una tecnologia che le è estranea e che, senza il filtro di una mediazione consapevole e controllata, rischia di diventare sempre più invadente e protagonista.

Restauro e scienze sperimentali hanno a lungo seguito un percorso parallelo, non privo di importanti punti di convergenza, dovuto alla comune radice razionale e logica elaborata e sviluppata nella fucina culturale dell'Illuminismo. La nascita del restauro modernamente inteso ha comportato l'emancipazione dell'intervento sulla preesistenza dai presupposti della libera reinterpretazione creativa e favorito il perseguimento di conoscenze "oggettive" dell'opera, nonché la messa a punto di dati certi e insindacabili su cui fondare il progetto. Un obiettivo condiviso dai diversi orientamenti del restauro architettonico, di volta in volta legati alla cultura del proprio tempo, ha riguardato infatti la definizione di un metodo di approccio corretto e la riduzione delle componenti arbitrarie e "soggettive" delle scelte. Tale orientamento ha significato soprattutto svincolare le proposte conservative in architettura dall'ambito della libera progettazione per assoggettarle alla necessità del confronto con le caratteristiche costitutive dell'esistente.

Nella temperie culturale attuale, spontaneamente predisposta a favorire gli aspetti scientifici della conoscenza e l'impiego di tecnologie innovative, nonché, viceversa, diffidente nei confronti della possibilità di dominare razionalmente non solo la dimensione metafisica della realtà, ma anche i suoi valori estetici, l'interesse per la definizione di fattori "scientifici" che guidino le indagini sull'opera e le modalità d'intervento conservativo è decisamente emerso come uno degli aspetti più adeguati a indirizzare la ricerca nel restauro.

Tale disposizione ha favorito l'ingresso di competenze diverse nel settore dei "beni culturali" e la crescita abbondante, ancorché disordinata, di nuove metodiche investigative; a queste ultime, di converso, si è affiancata la delega degli operatori tradizionali, architetti e storici dell'arte, via via confinati nel ruolo di collettori di segmenti informativi acquisiti attraverso indagini specialistiche, spesso non ben comprese, difficili da collegare fra loro.

La ricerca dell'oggettività, istanza problematica ma, per certi versi, legitti-



ma e auspicabile, ha nel frattempo rafforzato il distacco fra il restauro e gli altri ambiti d'interesse della progettazione in architettura, nella convinzione che la conoscenza "quantitativa" dell'esistente possa governare il progetto conservativo come la predeterminazione di standard di efficienza struttura il processo di produzione tecnologica o come i parametri di natura economica, sociologica ed edilizia sono in grado di orientare la pianificazione urbana e territoriale.

La volontà di rifondare il restauro come operazione soprattutto induttiva e, quindi, scientificamente controllabile ha così spostato il baricentro della ricerca conservativa, nata come vera e propria cerniera fra culture umanistica e scientifica, verso il mondo delle scienze, trascurando la componente deduttiva della progettazione e della critica. L'allontanamento fra l'approccio quantitativo, ritenuto "scientifico", e il fare progettuale, naturalmente aperto alla discrezionalità e alla libertà creativa, ha favorito inoltre un impoverimento delle scelte figurative connesse all'intervento. Quest'ultimo fattore ha a sua volta innescato, allo scorcio del Novecento, una sorta di reazione di rigetto, che rifiuta alla radice un orientamento che muove dalla centralità dell'esistente, oggetto prioritario di cura e d'interesse, e rivendica nuovamente la legittimità dell'autonoma creazione progettuale, anche a discapito dell'appagamento dei requisiti conservativi.

Si sta consumando così una fatale spaccatura fra la componente cognitiva e quella propositiva dell'intervento di restauro in architettura, con effetti spesso paradossali, come la crescita di ricerche poste a corredo d'interventi progettati senza alcun riferimento ai dati acquisiti o, ancora più spesso, la separazione fra "progetto di restauro" (della materia) e "progetto architettonico" (degli spazi, delle funzioni, delle forme ecc.).

Quest'ultima soluzione, in particolare, sembra a molti la più semplice per risolvere "salomonicamente" il dissidio fra componente oggettiva e soggettiva nel restauro: la prima, da una parte, si rivolge al dato materico e concreto, campo di applicazione di fisica, meccanica, chimica, biologia ecc.; la seconda, dall'altra, guarda al contesto figurativo e formale, regno dell'esercizio artistico e spirituale. A esse può aggiungersi, se necessaria, la progettazione "degli impianti", sempre da intendersi quale elaborazione distinta di parametri numericamente controllabili e verificabili, quindi ancora una volta riconducibile all'ambito dell'oggettivo e dell'assoluto.

Paradossalmente, quindi, la ricerca dell'oggettività partecipa oggi all'affermazione dell'arbitrio nel restauro. Arbitrio che consiste nella disarticolazione dell'unità dell'opera di valore storico-artistico in diversi campi di applicazione della ricerca e dell'intervento, tutti d'importanza paritaria e tutti definiti da statuti autonomi e piuttosto evoluti, attenti al proprio funzionamento e alla coerenza interna e rispettosi (o forse, piuttosto, indifferenti) nei confronti del funzionamento e della coerenza interna delle altre discipline.

Divaricato nelle contrapposte tendenze dell'obiettività scientifica e della libertà progettuale, indebolito nella sua componente culturale di matrice uma-

nistica che, sulla scorta degli attacchi del pensiero postmoderno, ha viceversa ricondotto le sue enunciazioni a un relativismo generale di contenuti e di orizzonti, il pensiero sul restauro oggi rischia di disgregarsi, perdendo l'organica connessione di componenti diverse che ne hanno, nel tempo, contraddistinto l'intima natura costitutiva. Viene da chiedersi se dovrà così esistere un "restauro degli architetti", tutto rivolto alla prassi dell'aggiungere, dell'integrare e del modificare; una disciplina degli storici dell'arte e dell'architettura, più propensa al conservare ma, a volte, incline – secondo contingenze specifiche e perlopiù personali – anche al riprodurre; e un "restauro degli scienziati e dei tecnologi" (e, quindi, degli ingegneri), soprattutto rivolto all'indagare e al risanare.

Lo scenario descritto vedrebbe così definitivamente confluire le stesse esigenze di "obiettività" e di controllo, soprattutto veicolate dalla componente scientifica del restauro, verso l'arbitrio e la contingenza, come del resto accade, partendo da premesse diverse, con l'adozione di un atteggiamento empirico, avulso dalla storia e da riferimenti teoretici validi.

A sostegno degli atteggiamenti descritti, di chiara rottura con il passato, vengono oggi richiamati la persistente mancanza, soprattutto negli ultimi decenni, di una condivisione degli orientamenti teoretici di fondo nel restauro, l'impossibilità di adottare un metodo univoco in un processo che non può prescindere da componenti logiche e creative, il fallimento sul piano conservativo di alcuni interventi ritenuti ottimali nel passato.

Oltre alle motivazioni di metodo, altri sono i fattori che hanno facilitato questa divaricazione: la dimensione di approccio, ad esempio, con la forte distanza fra la scala architettonica, in genere metrica, e quella, micromillesimale della caratterizzazione materica e del controllo dei parametri ambientali; la scarsa condivisione, o la mancata verifica, di obiettivi comuni; la lontananza di linguaggi e modalità di comunicazione. Tali ragioni, apparentemente convincenti, sono in realtà confutabili sotto diversi aspetti, relativi sia alla natura del lavoro svolto da parte delle "scienze esatte" nel campo conservativo sia al reale significato dell'attività di restauro. La riduzione dei contenuti e delle metodiche conservative al mero dato "quantitativo" e controllabile omette, fra l'altro, la componente della valutazione storico-artistica dell'oggetto considerato, ovvero la ragione stessa della nascita della pratica conservativa.

Se quest'ultimo aspetto deve confrontarsi con il riferimento consapevole, da parte di tutte le tipologie di operatori, alle ragioni profonde della conservazione, già ripercorse nel capitolo precedente, le tematiche relative al ruolo della scienza e delle tecniche nel restauro meritano un ulteriore approfondimento. Esse infatti nascondono, dietro il filtro degli apparati tecnologici e della fiducia aprioristica nei risultati acquisiti da processi di natura tecnico-investigativa, questioni più profonde, legate al rapporto fra conoscenza scientifica e cultura storico-architettonica o, seguendo la distinzione proposta da Karl Jaspers, relative alla differenza fra "spiegazione" di un fenomeno esterno, consentita dall'attività scientifica, e "comprensione" di una realtà, intesa come "vi-

sione dall'interno" di carattere intuitivo, a cui può più verosimilmente ricondursi quel «riconoscimento dell'opera d'arte» che Brandi (1963b) riteneva indispensabile al compimento di un vero restauro.

### 2.1.2. Scienza, tecnica, tecnologia

Non di rado nell'ambito del restauro troviamo utilizzati i termini "scienza", "tecnica" e "tecnologia" come sinonimi, soprattutto per demarcare la separazione fra contenuti "certi", verificabili e confrontabili secondo protocolli specifici, e aspetti "critici", il cui vaglio riconduce alle discipline storico-umanistiche. I tre termini, naturalmente, non sono affatto sinonimi e guardano ad approcci distinti verso la materia dell'architettura. La scienza, in particolare, si preoccupa di definire modelli di svolgimento dei fenomeni (di alterazione, degrado o, semplicemente, di comportamento nel tempo di un oggetto e del suo ambiente), la tecnica rimanda alla modalità logica di uso e applicazione di strumenti e materiali e al loro ventaglio di disponibilità, mentre la tecnologia guarda ai dispositivi e ai mezzi utili per realizzare determinate procedure operative (Galimberti, 1999).

Il legame scienza-tecnica-tecnologia, come s'è detto, non è sempre stato in architettura così univoco, come non lo è stato in altri settori dell'attività umana (ad esempio nel linguaggio, nella recitazione, nell'esercizio sportivo; Fancelli, 1994), ma proprio la crescita esponenziale della tecnologia e il suo sempre più stretto rapporto con le scienze stanno attualmente determinando, in architettura e in altri contesti, una trasformazione profonda delle attività che vi si svolgono e dei problemi a esse legati.

Il frequente uso indifferenziato dei termini "scienza", "tecnica" e "tecnologia" è incoraggiato dal loro impiego "ibrido" nel campo del restauro. Il lavoro di laboratorio dovrebbe essere rivolto, in particolare, alla comprensione di fenomeni fisici, chimici e biologici complessi attraverso formulazioni scientifiche note o da sviluppare. La sperimentazione scientifica normalmente non si conduce direttamente sull'opera; essa, nata per perseguire la ripetibilità dei fenomeni, si trova a dover fare i conti con l'unicità degli oggetti e dei loro processi di trasformazione (Fancelli, 1988). Il controllo tecnico mira a governare razionalmente procedure di applicazione di strumenti o materiali sull'esistente; la tecnologia consente di acquisire risultati specifici (conservativi, ma non solo) attraverso la produzione e l'impiego diretto di materiali e apparecchiature. Tecnica e tecnologia cercano, inoltre, risposte esclusive a problemi particolari legati al singolo manufatto.

È difficile, se non impossibile, che un restauro venga condotto con le metodiche e i tempi di un protocollo scientifico, come avviene ad esempio nella medicina e nella farmaceutica, ovvero con lo sviluppo della ricerca in laboratorio, la messa a punto di una tecnologia mirata e lo studio di un procedimento applicativo della terapia/farmaco. Quasi sempre la modalità utilizzata nel restauro è del tipo che Giorgio Torraca ha ben illustrato con il colorito

esempio della “salsa bernese”: quest’ultima, per venir riprodotta, dovrebbe essere analizzata per qualche anno dal punto di vista fisico-chimico, così da poter restituire il suo complesso sistema multifase ma, in genere, più pragmaticamente, viene trattata semplicemente con gli strumenti della tecnologia, reoperando e rielaborando direttamente le informazioni già esistenti (Torraca, 1997).

In questa “compromissione” di metodiche e procedure si delinea una significativa componente di contraddizione con la pretesa “oggettività” tecnica del restauro. In realtà, gli scienziati più esperti hanno ben chiaro che i risultati delle misurazioni (sui materiali, sui processi di degrado e sulla risposta nel tempo degli interventi) non offrono una verità assoluta; essi, pertanto, lavorano soprattutto confrontando le diverse risposte fra loro, nella consapevolezza che lo stesso procedimento tecnico può determinare risultati differenti a seconda del manufatto e della sua storia conservativa. Esiste poi un limite oggettivo *a priori* nella conduzione di indagini scientifiche su un’opera d’arte: la perfetta caratterizzazione di un materiale (i pigmenti di un affresco, le diverse essenze di un legno in un intarsio ecc.) o la conoscenza precisa dello stato sollecitazionale di una muratura possono essere conosciuti in maniera esauriente solo attraverso la realizzazione di un numero di campionature (o test) statisticamente significativo, perlopiù impossibile da realizzarsi in un’opera di valore storico-artistico (Cordaro, 1991; Lazzarini, 1999). Tale vincolo toglie all’applicazione scientifica molte certezze e apre, anche all’interno del campo tecnico, la porta alla discrezionalità.

In effetti, numerosi casi d’intervento si sono rivelati nel tempo mere applicazioni di soluzioni “alla moda” che vennero in origine spacciate come il portato di verità scientifiche assolute. Gli scontri sull’impiego dei fluosilicati sulle pietre, ad esempio, o sugli effetti del Paraloid e del bario utilizzati nel consolidamento lapideo e di intonaci o sull’opportunità di disporre materiali protettivi sulle superfici, i paradossali risultati raggiunti dall’inserimento di strutture in cemento armato nel rafforzamento murario possono da soli bastare a dimostrare quanto ampio sia, anche nell’ambito delle scelte tecniche e del controllo scientifico, il margine lasciato all’interpretazione, alla valutazione discrezionale e ai singoli convincimenti del tecnico e dello scienziato (Torraca, 1997).

Nonostante questi riscontri, un’opinione diffusa vuole che la mancata convergenza unitaria del pensiero attuale sul restauro faccia automaticamente perdere di valore le diverse modalità d’intervenire sull’esistente, a meno che queste non si sorreggano, a loro volta, sull’aura di oggettività incontrovertibile di cui godono, al di fuori del campo della conservazione, le attività di natura scientifica, tecnica e tecnologica.

Il passaggio, tutt’altro che scontato e “neutrale”, come vedremo, è però confutabile non solo mediante i già ricordati esempi concreti desunti dai cantieri di restauro, ma pure richiamando gli imbarazzi e i dubbi che, anche al di fuori della conservazione, per esempio in campo investigativo e giuridico, sono stati sollevati in merito all’applicazione ciecamente meccanica delle pro-

cedure analitiche; e, soprattutto, guardando allo sforzo di approfondimento compiuto da parte della stessa filosofia della scienza, che ha ben posto in evidenza i limiti del valore di oggettività insito nell'operato scientifico.

Questa disamina filosofica ha messo in luce le aporie dei diversi sistemi d'interpretazione della realtà e la possibilità di prendere in considerazione teorie non verificabili sperimentalmente ma ugualmente feconde dal punto di vista della produzione di risultati e dello sviluppo di ulteriori idee (Giorello, 1994; Feyerabend, 1996); essa ha proposto una visione della scienza dinamica e non assoluta che accompagna oggi molta ricerca degli scienziati stessi, in una prospettiva assai lontana dall'attribuzione di inattaccabile statuto di certezze proposta da alcuni nel versante del restauro. Una visione della scienza che non dimentica, ma anzi contempla la sua propria dimensione storica (Giorello, 1994), nel campo del restauro – e a volte della stessa interpretazione dell'opera – viene raramente considerata, in nome di un'artificiosa contrapposizione fra rigore del dato quantitativo e incerto arbitrio del riscontro storico-critico.

L'insensatezza e i rischi connessi a questo atteggiamento sono grandi e spesso riconducono alla dogmatica accettazione delle risposte fornite dalla scienza senza che sia garantita la verifica dei risultati conseguiti sulla base delle conoscenze e delle valutazioni derivanti da altri percorsi conoscitivi: una datazione con sistemi di natura fisico-chimica, come il “carbonio 14”, condotta su reperti che, per tecniche di realizzazione, caratteristiche figurative, riferimenti culturali, rimandano a epoche differenti da quelle stimate in laboratorio dovrebbe spingere a una più approfondita e allargata disamina o, perlomeno, a una provvisoria sospensione delle ipotesi cronologiche; a volte, invece, questa viene accolta come definitiva acquisizione di certezze, sacrificando il portato di bagagli conoscitivi seri e a lungo sedimentati, anche se non “misurabili”. Allo stesso modo, il soddisfacimento di requisiti conservativi di un materiale dal punto di vista fisico-chimico non è sufficiente, di per sé, a garantire l'efficacia – ad esempio in termini di figuratività o accessibilità – del trattamento, mentre sempre di più si tende ad assumere il dato materico come esclusivo parametro di riferimento.

La ricerca scientifica nella conservazione segue oggi percorsi diversi, che sono stati ricondotti a tre filoni principali: l'approfondimento di problematiche scientifiche indifferenti agli obiettivi concreti della conservazione (all'interno delle cosiddette “endoscienze”); le sperimentazioni direttamente legate al comportamento di materiali e tecniche delle opere d'arte; lo studio e la divulgazione delle problematiche strettamente inerenti al tema della conservazione. Quest'ultimo orientamento non cerca di ricondurre la complessità dell'esistente alla valutazione matematico-statistica dei dati a esso relativi, né guarda alla scomposizione di fenomeni semplici e isolabili, come viceversa procede l'endoscienza; esso non si preoccupa di stabilire “la verità” di un fenomeno, ma piuttosto cerca di trovare le soluzioni necessarie ai singoli problemi (Muñoz Viñas, 2005). Tale approccio appare più vicino agli interessi operativi im-

mediati del restauro, per questo ha offerto i risultati maggiori; esso si lega in stretta misura ai vincoli e all'apporto della tecnologia.

Anche lo sviluppo sempre più forte della tecnologia ha però creato diversi problemi: esso ha determinato, per la prima volta nella storia, il superamento del campo tradizionale della propria applicazione e lo sconfinamento delle sue procedure e delle sue ricadute al di là dell'orizzonte immaginativo consueto dell'uomo, per aprire prospettive esistenziali ancora non avvertite e valutate nella loro effettiva portata. Anche in questo caso, pertanto, «assistiamo all'irrazionalità che scaturisce dalla perfetta razionalità (strumentale) dell'organizzazione tecnica che cresce su se stessa al di fuori di qualsiasi orizzonte di senso» (Galimberti, 1999, p. 47). Il problema è stato poco considerato nell'ambito dell'arte e del suo restauro, ma non manca di produrre anche qui i suoi effetti, sia pure nell'accumulazione di dati e ricerche, il cui scopo non viene immediatamente comunicato né percepito, o nella baldanzosa rivendicazione di un ruolo trainante, se non del tutto sostitutivo, esercitato da parte di scienziati, tecnici e tecnologi.

La consapevolezza dei limiti della scienza e della tecnologia proprio dal punto di vista dell'oggettività e del valore assoluto del loro apporto nella conservazione, la chiara identificazione degli ambiti e dei livelli di esercizio delle discipline scientifiche, la convinzione della necessità imprescindibile di un'interfaccia teorica e operativa con altre discipline e competenze costituiscono i presupposti indispensabili per far sì che le scienze della conservazione possano svolgere il loro compito in maniera utile ed efficace.

### 2.1.3. Fini e mezzi nella scienza della conservazione

Una volta rinunciato al perseguimento di risultati oggettivi e inconfutabili nel restauro, la scienza e la tecnologia si trovano di fronte alla necessità di acquisire "dall'esterno" i fini del proprio operato. E, una volta discussi, chiariti e accettati questi fini, esse dovrebbero procedere caso per caso a una programmatica valutazione del rapporto fra questi e i mezzi da mettere in campo.

Molto spesso questa semplice valutazione preventiva non accade o, almeno, non viene palesemente esplicitata nei report e nelle stesse procedure investigative che coinvolgono l'opera d'arte o l'edificio di valore storico-artistico, sì da incoraggiare malintesi ed equivoci sul senso di molte indagini che vengono condotte sui monumenti, ma anche sul ruolo stesso del lavoro scientifico nel restauro.

Soprattutto negli ultimi decenni, l'archeometria, scienza nata negli anni settanta del Novecento per studiare come e quando è stata realizzata un'opera d'arte, ha conosciuto un'inarrestabile ascesa e alcuni interessanti successi. Sull'onda dell'entusiasmo determinato dallo sviluppo delle ricerche, molti studiosi hanno dichiarato (o hanno operato nell'implicito convincimento) che il loro intento fosse quello di «studiare a fini di maggiore conoscenza il Bene culturale e, in caso di deterioramento dovuto agli effetti del tempo o a cause antropi-

che, eseguire “la diagnosi” e suggerire le “terapie” idonee al recupero e al restauro del Bene indagato» (Martini, Castellano, Sibilia, 2007, *Prefazione* all'edizione del 2002, p. 1). In questo tipo di considerazioni, chiaramente, si confonde il “bene” con la sua materia costituente, si prescinde dal ruolo primario che la conoscenza storico-artistica e la lettura critica dell'opera rivestono nelle scelte di restauro e si riduce l'operazione conservativa alla semplice applicazione di una tecnologia che si vorrebbe il più possibile riproducibile ed estensibile a casi diversi.

Questa mancanza di verifica degli scopi effettivi dell'operazione tecnica messa in campo nell'investigazione o anche nell'intervento, del resto, riflette in qualche modo i limiti intrinseci della tecnica, la quale, di per sé «non tende a uno scopo, non promuove un senso, non apre scenari di salvezza, non redime, non svela la verità, la tecnica funziona» (Galimberti, 1999, p. 33); tutta assorbita nella verifica interna delle sue potenzialità e nel superamento dei propri possibili errori, la tecnica sostituisce alla valutazione dei propri fini l'analisi degli effetti del suo procedimento, pertanto «proprio gli obiettivi finali, gli scopi, che nell'era pretecnologica regolavano le azioni degli uomini e ad esse conferivano “senso” nell'età della tecnica appaiono assolutamente “insensati”» (ivi, p. 41).

Gli effetti di questa scarsa attenzione per la messa a fuoco delle ragioni profonde del lavoro scientifico nel campo del restauro sono più che mai evidenti in molte indagini esposte in convegni e pubblicate su riviste specialistiche e fanno parte dell'aneddotica del settore: insigni studiosi che dibattono sulla modalità più corretta di rimuovere alcune macchie da un tessuto antico ignorando completamente la questione della natura storico-devozionale del reperto (e, probabilmente, dei suoi depositi), relativo a una reliquia religiosa; grandi quantità di indagini sofisticate per la caratterizzazione di malte appartenenti a un edificio storico, campionate senza una chiara e preventiva cognizione delle trasformazioni subite nel tempo dalla fabbrica, in grado però di dimostrare, una volta per tutte, anche tramite un invidiabile apparato di dati, foto ed elaborazioni grafiche, che il materiale è costituito da calce e sabbia proveniente da cave limitrofe miscelate in proporzioni variabili. E gli esempi potrebbero continuare a lungo, investendo le responsabilità – o l'ingenuità – di alcuni “scienziati”, ma anche la superficialità – o la malafede – di diversi operatori (restauratori, storici dell'arte e, soprattutto, architetti) che hanno promosso indagini senza conoscere realmente obiettivi e limiti delle tecnologie prescelte e senza rapportare questi con gli obiettivi e le decisioni da compiersi nel progetto di restauro.

Il fatto che molte tecnologie e tecniche oggi in uso nel restauro non siano nate per intenti conservativi, ma siano state mutate da altri contesti, come quello della medicina, del controllo di qualità in ambito industriale, dell'indagine geologica o biologica ecc., rende ancora più delicata la verifica dei fini e della loro congruità con i mezzi. La “calibratura” fra mezzi e fini, infatti, procede senza eccessivi problemi quando uno strumento si definisce come «il cor-

po di un'intenzione» (ivi, p. 101), quando nasce per adeguarsi al raggiungimento di un obiettivo definito; diverso è il caso in cui lo strumento trascende l'immediatezza di una finalità determinata, o perché lascia intravedere potenzialità più ampie di quelle precedentemente immaginate o perché viene adattato a contesti nuovi, come accade appunto nella conservazione.

Il problema dei fini dell'operato di scienza e tecnologia nel restauro e quello del rapporto tra fini individuati e mezzi disponibili costituiscono pertanto un nodo centrale, la cui soluzione richiede un sforzo preliminare di natura teoretica e un impegno coordinato di tipo etico, essendo quest'ultimo l'ambito naturalmente preposto alla valutazione del rapporto tra fini e mezzi in ogni attività dell'uomo.

#### 2.1.4. Orientamenti del restauro e scelte tecnologiche

A prima vista può sembrare che il problema della predeterminazione dei fini di scienza e tecnologia riguardi soltanto l'aspetto direttamente operativo e possa essere considerato relativamente alla diagnostica solo in subordine. Avere ben chiaro lo scopo per cui s'interviene può, in altri termini, essere ritenuto immediatamente più utile del conoscere perché si sta indagando un determinato oggetto: l'accrescimento conoscitivo, di per sé, viene comunque percepito come un dato positivo, a prescindere dalla ricaduta che l'acquisizione di conoscenze produrrà. In realtà vi sono numerose ragioni per ritenere che la consapevolezza del fine, nella diagnostica, è importante quanto nell'operatività diretta: poiché anche la diagnostica paga dei prezzi, sia in termini conservativi che economici, perché è noto che nelle indagini si trova (o non si trova) perlomeno quello che si sta cercando, perché le stesse procedure diagnostiche dovrebbero essere pianificate e condotte in maniera coerente con le ragioni che promuovono l'intervento conservativo, pena l'annullamento dei loro stessi risultati.

L'approdo della riflessione sul restauro architettonico ai lidi delle scienze e, in generale, dell'approccio "tecnologico" (ritenuto "oggettivo" e scientificamente fondato) risale all'Ottocento: già Camillo Boito, infatti, nel delineare il suo pensiero che guardava, da una parte, l'esigenza di fondare la disciplina del restauro su basi solide e verificabili e, dall'altra, all'idea di una difesa dei monumenti prevalentemente incentrata sulla salvaguardia della loro autenticità materiale prende in considerazione la possibilità di utilizzare la chimica per allungare la vita degli edifici (Boito, 1893), mentre pressappoco nello stesso periodo si rafforza la sperimentazione soprattutto relativa al consolidamento dei materiali (Dezzi Bardeschi, 2005).

Il rapporto fra restauro e tecnologie rimane a lungo di carattere strumentale: le Carte del restauro richiamano le possibilità offerte dalle nuove tecniche già a partire dal 1931 (*Carta del restauro italiana*, art. 9 e *Carta d'Atene*, art. 5); l'ingegnere restauratore Piero Sanpaolesi sperimenta negli anni trenta del Novecento, in uno dei primi laboratori creati per lo studio della conservazione



dei materiali, nuove tecniche di consolidamento di natura chimico-fisica; l'Istituto Centrale del Restauro nasce nel 1939 già dotato di alcuni laboratori scientifici, affinché si aggiungano all'apporto dell'esame critico e storico dell'opera e della sua documentazione nuove analisi tecniche, già al tempo messe a punto dalla ricerca scientifica (*Convegno dei Soprintendenti*, 1938), anche se nei primi consigli tecnici mancano proprio i rappresentanti del mondo scientifico, all'epoca particolarmente rari (Bon Valsassina, 2006). Dopo le prime pionieristiche attività nel campo della caratterizzazione dei materiali e dello studio delle opere d'arte (Santamaria, Mlynharska, Morresi, 2006), i consistenti progressi metodologici e i risultati conseguiti soprattutto a partire dallo scorcio degli anni sessanta finiranno con il modificare la percezione del ruolo delle scienze nel restauro. Negli anni ottanta del Novecento si giunge così alla formulazione di principi che incardinano il significato stesso dell'operazione conservativa sul «dato preliminare» dello «studio, perfettamente definito sul piano quantitativo», dell'edificio sul quale si interviene. In definitiva, «la conoscenza della realtà strutturale e tecnologica, della consistenza fisica, dell'evoluzione nel tempo del suo assetto [diventa] atto preliminare del tutto necessario per ogni progetto che voglia essere compatibile con l'esistente» (Bellini, 1986, p. 52).

Al di là dell'apporto innovativo e attualizzante che l'interesse per le crescenti possibilità della tecnologia in campo conservativo andava introducendo, appare significativo il fatto che tale fiduciosa aspettativa nella possibilità di controllare la conservazione dell'opera, attraverso la gestione degli aspetti quantificabili dell'esistente, si accompagni sin dall'inizio all'idea che il processo strettamente conservativo e quello più squisitamente progettuale (relativo all'innovazione, all'integrazione, all'adeguamento architettonico) si debbano distinguere: l'autonoma articolazione interna di ognuno di questi due processi lascerebbe, così, ampi margini di libertà all'apporto creativo, unicamente vincolato alla condizione di non risultare “distruttivo” nei confronti della preesistenza.

La proposta scissione fra elaborazione dell'intervento di restauro in una componente tecnico-scientifica, ritenuta oggettiva e controllabile, e una “creativa” e figurativa, ha trovato contrapposizioni e obiezioni sul piano speculativo di cui si è già dato conto (Carbonara, 1990a, 1997), così come si è già discusso degli effettivi limiti e del carattere presunto dell'oggettività scientifica. L'apertura del campo del restauro a competenze nuove e specialistiche, che questa visione concettuale ha sicuramente favorito, si è rivelata per molti versi positiva e feconda; forse, però, un atteggiamento più critico nei confronti del ruolo della scienza e della tecnologia e più attento alla necessità di garantire il controllo unitario e organico, sul piano teorico e progettuale, di tutte le operazioni da compiersi sulla fabbrica storica avrebbe potuto evitare le derive autoreferenziali e le cadute di senso di cui alcuni interventi costituiscono testimonianze palesi.

Il fronte contrapposto del ripristino ha fatto invece del rifiuto dell'apporto scientifico uno dei pilastri dei propri convincimenti: esso giudica infatti inutile e fuorviante, soprattutto in campo architettonico, affidare all'esercizio di pratiche di natura chimico-fisica il controllo e la gestione del deterioramento. Troppo grandi sono i problemi da risolvere, per la particolare condizione di vulnerabilità di fabbriche soggette all'uso ed esposte agli agenti atmosferici; troppo gravi le interferenze che il deperimento materiale, sia pur controllato e rallentato, produce sul testo artistico; troppo artefatta, al limite del feticismo, l'attenzione per l'autenticità dell'opera intesa come garanzia di persistenza del suo essere materiale. In una visione premoderna dell'architettura, l'unica scienza che si ritiene opportuno rispettare ritorna a essere così quella dell'arte del costruire, con le sue regole empiriche, i suoi principi regolatori interni, l'irriducibile diffidenza verso il non tradizionale (Marconi, 1999).

Nel restauro, l'atteggiamento di delega e quello di rifiuto rispetto al ruolo delle scienze e delle tecniche crea uno sbilanciamento in due direzioni contrapposte del rapporto fra giudizio storico-critico e attività scientifico-tecnica. Proprio tale sbilanciamento è stato del resto contrastato da una visione critica del restauro che, pur riservando alla scienza un ragionevole credito di fiducia, non si è stancata di ribadire la persistente necessità di non subordinare le categorie tradizionali dell'architettura, qualità spaziale, logica figurativa, organicità e coerenza di preesistenza, trasformazioni e nuovi inserimenti, a vagli esterni e sostanzialmente estranei, anche se dotati dell'aura di "scientificità" (Carbonara, 1997). Una tale visione "laica", tutta legata alla comprensione della natura intrinseca dell'opera d'arte, del restauro come prodotto di un'ideazione intellettuale, di un'applicazione tecnica coerente e di una vita materiale prolungata nel tempo, rivendica la complessità del problema conservativo, mai del tutto riducibile a un qualsiasi tipo di modellizzazione.

Riportare l'attenzione sulla natura complessa dell'opera d'arte significa ricondurre la riflessione sul restauro alla comprensione dell'opera, alla valutazione delle sue necessità conservative, al vaglio delle possibilità operative, rifiutando la tentazione delle prese di posizione ideologiche precostituite. Sono state anche in parte queste ultime, infatti, a far maturare negli specialisti scientifici, legati a una visione disciplinare coerentemente fondata su principi condivisi, una certa diffidenza sulla possibilità di gestire i problemi conservativi soprattutto sul piano architettonico; essi hanno così guardato all'interno delle proprie singole discipline per trovarvi i criteri che consentissero loro di muoversi autonomamente, a prescindere dal contesto, ritenuto arbitrario, mutevole e soggettivo, della comprensione della fabbrica.

Costituisce, questa, un'ulteriore ragione per guardare alla ricomposizione dei fronti del restauro come un obiettivo indispensabile perché i progettisti riprendano in mano, in maniera consapevole ed efficace, nonché, soprattutto, riconosciuta, la strada del coordinamento ideativo ed esecutivo del restauro architettonico.

## 2.1.5. Interdisciplinarità e multidisciplinarità

La necessità d'istituire un dialogo e di consentire la convergenza di risposte e risultati da parte delle attività rivolte alla tutela dei beni culturali, l'incremento numerico delle figure professionali che si muovono nel settore della conservazione (ne sono state stimate circa un centinaio; *Conservazione del patrimonio culturale*, 1992), il rischio di "protagonismo" di alcune componenti disciplinari, particolarmente quella scientifica, troppo spesso inopportuno mosso da un chiaro "coinvolgimento emotivo" verso piani valutativi a essa non pertinenti (Torraca, 1982b) o, viceversa, l'emarginazione proprio della scienza in un ruolo eccessivamente strumentale nel campo del restauro (Urbani, 1982) hanno portato ad affermare con insistenza la necessità di un approccio multidisciplinare e interdisciplinare ai problemi conservativi.

Anche in questo caso, è necessario un chiarimento lessicale ed è utile richiamare le conclusioni raggiunte dallo studioso dell'apprendimento Jean Piaget; egli distingue la multidisciplinarità, intesa quale apporto convergente di più discipline attorno a un problema senza che tali applicazioni comportino un mutamento o un arricchimento al loro interno, dalla interdisciplinarità, grazie alla quale risulta a volte possibile utilizzare tecniche desunte da un campo applicativo per risolvere problemi pertinenti ad altri ambiti disciplinari (Piaget, 1972). Tralasciamo, perché inessenziali nel discorso sul restauro, la pluridisciplinarità, che determinerebbe l'apporto di discipline diverse su un medesimo problema senza il conseguimento di arricchimenti culturali determinanti, e la transdisciplinarità, che guarderebbe alla soluzione di problemi attraverso una metodica di ricerca programmaticamente priva di confini disciplinari.

L'approccio interdisciplinare, in questi ultimi anni, ha goduto di un particolare interesse, soprattutto per la ricaduta all'interno della storia dell'architettura dei successi conseguiti nell'ambito della ricerca archeologica. Numerosi e interessanti sono stati ad esempio, in termini di dati oggettivi di conoscenza, ma anche di formulazione di nuove proposte metodologiche, i risultati prodotti dalle ricerche di Tiziano Mannoni, geologo, ma attivo nella facoltà di Architettura di Genova, in studi riguardanti specialmente le tecniche costruttive dell'edilizia storica, o della scuola senese, che, con l'archeologo Riccardo Francovich e l'architetto Riccardo Parenti, ha contribuito, anche grazie all'introduzione sistematica delle strumentazioni tecnologiche più sofisticate nella ricerca, all'arricchimento conoscitivo sugli esiti di scavo e sull'analisi degli elevati. Tali risultati non hanno lasciato indifferenti gli stessi architetti restauratori, che a seconda dei casi hanno creato nuove alleanze o contrapposizioni più o meno "lucide" e coerenti nelle conseguenze operative. La conoscenza materiale dell'architettura storica è stata, infatti, ugualmente considerata quale presupposto indispensabile per una riproposizione integrale dei dati acquisiti o come premessa per la loro corretta interpretazione e per il totale mantenimen-

to, sollevando dubbi ed evidenti problemi di assegnazione di significato nei confronti delle stesse attività di ricerca condotte.

Sono proprio queste contraddizioni relative all'“uscita” conservativa di certe acquisizioni a far riflettere sulla circostanza che il restauro non può di per sé costituirsi quale materia interdisciplinare, almeno nell'accezione datane da Piaget: acquisizioni e tecniche pertinenti a discipline diverse possono portare a un pur importantissimo accrescimento del bagaglio conoscitivo, ma non sono in grado di determinare univocamente arricchimenti o mutazioni di senso ai principi e all'operatività del restauro. E questo non perché, come vogliono i progettisti del nuovo e alcuni esponenti della cosiddetta “pura conservazione”, l'attività restaurativa, in architettura, si configura sul piano “altro” di una rinnovata creatività espressiva, ma in quanto essa si pone di per sé quale orizzonte culturale complessivo al cui interno possono collocarsi le diverse discipline nelle quali è stato ritagliato il sapere umano.

Appare pertanto più corretto parlare di approccio multidisciplinare alle scelte di restauro, in grado di garantire la necessaria autonomia di metodi e di risultati (ma anche l'eventuale connessione interdisciplinare delle attività investigative che lo richiedano) e di ricondurre il bilancio finale non a un'empirica e puntuale sommatoria dei singoli risultati, ma piuttosto alla sintesi critica delle conoscenze acquisite.

Difendere l'importanza del lavoro critico nel restauro – espresso nel bilancio conoscitivo finale e nella definizione delle priorità negli obiettivi d'intervento – significa ribadire l'intima natura culturale e, soprattutto, la legittimazione dell'esistenza in vita; solo così si può evitare quella frammentazione degli angoli visuali che ha determinato la morte di altre discipline nobili come, ad esempio, la geografia o l'antropologia, risucchiate nel gorgo dei loro stessi sottosistemi (De Blasi, 2007), con l'aggravante che, in questo caso, a morire non sarà soltanto una modalità di lettura della realtà da parte dell'uomo, ma la motivazione stessa che lo spinge a difendere le tracce della sua storia.

Il mancato chiarimento e la forse malevola confusione fra interdisciplinarietà e multidisciplinarietà hanno determinato problemi seri sul piano operativo, accentuando la tendenza alla perdita delle identità professionali, il mescolamento di competenze e specificità diverse, come fra lo storico dell'arte e il restauratore, fra quest'ultimo e lo scienziato, fra l'architetto e il restauratore e così via, favorendo sempre più una generale predominanza dell'operatore sul progettista.

Danni ancora maggiori si sono prodotti, in campo formativo, con la creazione di alcune lauree “interdisciplinari” nel campo della conservazione dei beni culturali che non fanno che riprodurre e assommare, in una scala semplificata, saperi distinti, non consentendo la piena maturazione e autonomia delle singole competenze e, paradossalmente, trascurando di chiarire la ragione profonda che muove e indirizza l'agire conservativo.

Il successo, non sufficientemente vagliato, di una visione interdisciplinare del restauro ha ulteriormente indebolito l'applicazione di un vero approccio

multidisciplinare, peraltro già ampiamente ostacolato da gelosie professionali, difficoltà gestionali oggettive, apparati normativi rigidi e poco efficaci. Se da una parte, infatti, la ricerca, soprattutto quella accademica, privilegia l'impostazione unidisciplinare per facilitare il controllo dei risultati e per l'obiettivo difficoltà di operare direttamente sui medesimi argomenti-oggetti, dall'altra l'attività diretta che, principalmente in architettura, si compie al di fuori e autonomamente rispetto alla ricerca non ha altri mezzi per procedere in maniera multidisciplinare se non quelli offerti dalla normativa.

In tal senso, malgrado gli sforzi compiuti in questa direzione dalla legge 11 febbraio 1994, n. 109 (legge quadro in materia di lavori pubblici) e, soprattutto, dal suo regolamento attuativo (D.P.R. 21 dicembre 1994, n. 554), l'effettivo ricorso a un approccio multidisciplinare nella diagnosi e nella formulazione degli interventi rimane confinato all'attività di alcuni istituti pubblici, come l'Istituto Superiore per la Conservazione e il Restauro (ex ICR) o l'Opificio delle Pietre Dure, o al restauro di alcuni monumenti di particolare prestigio. Non vengono infatti investite sufficienti risorse sull'indagine e sul monitoraggio degli edifici storici, i meccanismi di finanziamento nei lavori pubblici sacrificano spesso non solo l'aspetto diagnostico, ma i tempi stessi della progettazione, l'attenzione politica e sociale nei confronti del patrimonio storico rimane confinata ai meri fattori della spettacolarizzazione e della valorizzazione e trascurano completamente il controllo di qualità e la corretta procedura valutativa-operativa alla base dell'attività di conservazione.

## 2.2

### Principi teoretici e operatività tecnica

#### 2.2.1. Autenticità, minimo intervento, compatibilità, reversibilità

La progressiva maturazione culturale del concetto di "opera d'arte" e del significato del restauro ha portato, nel tempo, alla definizione di alcuni principi di natura teoretica che presentano ricadute dirette e immediate sul piano operativo; attorno a questi stessi principi, molti dei quali emersi già fra Sei e Settecento ma giunti a una definitiva codificazione tra fine Ottocento e inizio Novecento (Carbonara, 1990a), si è prevalentemente condensato il *corpus* di pratiche e interventi condotti nell'arco del XX secolo.

Alcuni di questi principi sono stati di recente messi in discussione e, non a caso, molte delle critiche sono nate o hanno trovato radicamento proprio nell'alveo delle discipline scientifiche, dove si misuravano e si traducevano in concreto direttive e concetti che prendevano le mosse da considerazioni più ampie di natura culturale, sbrigativamente liquidate con l'accusa di "idealismo". Il fenomeno ha riguardato in particolare i concetti di "autenticità", "minimo intervento", "compatibilità" e "reversibilità", concetti tutti elaborati allo scopo di privilegiare la conservazione della materia originaria dell'opera d'arte, di ridurre l'impatto modificante legato a ogni intervento di restauro, di assicu-

rare la permanenza dell'esistente con presidi di natura figurativa, materica e strutturale non dannosi e, infine, di consentire la totale eliminazione delle integrazioni e dei nuovi inserimenti, se riconosciuti inadeguati e inopportuni. Dietro l'affermazione di questi principi è una concezione dell'oggetto di valore storico-artistico che fonda la sua identità e unicità nella propria consistenza materiale e che chiede, per essere trasmesso al futuro, un'attività conservativa controllata e consapevole. Quest'ultima, per dimostrarsi tale, deve essere sviluppata secondo binari operativi unitari e coerenti con il significato culturale complessivo che investe l'opera d'arte e la sua ricezione nel tempo attuale.

Risulta evidente che la difesa dell'autenticità materiale costituisce, in tal modo, il motore della maggior parte delle attività di restauro, di natura tecnico-scientifica e architettonica (per queste ultime si aggiungono i requisiti di distinguibilità e autenticità espressiva, meno direttamente legati alla ricerca materiale). Ed è pertanto naturale che il primo attacco al cuore dell'indirizzo conservativo sia avvenuto proprio nei termini di una ridiscussione del significato da assegnarsi al concetto di "autenticità", secondo alcuni da spostare dal piano materiale a quello ideale; tale contestazione, significativamente, non è stata condivisa da parte degli scienziati, in quanto il concetto di "autenticità materiale" è l'unico che, oltre ad aver reso indispensabile la loro presenza in campo conservativo, non contrasta con la nozione di "autenticità" presente all'interno delle discipline scientifiche (sempre legate a dati quantitativi e verificabili nel concreto).

Diversamente è andata con le altre categorie, pur con opportune differenze. Il minimo intervento, dopo un iniziale successo dell'idea della "sovraprogettazione", rimane nella pratica un dettame poco rassicurante per diversi operatori, per ragioni psicologiche e di scarsa conoscenza, ma è stato metabolizzato dalla maggior parte dei ricercatori (Torraca, 1982b), così da spingere all'accorta minimizzazione dell'operato anche nei confronti dell'emendamento di errori passati, purché non nocivi e stabili (Torraca, 1997; Laurenzi Tabasso, 2004a). Quando, però, il concetto viene vagliato nell'ottica interna della singola logica disciplinare, ecco che questo si "sgretola" in una marea di *distinguo*, al punto da far giungere alla conclusione che «al criterio del minimo intervento deve subentrare [...] quello della correttezza tecnico-scientifica e del buon operare» (Laurenzi Tabasso, 2004a, p. 14), o di far sorgere il dubbio di una pretesa utopica insita a monte del principio stesso (Fassina, 2004).

Il perseguimento della compatibilità dell'intervento, problema apparentemente più semplice, si confronta comunque con la presenza, nel restauro, di modelli diversi di compatibilità, ognuno dei quali relativo a sistemi di riferimento autonomi, legati per esempio agli aspetti funzionali o estetici, ai dati materici, alle questioni strutturali e così via (Fiorani, 2003a). La complessità che ne deriva richiede un processo di gestione controllata (Della Torre, 2003) su cui tutti concordano ma, ancora una volta, il problema della definizione puntuale del termine costringe a una delimitazione sempre più marcata delle

condizioni e delle caratteristiche che, sul piano materiale, forniscono la garanzia oggettiva di questo requisito (Matteini, 2000).

Ma se i principi del minimo intervento e della compatibilità, pur creando un po' d'imbarazzo nella loro giusta determinazione "scientifica", sono stati di fatto acquisiti dalle diverse discipline, comprese quelle più strettamente sperimentali, il criterio della reversibilità è stato di recente oggetto di una vera e propria contestazione radicale: sulla base dell'impossibilità di raggiungere la reversibilità "perfetta" dal punto di vista tecnico-scientifico, soprattutto chimico e strutturale, il perseguimento della reversibilità come criterio ispiratore dell'intervento di restauro è stato da più parti dichiarato inefficace e – di conseguenza – inutile (Oddy, Carroll, 1999; Della Torre, 2002). Al di là delle pur argomentate ragioni che hanno spinto tecnologi e scienziati, ma anche architetti e storici dell'arte, a chiedere l'espunzione del termine "reversibilità" dal restauro (inapplicabilità concreta del principio; ambiguità lessicale del termine, meglio sostituito, per le sue intrinseche finalità, da parole quali "ritrattabilità" o "riparabilità"; pericolosità dell'appiglio che il concetto di "reversibilità" offrirebbe al nascondere incapacità e irresponsabilità professionali), è ancora una volta possibile osservare come la rigida mutuazione di un principio, attinto dalla sfera del ragionamento sull'opera di valore storico-artistico e meccanicamente riproposto all'interno delle singole discipline, in particolare quelle di natura tecnico-scientifica, conduca a esiti fuorvianti. Sottratto al campo del ragionamento critico e affidato alle categorie della sperimentazione, il criterio viene "messo alla prova" e poi respinto, accompagnato da controproposte che sostituiscono al valore orientativo e sintetico – onnicomprensivo – del concetto la puntualizzazione analitica, separatrice e distintiva, delle singole accidentalità fenomenologiche (Fiorani, 2002).

Così facendo, però, si sottraggono alla stessa ricerca, non solo scientifico-matematica, i motivi ispiratori di base, quelli che uniscono i vari apporti disciplinari verso un unico obiettivo comune. Il restauro diventa così il terreno di applicazione di apporti diversi e autoreferenziali, in cui la somma dei singoli risultati valutati positivamente dall'interno dello specifico osservatorio disciplinare può non necessariamente coincidere con l'efficacia finale dell'intervento.

### 2.2.2. La questione etica

Restia a confrontarsi con il fine ultimo delle sue attività, se non attraverso le categorie empiriche della valutazione dei propri successi e insuccessi operativi, la scienza della conservazione ha trovato un più gratificante terreno di riflessione in campo etico, del resto più congeniale alla natura tecnica, fattiva, dei suoi interessi. Sono infatti connotati da un orientamento pragmatico e attento ai contenuti deontologici della propria attività i primi apporti di scienziati della conservazione e restauratori, come quello, più celebre, di Hanna Jedrzejewska (1976). A essi va dato il merito di aver declinato obiettivi e limiti dell'operato tecnico, di aver fornito un modello, anche se innanzitutto rivolto al com-

portamento e solo indirettamente legato al significato ultimo delle procedure conservative.

Ma se ancora negli scritti della Jedrzejewska era possibile riscontrare che «la specifica etica del restauro consiste in un discorso ermeneutico in atto intorno ad un altro discorso – cioè il monumento» (Fancelli, 1993, p. 98), negli ultimi decenni i richiami etici nel restauro si basano perlopiù sulla corretta applicazione delle procedure tecniche – in altri termini, sul riferimento alle modalità del fare – piuttosto che sulle priorità delle istanze che muovono gli interventi, ovvero sulla natura dell'agire, della prassi. Tale orientamento, del resto, risulta coerente con la tendenza contemporanea a una «omologazione dell'agire sul fare, e quindi dell'etica sulla tecnica» (Galimberti, 1999, p. 459).

Assecondare questa tendenza significa per il restauro sottrarre significato al restauro, come capirono fin dall'inizio alcuni pensatori, soprattutto gli inglesi John Ruskin e Augustus Welby Pugin, che unirono nella loro lotta il rifiuto dell'industrializzazione – quindi dell'egemonia della tecnica – e la difesa dei valori dell'architettura storica e dell'ambiente naturale.

Oggi la discussione relativa al significato della tecnica e alla possibilità di definirne limiti e obiettivi non coinvolge particolarmente, almeno in maniera diffusa, le questioni conservative, ma domina comunque il confronto culturale nel campo delle biotecnologie e del futuro del nostro pianeta. Gli scenari sono diversi – ma, soprattutto nel caso della conservazione della terra, non del tutto distanti –, le questioni etiche di fondo, però, rimangono esattamente le stesse: se si accetta di ridurre i problemi di natura operativa a semplici problemi tecnici, prescindendo dai presupposti “umanistici” che hanno fino a oggi orientato le scelte dell'uomo nei diversi settori, «l'etica si dissolve, e con essa la storia come teatro della prassi, a favore di un tempo non più scandito dalle azioni degli uomini, ma dal ritmo dell'evoluzione tecnica che l'azione dell'uomo stenta a governare» (ivi, p. 473).

Ricondurre così l'etica del restauro sulla strada della responsabilizzazione, quindi della previsione e della valutazione degli effetti dell'attività conservativa e non solo del controllo funzionale delle sue procedure, significa pertanto, ancora una volta, sottolineare la necessità di assicurare una coerente e unitaria regia alla cura dei beni storico-artistici, fondata su un consapevole riconoscimento dei valori dell'opera e informata dei contenuti dei diversi specialismi.

Assumono così significato etico nodale – e non di mero virtuosismo professionale – i richiami all'importanza e alla necessità di elaborare, organizzare e rendere accessibile la documentazione delle ricerche e degli interventi (Torraca, 1988), la richiesta di chiarire, e di non far derivare da un acritico dogmatismo, i criteri che hanno portato alla scelta di materiali tradizionali o moderni (Fancelli, 1988; Lazzarini, 1999), la riconduzione delle analisi scientifiche al corretto ambito di pertinenza, orientato soprattutto alla caratterizzazione e al processo di alterazione dei materiali (Cordaro, 1991), la verifica nel



tempo dell'esito dei trattamenti condotti (Torraca, 1997), anche nell'ottica della loro rispondenza effettiva agli obiettivi originali.

### 2.3

## Tecnologie conoscitive e d'intervento

### 2.3.1. Studio e diagnosi sull'esistente

Nessun aspetto del percorso investigativo legato al restauro è stato trascurato dal più recente sviluppo tecnologico-scientifico: sistemi di misurazione, rilevamento e restituzione grafica, procedure di ripresa ed elaborazione fotografica, modalità di ricerca bibliografica e archivistica, sistemi di immagazzinamento e di estrazione delle informazioni, tecniche analitiche e d'intervento. La vorticoso trasformazione di quest'ultimo ventennio, resa ancor più complessa dalla persistenza e dalla necessaria convivenza con procedure tradizionali, ha diviso generazioni, competenze, interessi, ha attratto risorse ed energie, non lasciando molto spazio alla disamina del rapporto fra "apparato tecnologico" e conoscenza. Lo sviluppo della "cornice tecnologica" ha pertanto tralasciato il controllo dei nessi con i possibili contenuti, anche se non a tutti è sfuggito il ruolo condizionante che essa riveste relativamente alla natura dell'informazione (Settis, 2002). L'esigenza di omologare parametri, formati e lessici, ad esempio, oltre a richiedere uno sforzo improbo e forse in parte utopico ai ricercatori, incanala l'indagine, o anche solo la sua organizzazione, all'interno di database per la raccolta dati, secondo binari precostituiti. Tali disposizioni orientano gli indirizzi dello studio, ne condizionano sensibilmente i risultati e meriterebbero pertanto una regia orchestrata e flessibile, in grado di determinare le strutture organizzative idonee sulla base della possibile articolazione dei contenuti. In un certo senso, la scelta e la definizione esecutiva degli apparati tecnologici costituisce la prima palestra critica dell'attività investigativa e di restauro, ma troppo spesso, e per innegabili difficoltà di competenza, essa viene *in toto* delegata a tecnici oppure meccanicamente importata da altri contesti e riproposta a nuovo uso.

Più è sofisticata l'attività investigativa, più il rischio della delega aumenta: la particolarità della strumentazione e delle procedure, infatti, scoraggia il coinvolgimento degli operatori non direttamente coinvolti e facilita l'idea del conseguimento garantito di un esito astrattamente "ottimale". In realtà, ogni atto investigativo obbliga a effettuare scelte "soggettive", ovvero guidate dal giudizio. La stessa fotografia, in teoria il sistema di rappresentazione del reale più fedele, può variare a seconda di numerosi parametri, come la modalità d'illuminazione dell'oggetto; se tale illuminazione viene disposta con lo scopo di evidenziare una patologia, ad esempio il rigonfiamento di un intonaco, anziché in base all'efficacia estetica della resa finale dell'immagine, il contenuto informativo risulterà diverso e tale scelta non può che derivare dalla decisione congiunta del fotografo e del restauratore (Bellucci *et al.*, 1985).

Nel campo strettamente diagnostico, poi, sono ancora più inevitabili messe a punto di metodo e di risultati, perlopiù in ragione della difficoltà di esportare le acquisizioni della ricerca scientifica dal laboratorio al cantiere (Torraca, 1997). I problemi di caratterizzazione univoca di materiali e degrado nonché di standardizzazione di procedure e tecniche sono stati soprattutto affrontati in questo campo, con proposte di volta in volta (e in quantità ancora non esaustiva) codificate nelle diverse Raccomandazioni NORMAL e nei protocolli UNI.

Le più consolidate ricerche relative alle tipologie e ai meccanismi di degrado del materiale lapideo sono state nel tempo estese ai laterizi e alle malte di allettamento, per stucchi o per intonaco, cercandosi di provvedere a un'omogeneità di lettura resa più difficoltosa dal vastissimo spettro di possibilità operative offerte dell'edilizia storica. Il distacco di materiali eterogenei costituisce inoltre uno dei problemi di conservazione principali e di più difficile caratterizzazione, sia dell'architettura (si pensi proprio agli intonaci di rivestimento) che della pittura (nella pellicola pittorica del quadro), della scultura (nei manufatti policromi in legno o nei metalli rivestiti, come i bronzi dorati) e delle più diverse arti decorative (ceramiche smaltate, vetrate lavorate a grisaglia ecc.).

Un'attenta analisi visiva dell'opera è generalmente in grado già da sola di far emergere natura e gravità del degrado e dei dissesti; essa risulta comunque indispensabile per selezionare sia le più opportune tecniche d'indagine elementari e a basso costo, sia le più avanzate tecniche per la diagnostica. Questa analisi visiva orienta inoltre la selezione – fondamentale per l'esito e la qualità investigativa – delle zone da campionare, sulla base della loro rappresentatività e del potenziale informativo in esse contenuto (Plenderleith, Werner, 1971; Laurenzi Tabasso, Lazzarini, 1986; Bureca, Laurenzi Tabasso, Palandri, 1987; Matteini, Moles, 1984; *Scienza e restauri*, 1999; Torsello, Musso, 2003).

L'individuazione del tipo d'indagine e la determinazione della tempistica e delle procedure sono, ancora una volta, il prodotto di una vera e propria pianificazione, legata alle caratteristiche del contesto e alla natura degli obiettivi conoscitivi complessivi, ma anche alle capacità, in un certo senso "creative", necessarie all'organizzazione di un buon processo analitico, nonché alla valutazione dei rischi connessi al tipo d'indagine (Brandt, 1994b). Tale pianificazione non attinge, così, a una catalogazione organizzata di diverse tipologie investigative, rigorosamente predeterminate rispetto ad alcuni parametri precostituiti, ma si struttura attorno alle caratteristiche dell'oggetto indagato e alla natura dei suoi specifici problemi conservativi.

La presentazione di una catalogazione efficace e "pronta all'uso" delle tecnologie più sofisticate pone comunque diversi problemi. Sono state elaborate alcune proposte di ordinamento in base a parametri differenti, come la maggiore o minore distruttività delle tecniche, i loro caratteri di spedività e complessità, la tipologia delle metodiche esistenti (chimiche, fisiche, fotografiche, meccaniche, di analisi visiva ecc.), la natura delle opere su cui queste possono

essere utilizzate (dipinti, ceramiche, architetture, tessuti ecc.), gli obiettivi dell'indagine (ad esempio le tecniche di datazione e di caratterizzazione dei materiali, di valutazione del degrado e dei dissesti, di verifica dell'intervento), la natura delle operazioni (consolidamento, pulitura, protezione ecc.), ma ognuna di queste griglie presenta discrezionalità e sovrapposizioni.

Si ricorda comunque, senza avere la pretesa dell'eshaustività, come indagini di questo tipo possano essere svolte tramite rilevamenti non strumentali di dati da sottoporre a valutazioni di natura qualitativa-quantitativa oppure richiedano l'uso di strumentazioni e metodiche di laboratorio o ancora siano condotte sul cantiere tramite apparecchiature sofisticate il cui uso richiede competenze specialistiche. La loro realizzazione dovrebbe precedere, in genere, l'elaborazione del progetto, ma non di rado, in architettura, esse vengono disposte in corso d'opera, per la maggiore accessibilità ai luoghi consentita dall'installazione del cantiere, per le complesse modalità di gestione dei fondi, per l'insorgere di scoperte nuove e inattese nel corso dei lavori.

Le analisi stratigrafiche, mensiocronologiche e dendrocronologiche costituiscono la maggior parte delle investigazioni di natura qualitativa-quantitativa, finalizzate a una migliore comprensione delle vicende costruttive dell'edificio. Esse richiedono una specifica competenza tecnica e non necessitano di una strumentazione particolarmente sofisticata.

Il laboratorio svolge un ruolo importante nella fase diagnostica finalizzata alla caratterizzazione dei materiali. Questi possono essere infatti indagati tramite la diffrattometria (XRD); la fluorescenza a raggi X (XRF); la fluorescenza UV; l'assorbimento atomico; la porosimetria; la cromatografia e la gascromatografia; l'osservazione di sezioni sottili al microscopio ottico e al microscopio elettronico a scansione; la spettrofotometria. Molto utili, anche se pertinenti perlopiù all'analisi di reperti mobili, sono le tecniche per il rilevamento delle parti nascoste dell'opera e l'evidenziazione di discontinuità e disomogeneità interne, come la riflettografia, la spettroscopia, la magnetometria, la radiografia e la tomografia X e gamma (TAC). Anche diverse tecniche fotografiche (a infrarosso, in ultravioletto, in bianco e nero o in colori falsati) sono in grado di evidenziare eterogeneità e discontinuità nei materiali che compongono il manufatto. Acquisizioni importanti dal punto di vista della datazione, particolarmente nei reperti archeologici, sono infine consentite dalla termoluminescenza e dal radiocarbonio (Matteini, Moles, 1984; Guidi, 1995; *Scienza e restauri*, 1999; Torsello, Musso, 2003).

In architettura, però, sono soprattutto le tecniche analitiche conducibili *in situ* a fornire risposte importanti ai fini della conoscenza costitutiva generale dell'edificio e del suo stato di conservazione, come con la termovisione, il rilevamento termogrometrico, il georadar, le indagini con ultrasuoni e altri dispositivi per la valutazione di spostamenti (misurimetri, sensori, rilevatori strumentali) o sollecitazioni in atto nelle murature (martinetti piatti, singoli o a coppia, e altri strumenti utilizzati nelle consuete prove statiche e dinamiche per la verifica delle costruzioni moderne). In alcuni casi, indagini condotte in

laboratorio su opere d'arte mobili possono essere riproposte *in situ* per investigare su componenti dell'edificio, come con la magnetometria o l'endoscopia.

### 2.3.2. Il progetto e il cantiere di restauro in architettura

La progettazione del restauro dovrebbe garantire la “messa a sistema” di tutte le diverse attività da svolgere, coniugando gli aspetti formali con quelli dimensionali e materici, definendo i dettagli delle lavorazioni e le loro tempistiche, verificando, attraverso simulazioni grafiche e trattamenti delle immagini, gli esiti delle proposte operative. La complessità dei problemi, l'accessibilità parziale delle fabbriche, la scarsa sensibilizzazione pubblica sull'importanza dell'attività progettuale, l'assenza di controlli, la perdita della regia centrale da parte del progettista sono fra le principali ragioni della frequente carenza del progetto di restauro, primo e determinante fattore della conseguente perdita di coerenza delle procedure conservative. La tecnologia informatica ha agevolato la possibilità di controllo e il rimando interno fra elaborati grafici, relazioni, computi, schede tecniche, capitolati, consentendo l'organizzazione di una documentazione di progetto coerente, ma, ancora una volta, è la finalità ultima, in questo caso di effettiva programmazione dell'operato conservativo senza deleghe di responsabilità subordinate e senza deroghe nei tempi delle decisioni, a doverne normalizzare e rendere l'uso costante.

La difficoltà di valutare, in un progetto preventivo, le nuove e sempre possibili scoperte di cantiere, le contingenze imprevedibili insite nelle lavorazioni, le ipotetiche difficoltà di reperimento di prodotti compatibili con le caratteristiche dell'esistente, lungi dal costituirsi come alibi per una progettazione troppo spesso ricondotta a una generica perizia, dovrebbero poi promuovere il più volte richiesto «cantiere di progetto» (Torraca, 1988), ovvero l'aggiornamento e la verifica puntuale in corso d'opera della documentazione delle operazioni programmate, purtroppo sino a oggi riservato unicamente ai monumenti principali.

In cantiere, il restauro torna a essere soprattutto un problema tecnico, dove il saper fare diretto conserva ancora la priorità sull'apparato tecnologico e la “macchina” si configura perlopiù come strumento subordinato a una prassi operativa complessa. Al di là di alcune operazioni particolari, soprattutto di carattere strutturale, il sistema tecnologico, inteso come allestimento e gestione di mezzi sofisticati e specialistici, entra soprattutto in gioco nel settore produttivo.

La produzione dei materiali, la loro selezione, il loro comportamento nel tempo rappresentano il vero ambito della tecnologia nel cantiere di restauro architettonico. Una finta soluzione dei problemi posti dalla rivoluzione tecnologica è stata quella di promuovere l'impiego esclusivo di materiali analoghi a quelli già in uso nell'edificio. Si tratta di una finta soluzione perché la produzione di materiale, tradizionale o moderno, risente comunque del condiziona-

mento della lavorazione industriale: la calce non viene quasi mai spenta nelle fosse per almeno un anno, il legno non è più stagionato in maniera naturale, lenta e prolungata, i metalli sono totalmente diversi, per resistenza e confezione, da quelli del passato. Sollecitare l'impiego dei soli materiali tradizionali ignorando queste realtà significa sottrarre il cantiere di restauro dai condizionamenti inevitabili del nostro tempo e, quindi, renderlo inattuabile e utopico, oltre che radicalmente antistorico. La presenza dei materiali moderni, d'altra parte, pone i ben noti problemi della conoscenza della composizione del prodotto, della verifica di compatibilità, del riscontro del comportamento nel tempo e del confronto fra gli esiti di queste verifiche e la filiera, definita e consolidata, della produzione industriale (Torraca, 1982b). Un quarto di secolo di raccomandazioni in questo senso ha molto migliorato conoscenze e offerte nel mondo del cantiere e forse questo costituisce uno dei maggiori successi conseguiti dai ricercatori nel campo del restauro.

Una pur sommaria panoramica delle principali tecnologie in uso sui materiali, oltre a introdurre i successivi approfondimenti rivolti al restauro architettonico, consente di chiudere il cerchio del ragionamento sin qui svolto, che dall'indagine sul significato culturale della conservazione procede all'identificazione degli strumenti necessari all'attività pratica.

La rimozione delle cause alla base del degrado materico dovrebbe precedere ogni tipo d'intervento e si lega spesso alla presenza di umidità o al risanamento strutturale dell'edificio. Le soluzioni ai problemi di umidità spaziano dalle operazioni di natura schiettamente edilizia all'applicazione di dispositivi impiantistici, in un accorto impiego della tecnica e delle tecnologie disponibili che basa fondamentalmente il suo successo sulla fondatezza della diagnosi di partenza, spesso non facile.

Analogamente, gli interventi di restauro statico mutuano la propria efficacia dalla correttezza diagnostica e dal calibrato raccordo con le caratteristiche costitutive della fabbrica storica. Molti di essi utilizzano procedure e tecniche edilizie "tradizionali" (tamponature, sottomurazioni, scuci e cucì, integrazioni, ispessimenti delle sezioni resistenti, inserimento di elementi ausiliari per il supporto e il contrasto ecc.), anche nelle versioni "modificate", dovute all'impiego di materiali moderni (soprattutto acciaio e cemento armato, legno lamellare, resine fibrorinforzate); altri, ugualmente molto diffusi, impiegano con i materiali moderni macchinari innovativi, approntati soprattutto per perforare terreni e murature (per l'inserimento di pali metallici o in calcestruzzo armato, di armature, di malte reoplastiche) o per modificare, in maniera permanente o transitoria, l'assetto delle strutture (per la rotazione o il sollevamento di componenti murarie e di orizzontamento). La maggior parte di esse, anche se non tutte, trovano negli strumenti di verifica "scientifica", di tipo numerico, una modalità – ancora in parte approssimativa e convenzionale – di controllo.

Gli interventi di restauro sulle superfici architettoniche, normalmente distinti, in base alla loro più immediata finalità, in preconsolidamento, pulitura, consolidamento e protezione, si diversificano a seconda della composizione

materica (in Italia sono prevalentemente impiegati, nell'edilizia storica, pietra, malta e intonaco, laterizio, mattone crudo, ceramica e maiolica) e del livello di degrado. Per l'estensione dei manufatti edilizi e la compresenza di più materiali, spesso soggetti a lavorazioni e finiture anche molto diverse, la scelta delle metodiche di restauro superficiale in architettura dovrebbe poi ricercare l'ottimizzazione di procedure, tempi e costi di esecuzione.

### 2.3.3. L'indagine senza il restauro: monitoraggi e prevenzione

La precisazione degli ambiti e delle modalità di esercizio delle discipline scientifiche evidenzia come queste si rivelino soprattutto utili nella fase decisionale "intermedia" dell'intervento di restauro, dedicata alla selezione di materiali e strumentazioni opportune. Tale fase decisionale segue quella, di natura critica, delle scelte progettuali ed esecutive generali e precede quella, prevalentemente tecnica (come di tradizione nell'architettura), dell'esecuzione dell'intervento.

Esiste comunque un ambito in cui la scienza della conservazione gioca oggi un ruolo per molti versi innovativo e di fondamentale importanza, ovvero il contesto del cosiddetto "restauro preventivo" o della "conservazione programmata", rivolto principalmente al controllo e alla gestione nel tempo dell'opera d'arte e del suo ambiente (Urbani, 1982).

Questo ambito ha registrato negli ultimi tempi una notevole crescita d'interesse, anche in ragione dell'evidente necessità di difendere i monumenti dai rischi di natura antropica e naturale, particolarmente legati ai problemi di alterazione dell'ambiente (inquinamento, dissesti idrogeologici, sismi ecc.) e allo sfruttamento turistico dei beni culturali. I settori di ricerca orientati alla valutazione dell'aggressività ambientale sugli edifici storici (attacchi chimici e biologici, sollecitazioni di tipo dinamico ecc.), alla gestione e al controllo del microclima interno alle fabbriche, soprattutto quelle destinate ad attività museali o con apparati decorativi di rilievo, si sono notevolmente ampliati, affiancandosi al campo consueto dei monitoraggi statici, di più lunga tradizione. Ricorrono, in queste ricerche, molte delle metodiche diagnostiche già sinteticamente ricordate e quelle normalmente in uso per le verifiche strutturali degli edifici, nonché gli apporti, sempre più sofisticati, delle strumentazioni informatiche, particolarmente utili perché in grado di elaborare grandi quantità di dati.

La scienza della conservazione ha riportato in questo campo ampi successi di applicazioni e verifiche sperimentali, i cui unici limiti consistono nella difficoltà a imporsi quali modelli di controllo in una gestione quotidiana diffusa dei monumenti, almeno di quelli più a rischio. Gli esempi più noti di monitoraggio (strutturale e/o ambientale), molti dei quali ancora in corso, ad esempio nella Torre di Pisa, nella Domus Aurea a Roma, nella Sala delle Cariatidi del Palazzo Reale di Milano, oltre a costituire un'importante palestra di ricerca, dovrebbero fungere da modello per l'adozione diffusa di sistemi di controllo, anche da selezionarsi fra i più semplici e meno onerosi. Un'adozione

capillare di tali accorgimenti costituisce, a sua volta, un potenziale fattore d'incremento delle nostre conoscenze, da sottoporre a ulteriori valutazioni "scientifiche", e consentirebbe di ridurre considerevolmente di numero e d'intensità gli interventi di restauro necessari.

#### 2.4 Conclusioni

Ripercorrere le tematiche del restauro dal punto di vista della scienza e delle tecniche della conservazione consente di guardare in una prospettiva diversa a problemi che si affrontano spesso in architettura. Un ragionamento complessivo sul rapporto fra restauro e tecnologie, comunque, non risolve in maniera definitiva le questioni considerate: troppo legate alla mutevole sensibilità dell'uomo verso il passato sono le ragioni del primo, troppo veloce e imprevedibile è la crescita delle seconde. La verifica costante del ruolo e delle finalità delle tecnologie nel restauro, in una riflessione generale, come quella che qui si è proposta, ma anche nel quadro d'insieme del singolo problema conservativo espresso da un edificio o da un'opera di valore storico-artistico, costituisce l'unica garanzia per la conduzione di un'attività che, priva di una originaria attribuzione di senso, rischia di porsi a cavallo fra il blando intrattenimento operativo e la chiara manifestazione dell'incapacità umana d'istituire una proficua relazione fra passato, presente e futuro.

Non è un caso, fra l'altro, che la riflessione sulle tecniche, che ha contrassegnato lo sviluppo di molta filosofia moderna, abbia spesso coinvolto il delicato argomento del rapporto con il passato, volgendo l'attenzione, in particolare, al tema dell'architettura storica. Quest'ultima, con la sua evidenza materiale, pone infatti in termini concreti e immediatamente percepibili la responsabilità costante della scelta relativa alla nostra posizione nel mondo e nel tempo, se è vero che, come osserva Emanuele Severino (2005, p. 99), «l'autentico oltrepassamento del passato richiede che lo si conosca a fondo e che se ne tutelino in ogni modo le vestigia».





# Tecnologie per la conoscenza della fabbrica

di *Francesca Romana Liserre e Carla Bartolomucci*

## 3.1 Indagini sull'edificio

### 3.1.1. Tecnologie digitali per la fotografia, il rilievo e la restituzione virtuale

Il continuo, rapido evolversi delle conoscenze tecnologiche fornisce costantemente nuovi strumenti alla conoscenza e alla tutela dei beni culturali: si moltiplicano le tecniche per acquisire notizie sul bene di cui garantire la conservazione e per provvedere alla redazione d'un progetto di restauro quanto più possibile consapevole, contenuto e rispettoso delle istanze specifiche poste da ogni opera.

Le tecnologie risultano utili già dal primo approccio con la fabbrica, quello autoptico (Parenti, 1988), con l'osservazione diretta della materia costruita: in questa fase – che può essere utile effettuare quando ancora non si conosce nulla dell'opera, per avere uno sguardo il più possibile libero dai condizionamenti di valutazioni e informazioni mutuata da altri – il disegno dei dettagli tecnologici e dei particolari decorativi, come pure dell'edificio nel suo complesso, è ormai da tempo affiancato dall'uso di fotografie digitali. Si tratta di uno strumento senza dubbio utile, che però – come già sottolineato (Sacco, 2002; Fiorani, 2004d) – va usato con accortezza per arginare la ridondanza di riprese dovute al costo apparentemente nullo: l'impressione di poter fotografare ogni cosa senza condizionamenti di spesa e di tempi (le riprese sono immediatamente disponibili) e di essere in grado di acquisire “tutte” le informazioni sull'edificio induce a rimandare in seguito la valutazione critica di quello che si sta guardando, col risultato di prestare poca attenzione al prezioso momento dell'osservazione diretta e di perdere molto tempo, *a posteriori*, per la selezione delle riprese, che è sempre e comunque opportuno stampare. La fotografia digitale può dare l'illusione che la tecnologia consenta di abdicare al senso critico nell'acquisizione di dati: al contrario, le riprese fotografiche devono essere a servizio della valutazione autoptica dell'edificio e vanno effettuate in modo mirato, per documentare elementi precisi o ricordare particolari aspetti meritevoli di analisi ulteriori, da approfondire tornando sul posto a più

riprese via via che le altre indagini procedono ed emergono i nodi da chiarire.

Arginata la tendenza agli scatti “indiscriminati”, la disponibilità immediata dell’immagine consente in un certo senso di usare la macchina fotografica come rapido “blocco per appunti” e la qualità crescente delle fotocamere permette di acquisire informazioni di grande dettaglio: è esemplare lo studio condotto sulla facciata del Palazzo Pubblico di Siena (Parenti, 2001), in cui fotografie digitali ad altissima definizione, scattate dai ponteggi con apparecchiature a risoluzione elevata, sono state usate come vero e proprio strumento di analisi e non più solo come mezzo per tramandare informazioni, ampliando sensibilmente la qualità e la quantità delle osservazioni che si potevano effettuare anche “a piè d’opera”, prolungando le felici condizioni di osservazione offerte dai ponteggi.

Una delle prime mappature fotografiche ad alta definizione è stata condotta sulla volta della Cappella Sistina in occasione dei restauri svolti dal 1980 al 1994, in cui l’ampio uso di tecnologie informatiche e digitali ha anche fatto emergere l’esigenza di trattare sistematicamente il rilevamento dei dati, prescrivendo con precisione quali raccogliere, le metodiche di catalogazione compatibili con le operazioni di restauro e le modalità di sintesi tramite adeguati tematismi grafici (Petrignani, 2002). Negli stessi anni si è svolto l’intervento sugli affreschi di Vasari e Zuccari nella cupola di S. Maria del Fiore a Firenze (Dalla Negra, 1995), documentati da 25.000 fotografie digitali scattate in condizioni di luce normale e di luce radente. Quest’ultima (Aramini, Capogrossi, 1988; Musso, 2004) consente di verificare irregolarità della superficie come rugosità, rigonfiamenti e piccole soluzioni di continuità grazie all’ombra proiettata da una fonte di luce in posizione quasi parallela alla superficie ( $5-20^\circ$ ), così da enfatizzare dati altrimenti poco percettibili: da queste irregolarità è possibile desumere informazioni preziose, come quelle relative alle giornate di esecuzione di un affresco o alla presenza di riprese o di stuccature di restauro, ma anche distinguere le caratteristiche dovute ad esempio agli strumenti di lavorazione superficiale da quelle legate a fenomeni alterativi (FIGG. 3.1-3.3).

In questo senso, rimanendo alle tecniche fotografiche, ulteriori informazioni sono ottenibili tramite l’impiego di pellicole sensibili ai raggi infrarossi (IR, radiazioni termiche con lunghezza d’onda fra 0,7 e 1 micrometro) spontaneamente emessi dai corpi, che permettono di restituire l’“immagine termica” dell’oggetto, ricavando informazioni su materiali, stato di conservazione, presenza di vegetazione non ancora visibile in superficie, stato fessurativo; dati simili sono forniti anche dalla fotografia per fluorescenza ultravioletta (Musso, 2004), che sfrutta radiazioni elettromagnetiche di diversa lunghezza d’onda (Sansonetti, Conti, Colombo, 2005). Si tratta di tecniche particolarmente usate per l’esame di manufatti pittorici con l’“indagine riflettografica” (si vedano le esperienze dell’Istituto nazionale di ottica applicata del CNR), in quanto la parziale trasparenza alla radiazione IR rende visibili particolari nascosti dallo strato pittorico, come disegni preparatori ed eventuali pentimenti: la compa-

FIGURA 3.1

Iraq, Ninive (Mosul), palazzo di Sennacherib (704-681 a.C.). Fotografia a luce radente: particolare dell'ortostato 3 sinistro (Sala V)



Foto di A. Rubino, riprese effettuate nel corso del rilievo stereofotogrammetrico di S. D'Amico (ISCR).

---

razione fra l'immagine infrarossa e quella nel visibile evidenzia i diversi momenti della realizzazione e le corrispondenze fra disegno preparatorio e opera finita.

Attraverso varie modalità di ripresa fotografica è possibile, insomma, ottenere un gran numero di informazioni sulla materia visibile e non visibile dell'oggetto, a scala di dettaglio o per una lettura d'insieme, particolarmente esaustive quando si tratti, come anticipato, di opere pittoriche. Più contenuta è, infatti, l'efficacia della fotografia per documentare la scultura e, ancor più,

FIGURA 3.2

Iraq, Ninive (Mosul), palazzo di Sennacherib (704-681 a.C.). Fotografia a luce radente: particolare dell'ortostato 28 (Sala I)



Foto di A. Rubino, riprese effettuate nel corso del rilievo stereofotogrammetrico di S. D'Amico (ISCR).

FIGURA 3.3

Iraq, Ninive (Mosul), palazzo di Sennacherib (704-681 a.C.). Fotografia a luce radente: particolare dell'ortostato 37 (Sala V)



Foto di A. Rubino, riprese effettuate nel corso del rilievo stereofotogrammetrico di S. D'Amico (ISCR).

per fornire una lettura d'insieme dell'architettura: le riprese fotografiche documentano solo la "pelle" dell'opera, che necessita di elaborati "critici" come le sezioni – astrazione e non immagine fotografabile – in grado di documentare la realtà geometrico-strutturale della fabbrica e il suo funzionamento come organismo architettonico complesso.

La cupola fiorentina è un utile esempio in tal senso: come si è detto, la fotografia ha documentato in modo soddisfacente stato e alterazioni degli affreschi prima, durante e dopo l'intervento di restauro, ma è insufficiente per indagare le problematiche statiche della struttura, interessata da significativi fenomeni fessurativi e, da sempre, oggetto di attenzione per la sua originale tecnica costruttiva (si vedano, fra l'altro, i decennali studi di Salvatore Di Pasquale); essa è stata infatti studiata attraverso un gran numero di restituzioni grafiche – dalle sezioni agli spaccati assonometrici – fino alla realizzazione di modelli in scala e alle più recenti ricognizioni tecnologiche (Rocchi Coopmans de Yoldi, 2006).

Affreschi, mosaici, rivestimenti lignei, decorazioni scultoree apparentemente documentabili con rappresentazioni a due dimensioni si giovano, in realtà, dell'inquadramento nello spazio offerto da ricostruzioni grafiche di vario tipo che consentono di percepire le opere nel loro contesto, nei punti per cui sono state pensate e nelle condizioni di visione legate agli ambienti originari: sulla scorta delle competenze maturate inizialmente in sede professionale per valutare l'efficacia delle scelte progettuali e il loro impatto sul contesto (come, ad esempio, i concorsi internazionali per il restauro del Tempio-Duomo di Pozzuoli e del Mausoleo di Augusto a Roma, con la sistemazione della limitrofa piazza Augusto Imperatore), sono state elaborate diverse restituzioni tridimensionali degli edifici e dei loro apparati decorativi (TAV. 1a) ad esempio per illustrare l'assetto, anche cromatico, di monumenti archeologici (come con l'Ara Pacis e la Domus Aurea; Viscogliosi, Borghini, Cariani, 2006) o per restituire raffigurazioni pittoriche o musive ormai perse e manomesse pertinenti agli impianti originari delle basiliche romane (ad esempio in studi dedicati alla pittura basilicale romana; Andaloro, 2007).

La possibilità di animazione aggiunge alla percezione tridimensionale di architettura, pittura e scultura l'esperienza del movimento, consentendo così di riproporre le originarie condizioni di fruizione. Interessanti allestimenti sono stati messi a punto negli ultimi anni per musei, mostre e programmi di divulgazione scientifica: a Roma, ad esempio nella mostra "La Roma di Piranesi" al Museo del Corso (Bevilacqua, Gori Sassoli, 2006) un'animazione consentiva di muoversi all'interno della basilica di S. Giovanni osservando la sistemazione dell'abside come sarebbe apparsa nelle intenzioni dell'artista; nell'allestimento museale della Crypta Balbi è possibile percepire virtualmente lo spazio, le luci e i riti delle basiliche paleocristiane; infine, il recente Museo Virtuale della Via Flaminia, ospitato nelle Terme di Diocleziano, offre la possibilità di muoversi nella casa di Livia e Augusto, alternando viste a volo d'uccello dell'intero complesso all'esplorazione dei singoli ambienti, in cui si pos-

sono incontrare pittori, giardinieri e gli stessi padroni di casa che illustrano l'architettura, la vita politica, sociale e religiosa del tempo. È importante sottolineare, in questo ultimo esempio, che in ogni ambiente viene indicato il grado di attendibilità della ricostruzione, dal punto di vista dell'architettura e dell'apparato decorativo: l'efficacia grafica delle immagini non deve far dimenticare il rigore scientifico necessario in queste operazioni ricostruttive, di cui vanno onestamente indicate le basi documentarie. Fatto salvo questo approccio critico, ricostruzioni e animazioni 3D offrono senza dubbio uno strumento di grande utilità per la comprensione dell'architettura e delle sue trasformazioni, soprattutto quando l'immagine attuale sia sensibilmente distante da quella originaria, come accade con i siti archeologici e i ruderi: un'opportunità significativa per migliorare la conoscenza del monumento e valutare l'impatto di ogni eventuale intervento, ma anche a scopo didattico, per facilitare la comprensione delle valenze originarie dell'architettura, ottenendo il felice risultato collaterale di ridurre tentazioni ripristinatorie intese a rendere visibile quanto di essa si sia ormai perso.

Ricostruzioni impostate su basi rigorosamente scientifiche offrono l'occasione di altrettanti confronti fra storici, archeologi e architetti, evidenziando eventuali situazioni dubbie su cui condurre ulteriori indagini e aggiornando convinzioni condivise alla luce di nuovi elementi o della semplice verifica effettuata graficamente, che rivela possibili incongruenze formali o tecnologiche. In questo senso, la ricostruzione grafica digitale non fa che potenziare le possibilità d'indagine da sempre garantite dal disegno, strumento di analisi e verifica insostituibile che "non mente", aggiungendo a esso l'estrema efficacia della verosimiglianza e delle animazioni, che permettono di ricostruire non solo le opere, ma anche il modo in cui queste venivano viste e fruite, percependo il valore originario di materiali e lavorazioni, di spazi e percorsi. Esempolari, in tal senso, le molte, curatissime ricostruzioni dello studio "Altair4", relative a monumenti di varie epoche storiche, dall'Egitto a Roma antica, al Medioevo, al Rinascimento: fra le altre, il Tempio di Giove Capitolino sul Campidoglio (TAV. 1*b*), la Domus Aurea (ricostruita con Andrea Carandini), il Duomo di Modena prima e dopo l'intervento di Lanfranco (FIGG. 3.4-3.5), la *Natatio* nelle Terme di Caracalla (FIG. 3.6), la casa di Giulio Polibio a Pompei (Galifi, Moretti, Aoyagi, 2002; FIG. 3.7) e il Castello di Ferrara nelle sue varie fasi costruttive.

La realizzazione di modelli digitali ricostruttivi può avere importanti implicazioni non soltanto come momento finale in cui convergono le varie acquisizioni ottenute dalla ricerca su un edificio, ma anche sulla metodologia con cui lo studio si svolge. La loro utilità come strumento di continua verifica nel corso di scavi archeologici si è palesata, ad esempio, per la villa augustea di Somma Vesuviana (FIG. 3.8): col procedere del cantiere e l'acquisizione di sempre nuovi elementi, la realizzazione di modelli digitali può consentire di fare il punto sulle progressive trasformazioni del quadro generale.

FIGURA 3.4  
Ricostruzione virtuale dell'interno del Duomo di Modena a seguito dell'intervento di Lan-  
franco



Studio Altair4 – Roma.

---

FIGURA 3.5  
Ricostruzione virtuale dell'interno del Duomo di Modena dopo l'intervento dei maestri  
Campionesi



Studio Altair4 – Roma.

---

FIGURA 3.6  
Ricostruzione virtuale della *Natatio* nelle Terme di Caracalla



Studio Altair4 – Roma.

Il riscontro fra il singolo dato che emerge dallo scavo e le implicazioni che questo ha sull'intero organismo dell'opera che si sta indagando potenzia le possibilità di lettura, ipotesi, indagine e confronto e offre la preziosa occasione



FIGURA 3.7  
Ricostruzione virtuale della casa di Giulio Polibio a Pompei



Con l'edificio sono stati ricostruiti anche i motivi decorativi degli affreschi, scanditi da architetture illusionistiche, per valutare le possibilità d'intervento conservativo e di valorizzazione.

Studio Altair4 – Roma.

---

FIGURA 3.8  
Ricostruzione virtuale della villa augustea di Somma Vesuviana



Il modello, progressivamente riconfigurato in base alle risultanze dello scavo, ha agevolato la verifica delle ipotesi ricostruttive e il confronto fra le diverse professionalità coinvolte nel cantiere di scavo.

Studio Altair4 – Roma.

---

FIGURA 3.9  
Ricostruzione virtuale del complesso templare di Karnak in Egitto



L'estensione della ricostruzione alla scala territoriale aiuta a contestualizzare il singolo edificio nell'originario tessuto connettivo di abitazioni, spazi pubblici ed edifici sacri, palesando il significato di percorsi e relazioni visive ormai fortemente alterati.

Studio Altair4 – Roma.

di vagliare periodicamente le risultanze documentarie; in questo lavoro vengono fra l'altro coinvolte professionalità differenti (soprattutto archeologi, storici, architetti) solitamente caratterizzate da formazione e metodi di approccio diversi, che trovano, nell'evidenza della base grafica, l'opportunità di un confronto e di una sintesi condivisa.

Le ricostruzioni possono trovare utili applicazioni anche per complessi più estesi, per i tessuti urbani o nei contesti paesaggistici di rilievo (FIG. 3.9), come si osserva con il lavoro attualmente in corso sulla zona di Genova Sampierdarena (Leonardi, Campodonico, Ponte, 2006). Si tratta di un paesaggio di palazzi e ville fra i più violati, anch'esso pressoché irricognoscibile, per l'aggressività delle trasformazioni moderne, rispetto alla coesa fisionomia acquisita fra Cinque e Settecento. Di fronte a questo panorama, sopravvissuto solo per frammenti isolati, la ricostruzione storica e la restituzione tridimensionale mirano a ricomporre in modo virtuale la lettura dell'originario tessuto di fabbriche e verde e a mantenere la testimonianza, pur nella lacunosa e ferita consistenza materiale attuale, dei valori di architettura e natura che connotavano ogni edificio rispetto al suo intorno: le vedute virtuali della costa dal mare e dalle colline restituiscono la percezione di punti di vista ormai persi e di rela-

zioni visive su cui si snodavano percorsi reali e simbolici, fra interno ed esterno.

Passando dall'architettura virtuale alla concretezza della materia costruita, le tecnologie offrono un sostegno sempre più solido e raffinato alle operazioni di rilievo architettonico (Torsello, 1979; Docci, Maestri, 1994; Musso, 2004; Fiorucci, 2005): a strumenti tradizionali come la rotella e l'asta metrica, il filo a piombo e la livella ad acqua si sono da tempo affiancati dispositivi elettronici come il distanziometro laser e la stazione totale (o teodolite integrato), che, con l'uso del laser, consentono l'acquisizione di informazioni su distanze e – nel secondo caso – angoli e dislivelli, velocizzando le operazioni di trilaterazione e intersezione in avanti (Docci, Maestri, 1994) e riducendo in modo sempre più significativo i margini di errore.

Il confronto fra i metodi di rilievo longimetrico, topografico e fotogrammetrico effettuato considerando strumenti, operatori, costi e limiti contingenti della loro applicazione (Garello, 2004) ha messo in evidenza come il primo consenta grande precisione a fronte di costi di strumentazione molto contenuti, ma risenta, al tempo stesso, dei vincoli posti dall'accessibilità diretta dei punti da rilevare; tale limite non appare invece nel rilievo topografico condotto con una visibilità sufficiente, mentre la fotogrammetria necessita di riprese ben precise non sempre acquisibili. Nei tre metodi varia fortemente il rapporto fra i tempi di acquisizione e di restituzione dei dati e quello fra dati acquisiti e dati restituiti; i risultati più soddisfacenti nascono dalla mutua integrazione dei sistemi, ad esempio con la messa a punto di una rete topografica d'inquadramento a cui vengono agganciati il rilievo longimetrico e quello fotogrammetrico. Queste possibilità d'integrazione trovano fra l'altro costantemente nuovi modi per declinarsi grazie a tecnologie (*hardware* e *software*) in continua evoluzione.

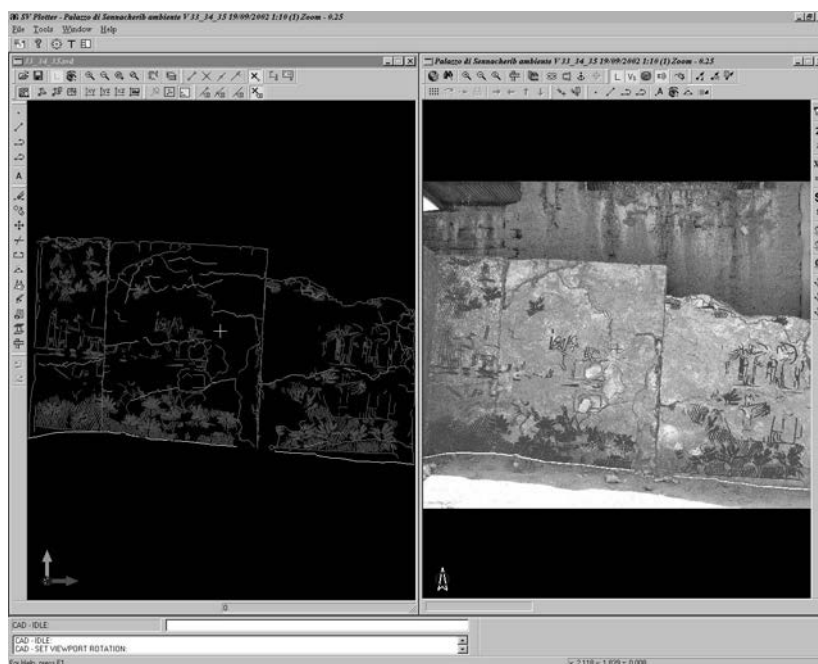
Nella fotogrammetria (Fondelli, 1992; Fiorucci, 2005), l'introduzione della tecnologia digitale ha ridotto sensibilmente costo e complessità degli apparecchi necessari, ampliando molto le possibilità operative: il computer gestisce agevolmente la lavorazione della gran mole di dati e, grazie anche ai progressi nella *computer grafica*, è possibile eseguire il rilievo fotogrammetrico a costi inferiori e in modo più semplice e rapido – realizzando la visione stereoscopica con apparecchio analogico o scheda grafica di tipo *Stereo Ready*, polarizzatore e occhiali polarizzati passivi (FIG. 3.10) – producendo elaborati vettoriali (Fiorani, 2004d) che, fra l'altro, potranno essere facilmente utilizzati all'interno di elaborazioni GIS.

Emblematico è il confronto fra le energie richieste nelle due modalità – analogica e digitale – nel rilievo fotogrammetrico del Colosseo, su cui si sono esercitati vent'anni di ricerche e sperimentazioni di vari dipartimenti dell'Università di Roma "La Sapienza" (Migliari, 1999).

La possibilità di effettuare queste elaborazioni non solo su riprese digitali, ma anche su fotogrammi discretizzati aumenta notevolmente le potenzialità

FIGURA 3.10

Iraq, Ninive (Mosul), palazzo di Sennacherib (704-681 a.C.). Schermata video del programma di stereorestituzione: a destra, la visualizzazione stereoscopica del modello con sovrapposta la restituzione in CAD; a sinistra, la sola restituzione in CAD



Rilievo stereofotogrammetrico di S. D'Amico con la collaborazione di A. Rubino (ISCR, 2002).

d'uso, così da risparmiare, ove possibile, oneri di nuove riprese e ottenere informazioni anche da fotografie storiche che documentano una situazione non più esistente.

In questo senso, già dieci anni fa, sono state fatte esperienze interessanti dall'IRIS-CNR di Bari, che ha studiato i restauri "di liberazione" condotti sul complesso di S. Nicola negli anni trenta del Novecento, ricostruendo, in alcuni casi esemplari, gli interventi subiti dalle fabbriche medievali riportate alla luce mediante sostanziali demolizioni e pesanti integrazioni (se non con la totale invenzione delle forme). Vettorializzate e raddrizzate le immagini fotografiche d'archivio mediante l'impiego di punti di appoggio desunti dal rilievo topografico, le ricostruzioni grafiche degli edifici hanno consentito di evidenziare le manomissioni, le ampie integrazioni del paramento murario, l'eliminazione di tutti i segni relativi agli adeguamenti che le fabbriche avevano subito nel Medioevo e l'inserimento arbitrario di nuove componenti architettoniche. L'esempio illustrato costituisce una modalità di studio interessante che, fra l'altro, dispensa dalla consultazione diretta degli originali fotografici, così da

garantire la conservazione e una più facile riproduzione e consultazione del materiale documentario.

Le numerose applicazioni della stereofotogrammetria s'intrecciano con i risultati offerti dallo scanner laser 3D (Sacerdote, Tucci, 2007), che consente di acquisire digitalmente oggetti tridimensionali di varie dimensioni sotto forma di nuvole di punti: la descrizione geometrica digitale dell'oggetto, quindi, è discreta e la densità della nuvola di punti è proporzionale alla risoluzione impostata, in base al grado di dettaglio richiesto per la rappresentazione.

L'Istituto Centrale per il Restauro (ICR) (oggi Istituto Superiore Centrale per la Conservazione ed il Restauro – ISCR) ha realizzato, fra l'altro, modelli digitali 3D del monumento equestre all'imperatore Marco Aurelio in Campidoglio, del Marco Aurelio della Collezione Ludovisi, dell'Ercole Farnese, del Satiro danzante di Mazara del Vallo, della Madonna di Sansovino a Venezia (Accardo, 2002).

A seconda della tecnologia adoperata, gli scanner laser si distinguono in triangolare, a tempo di volo e a ritardo di fase. Il primo lavora con continue operazioni di intersezione in avanti: sulla base di due punti noti all'interno dello strumento, individua la posizione di un terzo punto, sulla superficie dell'oggetto, tramite la misura delle distanze e degli angoli. Si tratta di una tecnologia che consente risultati di grande precisione a fronte di un raggio di azione di circa 2 metri; tali caratteristiche la rendono inadeguata all'architettura e piuttosto adatta a oggetti di dimensioni contenute, come sculture o particolari architettonici di cui si richieda un rilievo molto dettagliato. Ove si tratti di oggetti isolati – quindi non elementi inseriti in un'architettura, come cornici o bassorilievi –, si può montare lo scanner su una tavola rotante che consente scansioni a 360°: a seconda delle caratteristiche dell'oggetto, si stabilisce quante riprese fare e di quanto spostarsi per le varie acquisizioni. Ogni scansione avviene con 4 passaggi laser di graduale intensità e si può comporre con quella adiacente tramite un'operazione di *merging*, cliccando punti omologhi: per unire due facce, sono necessari tre punti.

Nel recente rilievo, condotto a Roma dall'ISCR, di due teste dei fiumi della fontana di piazza Navona (il Nilo e il Rio de la Plata), il risultato della scansione è talmente dettagliato da consentire – al pari della visione diretta – il riconoscimento degli strumenti di lavorazione sulla superficie lapidea e, soprattutto, di registrarne con esattezza al micron lo stato di conservazione. In questo aspetto si può dire risiede il principale motivo d'interesse nelle acquisizioni spinte a un così raffinato grado di dettaglio, che consentono di monitorare con assoluta precisione i fenomeni alterativi in atto sulle superfici e, quindi, di valutarne a distanza di tempo la trasformazione.

Un tentativo di questo tipo si sta conducendo sulla statua di Cangrande della Scala a Verona, dove è stato eseguito un rilievo 3D per operare un confronto con la fotogrammetria realizzata nel 1992 da Paolo Torsello e valutare l'eventuale perdita di materia in questo lasso di tempo: la difficoltà risiede oggi nell'individuare i punti omologhi che consentano di agganciare fra loro i due

rilievi, realizzati senza prevedere questa disamina. Diversamente è avvenuto per il Teatro Romano di Aosta, dove due rilievi digitali sono stati pensati anche in riferimento a una futura verifica, mentre la presenza di un calco diretto risalente alla prima metà del XIX secolo ha permesso di misurare il materiale perso negli ultimi due secoli dalla Colonna Traiana a Roma (Accardo, 2004).

Come anticipato, il risultato dell'acquisizione con scanner laser triangolare consiste in una nuvola di punti o, forse meglio, in "un tappeto" di punti che individua la superficie dell'oggetto: la gestione dei dati è in questo caso molto agevole e tramite appositi software è possibile collegare i singoli punti in superfici (*mesh*) e/o in curve di livello calibrate dall'operatore, nelle direzioni della terna cartesiana interna al modello (normalmente coincide con quella dello strumento durante la scansione, ma si può impostare diversamente); superfici e curve di livello sono esportabili in formati "dxf" o "dwg" e, quindi, agevolmente trattabili tramite i programmi di disegno CAD più diffusi.

A fronte della grande precisione dei risultati, i condizionamenti operativi di cui tenere conto – oltre al ridotto raggio d'azione di cui si è detto – consistono, in primo luogo, nelle condizioni di illuminazione dell'oggetto da acquisire: sono richiesti possibilmente ambienti chiusi e in penombra, perché con piena luce l'apparecchio è praticamente abbagliato; per lavorare all'aperto è così necessario aspettare il tramonto e procedere con la normale illuminazione urbana notturna (a patto che non ci siano fonti di luce troppo intense). Altro condizionamento è costituito dalla necessità di hardware potenti, in grado di gestire la mole di dati che, stante la notevole precisione, si traduce in un gran numero di informazioni e file molto pesanti. Infine, come per la maggior parte di questi strumenti, bisogna lavorare in un *range* di temperatura fra 0 °C e 40 °C e con umidità relativa al massimo del 65% senza condensa, condizioni che limitano l'uso di queste tecnologie in molti paesi.

Per quanto riguarda il trattamento delle zone in ombra rispetto al raggio d'azione dello strumento, come cornici e sottosquadri, si può acquisire un'altra scansione da una posizione diversa e operare un altro *merge*, oppure ricorrere all'uso di un software contenuto nello strumento che compie un'interpolazione dei dati in suo possesso, relativi all'intorno della zona buia, e chiude questa smagliatura del tessuto di punti con la risposta valutata più probabile. Tale risposta, frutto di un automatismo interno allo strumento, presenta naturalmente efficacia e verosimiglianza da valutare da parte dell'operatore. Questa, come molte altre circostanze, ricordano che l'efficacia tecnologica dei laser scanner non rende ininfluenze le caratteristiche di chi elabora i dati (Settis, 2002): un operatore con nozioni esclusivamente tecniche e privo di conoscenze relative all'oggetto da rilevare, dalla sua qualità materica alle sue caratteristiche storico-critiche, non è in grado di fornire quella che comunque resta una lettura dell'opera con l'inevitabile valore di scelta critica.

Laser scanner più adatti all'architettura sono quelli a tempo di volo e a ritardo di fase: i primi impiegano una sorgente di luce pulsata di cui viene misurato il tempo di andata e ritorno dalla superficie degli oggetti. Sono di

FIGURA 3.11  
Paestum, Tempio di Cerere. Rilievo eseguito con scanner laser 3D



La terza colonna da sinistra, ricomposta dopo essere stata colpita da un fulmine, è stata sottoposta a un rilievo di maggiore precisione ed è quindi definita da una più alta densità di punti.

Rilievo con Leica HDS 4500/software Leica HDS Cyclone di S. D'Amico con la collaborazione di A. Rubino (ISCR, 2007).

questo tipo alcuni scanner laser che garantiscono una precisione di un centimetro in 100 metri e sono attualmente in uso, ad esempio, nella Grotta 17 di Ajanta in India, dove la ricchezza dei modellati scultorei richiede comunque un tempo di acquisizione abbastanza ampio.

Un tempo di ripresa circa 20 volte minore è infatti possibile con il laser a ritardo di fase, detto per questo “celerimetrico”, che però è meno preciso. Strumenti di questo tipo presentano un raggio di azione variabile attorno ai 50 m (TAV. 1c): la tecnologia adoperata si basa sul cambiamento indotto nella radiazione luminosa dall'incidenza con la superficie da rilevare. Si tratta di una sorta di stazione totale di grande potenza, che consente una straordinaria velocità di acquisizione dei dati: in 1 secondo si possono acquisire fino a 500.000 punti. L'ambiente in cui lo strumento viene posizionato può essere rilevato pressoché completamente, per 360° in orizzontale e 270° in verticale, con la sola esclusione del cono individuato dalla presenza del treppiede: questo segna il vertice del cono, mentre la base è sul piano di calpestio e risulterà, nelle elaborazioni, un cerchio privo di punti.

La precisione del rilievo può essere stabilita dall'operatore in un *range* che, a livello indicativo, considerando ad esempio una distanza di 10 metri, va da 1 punto ogni cm a 1 punto ogni 6 mm, fino a un massimo di definizione di 1 punto ogni 3 mm (FIG. 3.11): se s'impone la densità massima, sarà comunque

possibile, tramite il software, visualizzare una quantità minore di punti. Va considerato che non sempre la definizione massima fornisce i risultati migliori: deve essere pertanto effettuata una valutazione caso per caso, tenendo conto del tipo di materiale dell'opera, della sua lavorazione, della risposta al laser. In alcuni casi, il risultato, anche in presenza di superfici pressoché lisce e lineari come quelle della basilica superiore di Assisi (TAV. II), può dar luogo a una ridondanza di punti che dà l'impressione di un feltro steso sulle superfici. La resa dello strumento può forse essere confrontata con quella di uno scanner fotografico: com'è noto, scansioni di foto ad altissima risoluzione non sempre offrono risultati migliori rispetto a risoluzioni più basse; il risultato ottimale deriva invece da una buona valutazione delle caratteristiche dell'immagine da scansionare.

Si sottolinea che è opportuno eseguire un rilievo all'aperto solo in assenza prolungata di pioggia, in quanto la presenza di superfici bagnate o molto umide può dare origine a risultati erranei, analogamente a quanto avviene con materiali vetrosi; incidendo su questo tipo di superfici, infatti, il laser produce una risposta indefinita, un insieme disordinato di punti: si parla in questo caso di "rumore", ossia di registrazione di dati che non individuano l'oggetto del rilievo, ma "sporcano" la scena, come può accadere al passaggio di un veicolo nelle vicinanze.

La "pulitura" della nuvola di punti dal rumore è la prima operazione che viene eseguita quando, dopo le riprese sul campo, si passa all'elaborazione, che si avvale di appositi software: le informazioni vengono rimosse solo dalla visualizzazione e non cancellate definitivamente dal file, che continua a contenere integralmente tutti i dati forniti da ogni ripresa. Queste sono, naturalmente, in numero tale da coprire l'oggetto rilevato, garantendo zone di sovrapposizione; per consentire il successivo montaggio, vengono posizionati *target*, per esempio, a disco con quadranti bianchi e neri che forniscono gli agganci per le unioni. Al momento della sovrapposizione, interpolando tutte le riprese e la posizione dei punti che vengono registrati da più parti, può accadere che alcuni dati presentino un errore troppo grande – fenomeno che si verifica con lo spostamento accidentale dei *target* o con vibrazioni – e l'operatore ha la possibilità di "spegnerli" in modo che il software non ne tenga conto: esiste sempre, comunque, una ridondanza informativa che permette di escludere i dati troppo al di fuori dalla media senza lasciare "zone scoperte".

Mentre la scansione avviene con modulo dedicato del software, la fusione delle varie riprese si esegue con modulo specifico, che consente la registrazione dei dati arrivando alla nuvola di punti pulita, tramite il *merge* delle varie riprese: per arrivare a questo risultato, l'operatore può creare vari *layers* come in Autocad in cui spostare, ad esempio, le informazioni non pertinenti all'oggetto da rilevare. Per la ricchezza della nuvola di punti e i condizionamenti hardware cui sottostare, può essere opportuno impostare una visualizzazione solo parziale della nuvola.

Quando gli ambienti da rilevare non sono fra loro visibili, si può caricare



nel software un file di appoggio topografico: gli stessi *target* posizionati per il laser scanner vengono rilevati anche da una stazione totale. I punti di ripresa per le varie scansioni vanno sempre, comunque, stabiliti in modo da avere le minori zone d'ombra possibili: nel rilievo di una cupola, ad esempio, mettere lo strumento sull'asse nasconde completamente i sottosquadri delle cornici, mentre è più opportuno effettuare riprese angolate.

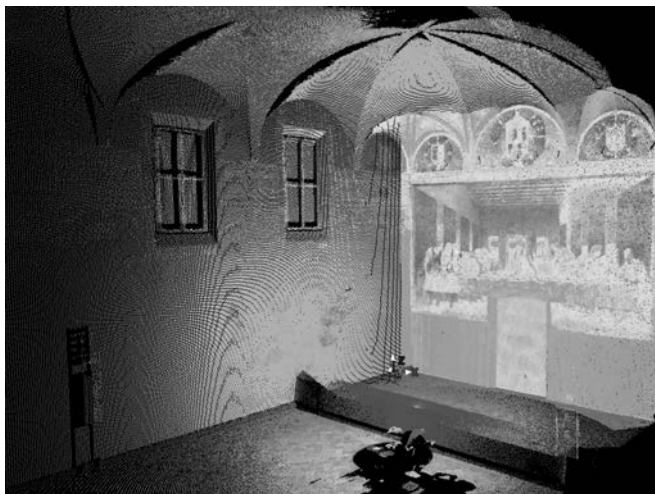
Vi sono inoltre ulteriori moduli aggiuntivi che consentono di estrarre dalla nuvola di punti superfici, piante e sezioni: la Leica fornisce un *plug in* che permette ad Autocad di svolgere queste operazioni. La nuvola può essere "affettata" a seconda dell'elaborato richiesto (una fetta orizzontale per la pianta, verticale per la sezione; cfr. TAV. II) dall'operatore, che poi congiunge con una polilinea i punti situati sul profilo ottenuto: ancora una volta, l'alto contenuto tecnologico non esclude, nel risultato finale, una componente interpretativa. Il file ottenuto è molto leggero in quanto Autocad non "carica" la nuvola di punti, ma la vede soltanto attraverso una sorta di finestra (come per gli "xref") e, quindi, mantiene in memoria solo la polilinea realizzata dall'operatore; conserva, inoltre, in memoria il lavoro fatto nel software di acquisizione e ne importa i *layers*, per cui è possibile rivedere tutte le informazioni che si avevano nelle fasi di scansione e registrazione.

Negli scanner di modello più recente sui punti rilevati, oltre alle informazioni di distanza, si ottengono dati su riflettanza e colore (RGB). La misura della riflettanza (la porzione di luce incidente che una data superficie è in grado di riflettere) consiste nella diversa risposta data all'incidenza con il laser, dai singoli materiali, compresi – ad esempio – i pigmenti contenuti in un affresco (FIG. 3.12), mentre l'informazione RGB consente di completare la definizione digitale dell'opera con le informazioni relative al colore (struttura formale + struttura cromatica) e di eseguire sulla nuvola di punti elaborazioni come quella di disporre fotografie ortoproiettate (si veda il caso del rilievo di palazzo Filomarino a Palo del Colle nei pressi di Bari, in Milella, Zonno, 2005).

Operazioni di questo tipo – consentite da specifici software che permettono di applicare una foto su una porzione di punti e raddrizzarla – si possono eseguire su un modello ottenuto con il laser scanner come pure con la fotogrammetria digitale. Un esempio interessante è il lavoro condotto sul bassorilievo di Alessandro Algardi all'Oratorio dei Filippini (D'Amico, Rubino, 2003; FIG. 3.13) in cui, in mancanza della calibratura degli obiettivi, la stereofotogrammetria digitale si è avvalsa di un appoggio topografico che ha limitato gli errori e consentito la creazione di un modello digitale su cui sono state ortoproiettate le immagini fotografiche di partenza: al di là dell'efficacia grafica dello stereomodello e della rappresentazione fotografica in 3D, è stato possibile verificare la presenza del cinematismo in atto nell'opera in modo da indirizzare adeguati interventi.

I software più recenti stanno lavorando sulla possibilità di generare la nuvola di punti senza bisogno dello scanner ma usando tre foto scattate con

FIGURA 3.12  
Milano, S. Maria delle Grazie, Cenacolo vinciano. Rilievo con scanner laser



Le diverse tonalità sono dovute alla capacità dello strumento di registrare la riflettanza (la porzione di luce incidente che una data superficie è in grado di riflettere) dei singoli materiali, compresi i pigmenti contenuti nell'affresco.

Rilievo con scanner laser 3D Leica HDS 4500/software Leica HDS Cyclone di S. D'Amico con la collaborazione di A. Rubino (ISCR).

FIGURA 3.13  
Roma, Oratorio dei Filippini, bassorilievo di Alessandro Algardi. Immagine *raster* 3D



L'immagine è stata ottenuta con l'ortoproiezione della fotografia sul modello 3D: nel dettaglio si può apprezzare la tridimensionalità della foto che aderisce alla superficie del modello CAD.

Rilievo stereofotogrammetrico di S. D'Amico e A. Rubino (ISCR, 2002).

obiettivi preventivamente calibrati, come avviene per la fotogrammetria, con distanza focale nell'ordine dei micron: si tratta di software basati su un algoritmo di analisi dell'immagine che, in assenza di superfici riflettenti o cromaticamente omogenee, promette grande facilità di trasporto e impiego a fronte di costi contenuti. Facendo scorrere una fotocamera digitale con ottica fissa da 28mm, sottoposta a specifica calibratura, su un'apposita slitta, si acquisiscono 3 riprese dell'oggetto da rilevare (sinistra, centro e destra) e da queste, importate in un apposito software, si genera un modello 3D per nuvola di punti di densità prestabilita; il tempo necessario all'elaborazione varia in funzione della dimensione delle aree individuate nelle foto e del passo richiesto.

Le potenzialità dei software che lavorano con le sole fotografie appaiono molto interessanti, perché la possibilità di eseguire rilievi senza necessità dello scanner risolve il problema – talvolta molto condizionante – del trasporto dell'apparecchiatura, soprattutto quando si tratta di luoghi poco accessibili. Altro vantaggio consiste nella velocità di acquisizione dei dati e della loro elaborazione: dalle riprese fotografiche digitali è possibile estrapolare velocemente l'oggetto raffigurato, calibrando agevolmente il livello di dettaglio a seconda delle necessità. Si fa fronte, inoltre, all'altra limitazione, già segnalata per lo scanner triangolare e presente anche in quello a ritardo di fase, dovuta alla temperatura di esercizio, da contenersi all'incirca fra gli 0° e i 40 °C. Limitazioni comuni alle riprese fotografiche e agli scanner laser sono, invece, la ridotta accessibilità visiva, spesso per la presenza di vegetazione: l'impossibilità di acquisire anche solo un angolo o una faccia dell'oggetto può far perdere al modello il suo valore metrico o, nella peggiore delle ipotesi, il software che sviluppa il calcolo, proiettando i punti in uno spazio virtuale, può non trovare sufficienti basi di controllo per la sua costruzione.

La sinergia di vari metodi di rilievo si conferma, comunque, la modalità migliore per ottenere un risultato geometricamente affidabile e predisposto a costituire una base adeguata per le indagini di approfondimento: la relativa facilità di acquisire rilievi sta portando alla formazione di banche dati che consentano di archiviare il maggior numero possibile di informazioni sulle opere d'arte, a cominciare da quelle scultoree, le cui dimensioni contenute agevolano le misurazioni di precisione. Come si è visto, però, la risoluzione costituisce un parametro significativo nei rilievi eseguiti per nuvole di punti e l'ampia variabilità di risultati che ne consegue ha fatto emergere negli ultimi anni una stringente esigenza di normalizzazione, così da ottenere risultati confrontabili che confluiscono in banche dati comuni (si veda, ad esempio, il progetto "ViHAP<sub>3D</sub>. Virtual Heritage: High Quality 3D Acquisition and Presentation", che ha coinvolto il CNR e il Max Planck Institute). Presso il Laboratorio di fisica dell'ISCR sono state individuate specifiche quantitative indispensabili per definire il processo di campionamento della forma, anche in relazione al livello di deterioramento misurabile; esse riguardano la risoluzione ottica e numerica del modello geometrico in relazione alle dimensioni del manufatto e alla definizione della superficie (*surface texture*) in grado di evidenziare stato

di conservazione, strumenti di lavorazione, tracce lasciate da interventi di restauro precedenti: nell'ambito della scultura, «il percorso tecnologico che dal rilievo del manufatto conduce alla generazione del modello numerico (digitale) tridimensionale risulta adatto per la formazione di un archivio normalizzato delle forme e delle finiture di superficie» (Accardo, 2004, p. 19).

### 3.1.2. Comprensione dei problemi storici e datazione dell'architettura

Le applicazioni della fotografia digitale su rilievi 3D ottenuti con scanner laser incrementano la precisione delle architetture virtuali e delle animazioni cui sopra si accennava: i margini in cui ricorrere alle ipotesi vengono ridotti, in quanto ci si basa su un modello che corrisponde – geometricamente e cromaticamente – all'opera originale, la quale può essere in tal modo studiata alla luce delle trasformazioni intervenute sulla sua materia e sul contesto in cui è inserita, migliorandosi così le possibilità di comprenderne valenze formali e simboliche, rapporti e distanze con il contesto storico-critico in cui essa è nata e di cui si è persa la leggibilità. Un esempio interessante è lo studio sul Salone dei Cinquecento a Palazzo Vecchio a Firenze nell'ambito del progetto “Optocantieri” (Salimbeni, Pini, Siano, 2005): ricerca storica e indagini diagnostiche puntano a identificare il nucleo originario della Sala Grande prima dell'intervento vasariano e a individuare le superfici dove Leonardo e Michelangelo avrebbero realizzato i celebri affreschi della *Battaglia di Anghiari* e della *Battaglia di Cascina*. L'obiettivo primario del progetto consiste nella ricostruzione digitale dell'intero corpo dell'edificio tramite la realizzazione di indagini termografiche e radar, prospezioni ecografiche ed endoscopiche, modellazione tridimensionale digitale e ricerche storico-documentarie, in modo da chiarire l'articolazione degli spazi interni, la tessitura delle strutture murarie, la posizione delle tamponature, la presenza di colonne o intercapedini.

Come si può vedere, anche dopo la fase di rilievo si registra un ampio contributo delle tecnologie a supportare le ricerche storico-documentarie classicamente intese. L'ampio panorama delle possibilità offerte in tal senso si arricchisce seguendo fondamentalmente due direzioni: alcune tecnologie sono d'aiuto nella lettura dell'edificio, fornendo informazioni aggiuntive rispetto a quanto consentito da un'analisi diretta, ossia amplificando le possibilità di “vedere” (è il caso di radar o endoscopie), altre permettono di datare singoli elementi e organismi più complessi, contribuendo a chiarire le dinamiche che hanno condotto allo stato attuale della fabbrica (ad esempio la dendrocronologia o l'archeomagnetismo).

In questo senso, le tecnologie si offrono a supporto di un solido metodo storiografico strutturato e rodato da due secoli di studi, riflessioni e dibattito (cfr., fra gli altri, De Angelis d'Ossat, 1971; Bruschi, 1984; Fiorani, 1994; Carbonara, 1996b, 1997; Philippot, 1998; Fiorani, Esposito, 2005). Il tema della lettura analitica delle tecniche costruttive, in particolare, ha nel tempo raffinato le sue strumentazioni, approfondendo di volta in volta i temi posti dall'ine-

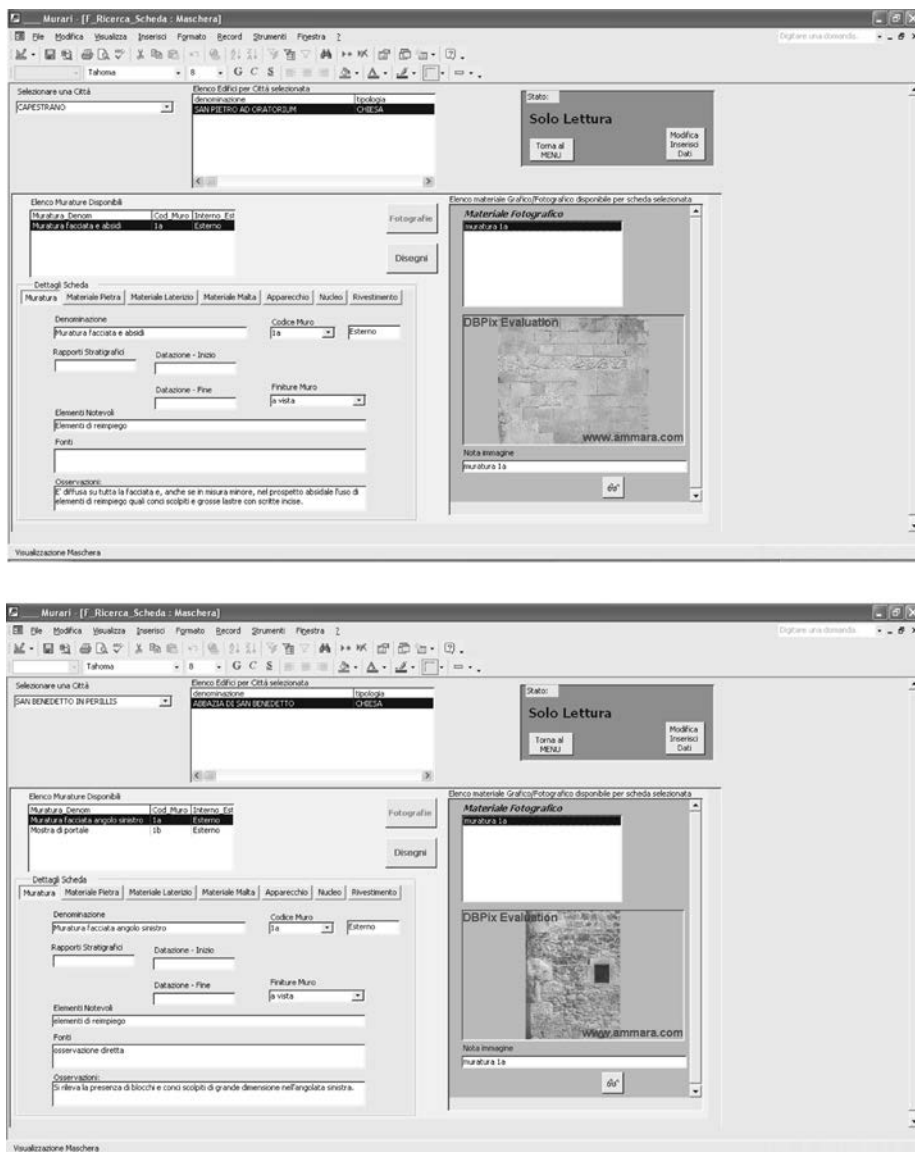
ludibile fase del rilievo e dell'analisi speditiva diretta, soprattutto nella direzione dell'organizzazione sistematica, anche informatica, della catalogazione, della caratterizzazione del materiale, delle modalità di datazione. La solidità di base del metodo consente d'impiegare le tecnologie (spesso prese in prestito dalle scienze naturali) in maniera pertinente e richiede una forte connessione multidisciplinare.

L'obiettivo di collocare cronologicamente il manufatto, in modo da valutarne l'inquadramento storico e indagare analogie e distanze rispetto al suo contesto culturale, viene perseguito di pari passo con l'interesse verso gli aspetti propriamente tecnologici, che aiutano – fra l'altro – a ripercorrere a ritroso le vicende costruttive e a chiarire il funzionamento del cantiere che ha prodotto l'opera e di quelli che l'hanno trasformata. In questa ottica, l'analisi delle murature costituisce il tramite per capire i criteri costruttivi che caratterizzano una data area e/o un dato periodo e favorisce la comprensione delle logiche d'intervento e degli accorgimenti tecnologici a vari livelli, da quelli strutturali alle finiture: si tratta di una modalità di studio che permette, in definitiva, il riconoscimento dell'identità materiale e, in alcuni casi, anche cronologica della struttura, con la fondamentale implicazione di offrire un preciso indirizzo all'intervento di restauro sia in merito alle valutazioni teoriche, sia nel vivo della prassi operativa.

Le ricerche sulle murature svolte negli ultimi trent'anni (cfr. il quadro di sintesi in Fiorani, 2005) hanno permesso di chiarire molti aspetti delle tecniche costruttive medievali, fra cui la loro distribuzione sul territorio e, in alcuni casi, hanno consentito di individuare specifici intervalli cronologici che risultano, naturalmente, di grande utilità anche per circoscrivere l'ambito temporale di una muratura. Le potenzialità del metodo sono da alcuni anni implementate dalle nuove tecnologie che consentono, tramite il computer, di gestire e confrontare grandi quantità di dati sistematizzati in appositi database (FIG. 3.14): le caratteristiche delle murature sono definite con l'ausilio di un significativo numero di voci che permette di annotarne tutti gli aspetti salienti e di agevolare utili confronti con manufatti più o meno distanti, verificando connessioni che possono rivelare spostamenti di maestranze, rapporti fra cantieri, affinità costruttive. L'impiego dei database amplifica i già rodati vantaggi connessi all'uso delle schedature cartacee, consentendo la raccolta di dati fotografici, grafici e alfanumerici, nonché l'aggiornamento e il confronto delle risultanze. Quest'ultimo è reso talora difficoltoso dal fatto che gli studiosi coinvolti nell'analisi delle murature hanno formazione di vario tipo e quindi finalità, metodi e lessici diversificati, al pari dei parametri di lettura e della scala alla quale effettuano l'indagine (Fiorani, 2005).

È il caso, ad esempio, delle riflessioni e dei metodi dell'archeologia dell'architettura (per una visione d'insieme cfr. Francovich, Parenti, 1988; Mannoni, 1996; Doglioni, 1997) che, a partire dagli anni settanta, si sono inseriti in questo panorama scientifico proponendo l'interpretazione delle strutture murarie all'interno di una "storia della cultura materiale" del sito: l'indagine si è, così,

FIGURA 3.14  
 Due schermate del database che raccoglie i rilievi di diversi apparecchi murari



In alto è segnalato il paramento con elementi di riempimento (conci scolpiti e lastre con iscrizioni) della facciata e delle absidi di S. Pietro *ad Oratorium* a Capetrano (L'Aquila); in basso, la muratura della facciata dell'abbazia di S. Benedetto in *Perillis* (L'Aquila) in prossimità dell'angolo sinistro, che presenta blocchi e conci scolpiti di grande dimensione: oltre che sistematizzare dati relativi alle caratteristiche della muratura e dei suoi componenti, il database consente di accedere a fotografie e disegni.

ampliata dal monumento all'edilizia minore e da questa riconosciuta omogeneità dell'oggetto di studio è derivata l'estensione dei metodi archeologici a vari contesti e la proposta di distinguere le unità stratigrafiche (Parenti, 1985, 1988) anche all'interno degli edifici e delle murature.

Tra i metodi prestatati dall'archeologia si evidenziano quelli dell'archeometria, applicazione delle scienze esatte (chimica, fisica, ma anche geologia) alla ricerca storico-archeologica, che offrono interessanti fattori di datazione assoluta grazie alle analisi chimico-fisiche.

Queste consentono, in primo luogo, di fornire informazioni sulla provenienza dei materiali grazie ad analisi petrografiche e isotopiche (Bruno, Gorgoni, Pallante, 1999; Lazzarini, Turi, 2004; Conti, Moroni, 2006): se, come si vedrà, il decadimento degli isotopi radioattivi del carbonio ( $C_{14}$ ) permette di datare alcuni materiali, la quantità di quelli stabili ( $C_{13}$ ) fornisce, invece, informazioni utili sull'area da dove provengono. Marmi giunti da zone con diverso assetto geologico e storia metamorfica possono, infatti, presentare rapporti  $C_{13}/C_{12}$  e  $O_{18}/O_{16}$  particolari che, affiancati ad altre tecniche d'indagine di tipo petrografico e/o geochimico (forma, dimensioni e tessitura dei cristalli di calcite e tipo di minerali accessori) nonché a dati di natura archeologica e ad analisi autoptiche, forniscono una serie di informazioni confrontabili con i database redatti per le varie località estrattive e permettono di identificarle con un buon grado di attendibilità. Si tratta di deduzioni che possono risultare di notevole importanza per la conoscenza dell'opera e del contesto in cui è inserita, contribuendo a fornire elementi sulle dinamiche economiche, sociali e storico-artistiche e a chiarire aspetti legati alla cultura materiale, all'organizzazione del cantiere di lavoro, alle motivazioni e alle disponibilità della committenza, nonché alle possibili relazioni commerciali che legano il luogo di esecuzione dell'opera a quelli di estrazione dei materiali.

Questo tipo di analisi ha aiutato ad accertare pratiche di reimpiego su due archi di trionfo romani (Bruno *et al.*, 1999): il confronto fra il cantiere dell'arco di Settimio Severo e di quello di Costantino ha evidenziato che nel primo i blocchi sono più grandi e di provenienza molto omogenea, mentre nel secondo il numero degli elementi è molto maggiore e i tipi sono molto diversi (proconnesio, lunense, pentelico e pavonazzetto), quindi di spoglio o di recupero.

Le analisi archeometriche sono di ausilio anche per lo studio di malte e intonaci (Mannoni, 1984, 1988, 1990; Boato, Mannoni, 1993; Ricci, 1989, 1998), in cui vengono valutate granulometria, provenienza e dosaggio dei componenti – sabbia e legante – che aiutano a chiarire l'eventuale avvicinarsi nel tempo delle fonti di approvvigionamento, di maestranze con tecniche di lavorazione diverse e/o di trasformazioni dovute a cambiamenti di progetto o di destinazione d'uso.

In ambito archeologico, accanto a queste valutazioni che si basano su analisi chimiche di inerti e leganti, murature ed elementi architettonici vengono studiati con criteri macroscopici che prendono sostanzialmente in prestito i metodi dell'analisi comparativa, già ampiamente rodati in ambito storico-archi-

tettonico (si ricordano, a titolo di esempio: Fasolo, 1954 e Fletcher, 1967), attraverso la “cronotipologia”, che si basa sul confronto fra l’oggetto esaminato e database regionali: la cronotipologia delle aperture (Gabbrielli, 1996), ad esempio, è stata usata come “indicatore cronologico” nello studio e nella datazione delle varie unità stratigrafiche individuate nella facciata del Palazzo Pubblico di Siena (Parenti, 2001).

L’Istituto di Storia della Cultura Materiale di Genova ha messo a punto un sistema di datazione delle apparecchiature lapidee e in laterizio basato sulla mensiocronologia (Mannoni, Milanese, 1988; Musso, 2004): le caratteristiche dimensionali dei componenti sono confrontate con curve di variazioni cronologiche in contesti geografici e culturali per i quali si disponga di dati certi. Si tratta, quindi, di una valutazione efficace alla scala locale e che trova a volte alcune difficoltà di riscontro: nell’ex convento di S. Caterina a Finalborgo (Savona), per esempio, nonostante l’uso frequente di mattoni, misti o alternati alle pietre, le datazioni mensiocronologiche degli elementi non sono state possibili, perché le misure adottate nel territorio di Finale non seguivano le regole della Repubblica di Genova, né quelle del basso Piemonte (Chiavari *et al.*, 2000). In altri casi, viceversa, la precisione dei riscontri ha fornito potenti strumenti di controllo delle datazioni architettoniche, soprattutto nelle fabbriche minori, come si è ad esempio riscontrato proprio a Genova, Venezia e Bologna.

La presenza di mattoni derivanti dal recupero o da restauri imitativi ottocenteschi crea ancora problemi evidenti per l’applicazione della mensiocronologia e può motivare l’ausilio di tecniche più analitiche, come la termoluminescenza (TL) o l’archeomagnetismo (Arias, 1988), in grado, se applicate con l’adeguata consapevolezza dei dati storico-costitutivi dell’opera, d’integrare o correggere datazioni effettuate con altri mezzi. Nel ninfeo nella villa Sauli a Genova, per esempio, una grotta artificiale databile stilisticamente alla metà del XVI secolo, è stata invece ricondotta al Seicento da un’analisi in TL, confermandosi il riscontro derivante dagli studi mensiocronologici dei mattoni utilizzati nella struttura portante; è stato così completamente ridefinito l’ambito storico-artistico in cui collocare artefici e committenti dell’opera.

Va sottolineato, però, che anche con la TL la valutazione può essere inficiata da un eventuale forte riscaldamento del materiale, tale da provocare la dispersione dell’energia misurata, come avviene nel caso d’incendio: ad esempio, nella chiesa di S. Paragorio a Noli (Savona), databile all’XI secolo, gli scavi archeologici delle fasi paleocristiane hanno messo in luce i resti di un battistero databile – con i reperti di scavo – al V secolo; questo ha subito un incendio risalente, per le indagini al radiocarbonio, al IX secolo e tale evento inficia le valutazioni possibili con la TL.

Un’interessante – ancorché discussa (Brouwet, 1991; Bossoutrot, 1991) – applicazione del metodo del radiocarbonio ( $C_{14}$ ) è nella datazione delle malte che contengono tracce di carbone, incluse durante la cottura del calcare. Nel castello Aghinolfi di Montignoso (Massa Carrara; Gallo, 2002), ad esempio, il



C<sub>14</sub> dei carboni della malta ha consentito di datare il paramento in opera squadrata fra l'XI e il XII secolo; le riparazioni, stratigraficamente posteriori, sono state attribuite, in base ai riscontri cronotipologici, ai secoli XIV-XV, arco temporale circoscritto ulteriormente dalle datazioni TL dei frammenti ceramici contenuti nella malta originale, che hanno tutte indicato il secolo XIV: va sottolineato che i prelievi sono stati effettuati in punti ascrivibili con certezza alla fase costruttiva indagata senza rischiare la selezione di materiali aggiunti durante lavori di manutenzione o restauri successivi.

Gli studi compiuti in Liguria (Chiavari *et al.*, 2000) evidenziano come l'accuratezza scientifica delle indagini non consenta una lettura "meccanica" dei riscontri: i metodi vanno usati in modo combinato, valutando ipotesi alternative e, quindi, sempre servendosi di un approccio critico, basato sulla comprensione storica e tecnologica dell'architettura. Nella cattedrale di Albenga, ad esempio, alcuni laterizi inseriti nell'opera litica della cripta sono stati datati con TL al VII secolo (forse si trattava di tegole che si configuravano sul modulo romano), mentre altri, presenti negli archi e negli oculi in facciata, risalirebbero, secondo la stessa analisi, al VII-IX secolo: i documenti confermano che in questi secoli esisteva già una cattedrale, ma, date le misure e la frammentazione, è più probabile che gli elementi analizzati siano tegole altomedievali reimpiagate nell'XI secolo, epoca alla quale vanno riferite, in base all'analisi muraria, anche le unità stratigrafiche più antiche della chiesa. Valori di TL che rimandano a epoche produttive anteriori rispetto a quelle riconosciute in un'architettura vanno pertanto lette con prudenza, considerando la possibilità di riuso del materiale e valutando sempre il quadro conoscitivo generale che scaturisce dallo studio dell'organismo architettonico: soltanto la coerenza relativa delle informazioni puntuali raccolte sulla fabbrica è, infatti, in grado di fornire la giusta chiave interpretativa. Alla collazione di false certezze, anche se ammantate dell'aura della scientificità, va senza dubbio preferita, perché più utile, meno pericolosa e, stavolta sì, realmente "scientifica", una più onesta restituzione del quadro reale, anche se non esente da dubbi e da problematiche irrisolte.

Analoghe situazioni possono insorgere nella datazione assoluta delle strutture lignee – solai, capriate, pali di fondazione – in cui al radiocarbonio si affianca la dendrocronologia (Castelletti, 1988). Questa può rivelare l'uso di parti costruttive risalenti a epoche precedenti o più tarde delle strutture murarie a cui sono connesse: nel primo caso, le analisi possono evidenziare riutilizzazioni pregresse; nel secondo, l'esecuzione di interventi più o meno ampi di sostituzione e restauro. Va comunque considerato che la dendrocronologia fornisce indicazioni sul momento in cui l'albero è stato tagliato, che può naturalmente non coincidere con quello della sua messa in opera: si pensi a quel solaio ligneo analizzato ad Ancona, risalente al XVII secolo, che presenta alcune travi datate tramite dendrocronologia a più di tre secoli prima (Munafò, Tassi, Zizzari, 2005). Per avere risultati attendibili, in un edificio è importante eseguire numerose campionature: queste consentono l'individuazione delle di-

verse fasi costruttive, compreso il riconoscimento di episodi di riuso, e favoriscono la costruzione o il miglioramento di curve regionali.

Acquisizioni significative dovute alla dendrocronologia sono state ottenute per il Duomo di Treviri o anche per l'abbazia di S. Antimo presso Montalcino, in Toscana. In quest'ultimo caso, in particolare, è stato possibile identificare l'epoca di costruzione della chiesa, rimasta sconosciuta anche dopo approfondite ricerche d'archivio: nelle volte delle navate laterali, infatti, sono stati individuati alcuni elementi in rovere, sicuramente coevi alle murature, databili agli anni intorno al 1150 (Castelletti, 1988). A Roma, sono state studiate in questo modo le capriate in abete bianco e castagno della basilica di S. Maria Maggiore (sostituite con incavallature in rovere in occasione dell'Anno Santo del 1975) e le catene in castagno del Sei-Settecento del teatro Valle di Roma, con interessanti riscontri cronologici rispetto a quanto già noto (*ibid.*).

### 3.1.3. Fra comprensione e diagnostica

Le tecniche diagnostiche aiutano la lettura della fabbrica affiancandosi alle risultanze dell'osservazione diretta e prendono spesso in prestito metodi nati per ambiti scientifici del tutto diversi, come la medicina.

Il caso forse più esemplare è quello costituito dalle indagini endoscopiche (Musso, 2004; Niglio, 2004), che possono aiutare a comprendere alcuni nodi nell'organismo edilizio e chiarirne il funzionamento e le relazioni – anche temporali – fra le parti: la tecnica permette di chiarire, ad esempio, l'eventuale presenza di intercapedini fra setti murari adiacenti, l'andamento di eventuali condutture, la tessitura di solai nascosti da controsoffitti o false volte, la fisionomia delle strutture di fondazione. A questo proposito, si sono ottenuti risultati interessanti con lo studio del Partenone ad Atene (Korres, Fytos, Gregoriades, 1988), il quale ha chiarito le relazioni con il distrutto tempio su cui insiste la fabbrica del v secolo a.C., come pure con le indagini sul chiostro del fiorentino palazzo Rucellai. Qui le endoscopie hanno fornito un apporto molto utile alla valutazione del quadro statico dell'edificio. Nella basilica di S. Maria di Collemaggio a L'Aquila (Bartolomucci, 2004a) e nella chiesa di S. Maria in Valle Porclaneta a Rosciolo (L'Aquila), invece, queste metodologie di indagine hanno contribuito a chiarire le caratteristiche interne delle murature, la presenza di vuoti, il grado di ammorsamento fra i setti murari, i diversi materiali, lo stato di conservazione delle malte, la presenza di apparecchiature di vario tipo e la loro successione (Ceradini, Grillo, 1988).

Le immagini ottenute con le indagini endoscopiche possono essere registrate ed eventualmente trattate per facilitarne la lettura mediante sistemi di selezione cromatica ed equidensimetrica e comunque possono essere confrontate con i risultati di altre metodologie diagnostiche come la termografia (Musso, 2004). Anche questa tecnica aiuta a superare il limite della percezione diretta, consentendo di acquisire informazioni sulla materia costruita al di là

della sua pelle visibile: se su questa e sulla sua composizione, come si è visto, desumiamo informazioni dalle caratteristiche di riflettanza, la termografia fornisce dati sulle componenti nascoste dell'architettura, indagandone l'attitudine a trasmettere o trattenere calore. La tecnica si basa sulla radiazione naturalmente emessa dall'opera per l'alternarsi di raffreddamento e insolazione; questa può essere eventualmente enfatizzata tramite un riscaldamento forzato: visto che materiali e murature diversi offrono diverse risposte in termini di radiazioni emesse, è possibile evidenziare soluzioni di continuità orizzontali e verticali, aperture tamponate, presenza di vuoti o condutture che possono essere ispezionate con endoscopie. La termografia è uno strumento utile per riconoscere la presenza di componenti costruttive omogenee, anche quando queste siano nascoste da intonaco, e indirizzare, per esempio, l'esecuzione di piccoli saggi in grado di chiarire le caratteristiche del singolo evento costruttivo. Il metodo risulta particolarmente utile quando s'indaghino murature completamente affrescate, come è accaduto in palazzo Guadagni Strozzi Sacratì a Firenze, dove è stato in tal modo possibile identificare interventi, come aperture e chiusure di camini e canne fumarie, individuare i diversi tipi di apparecchiatura muraria e le loro relazioni con le vicende costruttive della fabbrica, distinguere lesioni superficiali e lesioni passanti, chiarire che le volte (talora indagate anche con indagini endoscopiche) sono realizzate in incannucciate agganciate a centine (a loro volta collegate al solaio ligneo di cui è distinguibile l'orditura). Analoghi contributi alla conoscenza della fabbrica sono stati ottenuti tramite le termografie nell'ex chiesa dei Battilani a Firenze, dove sono state evidenziate le possibili presenze di cavità al di sotto del piano di calpestio e le situazioni di discontinuità nella tessitura muraria, nonché le zone interessate da fenomeni di umidità capillare (Seriani *et al.*, 2005). L'impiego della termografia per il rilevamento dell'umidità, fra l'altro, ha trovato numerose e proficue applicazioni: si ricordano, a titolo esemplificativo, le indagini sui pavimenti musivi della villa del Casale a Piazza Armerina (Candela, Guerrisi, Gallochio, 2006) e sulle strutture in cemento armato dell'Hangar di Augusta (di Maria, 2003). Nel palazzo di Diocleziano a Spalato (Almesberger, Rizzo, Radivo, Rizzo, 2006), invece, questa tecnologia diagnostica è stata usata per accertare la presenza di eventuali distacchi nelle colonne: le soluzioni di continuità costituiscono infatti una barriera isolante facilmente evidenziabile con immagini in falsi colori.

La presenza delle interruzioni nel tessuto murario può essere registrata anche attraverso le prove soniche e ultrasoniche, molto usate nella diagnostica che precede gli interventi di consolidamento e nelle successive verifiche della loro efficacia. Questo tipo di prove può contribuire alla lettura dell'edificio e delle sue fasi costruttive, evidenziando soluzioni di continuità riferibili a una successione di fasi o di diverse modalità costruttive: nei citati studi sulla chiesa di S. Maria in Valle Porclaneta a Rosciolo (L'Aquila) e sulla basilica di S. Maria di Collemaggio a L'Aquila (Ceradini, Grillo, 1988), ad esempio, le indagini soniche sono state usate per distinguere le murature omogenee in termini di

percentuale dei vuoti e caratteristiche dei materiali componenti, mentre nel palermitano palazzo Comitini questa modalità di indagine è stata adoperata su un pavimento maiolicato per individuare le aree di distacco dal supporto, per ampi tratti disgregato, e guidare l'intervento di restauro (Spatafora, Tomaselli, Ventimiglia, 2006).

La gravimetria e la microgravimetria consentono, invece, di raccogliere informazioni circa la presenza di cavità profonde nel sottosuolo, relative per esempio a cisterne o a condutture antiche e moderne; tali analisi misurano le variazioni delle componenti verticali della gravità in diversi punti del terreno. Questa tecnologia è stata adoperata, ad esempio, nello studio della Piramide di Cheope, per verificare l'eventuale presenza di camere non conosciute (Bui *et al.*, 1988), e in quello della Casa dei Vettii a Pompei, per chiarire la presenza di cisterne e condutture. In quest'ultimo caso sono state effettuate 368 verifiche sui nodi di una griglia di 2 m × 2 m, così da individuare cavità, vuote o con acqua, disposte a una profondità non superiore a 7-8 metri (Di Filippo, Prisco, Toro, 2001).

La microgravimetria è stata affiancata all'uso del georadar, che consente l'individuazione sia di cavità che di reperti archeologici grazie alla lettura della propagazione delle onde elettromagnetiche nel sottosuolo, che varia in base alle proprietà elettriche (costante dielettrica e conducibilità elettrica) dei materiali: l'acqua, ad esempio, ha un'alta capacità riflettente e, per questo, costituisce un ostacolo alla penetrazione delle onde, anche quando è presente come umidità del terreno. Questa tecnologia è stata usata nel chiostro del Camposanto monumentale di piazza dei Miracoli a Pisa, per individuare i resti archeologici dell'antico battistero, e ha offerto risultati molto interessanti nello studio del progetto di Pietro da Cortona per la facciata di S. Maria della Pace a Roma, ideata unitamente alla configurazione della piazza antistante (Dal Mas, 1998; Malagodi, 1998): chiarendo la posizione dei setti murari al di sotto del calpestio della piazza, il georadar ha permesso di ricostruire la configurazione dello spazio urbano prima dell'intervento del Cortona e apprezzare, quindi, la portata innovativa del percorso progettuale dell'architetto, contribuendo in modo significativo alla sua conoscenza. Se non sempre i risultati offerti dalle prospezioni con georadar e microgravimetria portano a risultati altrettanto chiari, va sottolineato che le indicazioni fornite possono comunque essere intrecciate con altri tipi di indagini e guidare, ad esempio, l'esecuzione di sondaggi in zone specifiche.

Il georadar può essere utilizzato anche su superfici verticali (De Pasquale *et al.*, 2001), come è accaduto per la cattedrale di Toledo: qui, sotto il pavimento della navata centrale è stata individuata una cripta, mentre sulla parete esterna della cappella Mazarabe è stato identificato l'andamento della struttura muraria e nella cappella di S. Blas sono state circoscritte le sacche di umidità esistenti. Altra interessante applicazione è stata effettuata sulla volta della basilica superiore di S. Francesco ad Assisi, con l'individuazione delle lesioni pro-

dotte dal sisma del 1997 e delle deformazioni geometriche presenti sulle strutture di sostegno.

Le indagini magnetoscopiche, grazie all'impiego di onde elettromagnetiche particolarmente penetranti (raggi  $\gamma$ ) emesse da un pacometro, consentono di rilevare nella muratura la presenza di elementi a bassa trasparenza come i metalli (Matteini, Moles, 1984). Si possono in tal modo localizzare anche di ancoraggio, tiranti, capichiave, armature nel calcestruzzo, sì da consentire l'identificazione dei restauri subiti dalle fabbriche e lo studio di manufatti in cemento armato (come nel già citato Hangar di Augusta; di Maria, 2003). L'emissione e la registrazione di raggi  $\gamma$  a partire dal 1975 ha consentito di individuare numerosi rinforzi metallici inseriti nel corso dei restauri di fine Ottocento e inizio Novecento nell'Eretteo di Atene (Korres, Fytos, Gregoriades, 1988). È stato in tal modo possibile affrontare alla radice i seri fenomeni fessurativi indotti sul monumento proprio dall'ossidazione di tali elementi.

Altre informazioni su restauri pregressi sono state ottenute nella basilica di S. Maria di Collemaggio a L'Aquila (Bartolomucci, 2004b), dove l'indagine elettromagnetica ha fornito informazioni su interventi realizzati con il cemento armato in varie epoche, individuando cordoli sulle murature longitudinali, speroni di consolidamento della facciata, nonché il nucleo di un pilastro rivestito in pietra (Ceradini, Grillo, 1988).

In conclusione, queste indagini diagnostiche, perlopiù promosse da problematiche di natura conservativa, presentano importanti potenzialità anche per la conoscenza approfondita dell'architettura, della sua genesi costruttiva e delle vicende trascorse. Lunghi dal presentarsi quali semplici occasioni di erudizione, i dati storici che, ben veicolati e interpretati, possono scaturire da questo particolare filone di ricerca forniscono utili apporti alla comprensione generale delle opere (da ricondurre sempre al relativo contesto storico e culturale che le ha prodotte e le ha viste trasformare).

Se fino a oggi si è molto lavorato per mettere a punto tecnologie e metodiche, risulta adesso più che mai urgente approfondire e sperimentare le modalità necessarie per non disperdere e per integrare correttamente, all'interno di un quadro storico-critico complessivo, i risultati che derivano da questi sforzi.

### 3.2

#### Documentazione informatica

##### 3.2.1. Il problema della documentazione nel restauro

Nell'attività conservativa, la documentazione possiede un'importanza fondamentale, poiché ha il duplice scopo di testimoniare i restauri eseguiti su un'opera, a salvaguardia della sua autenticità, e, allo stesso tempo, di conservare le informazioni relative allo stato di conservazione di un bene. Queste ultime infatti, registrate in un dato momento (documentazione *ante* e *post operam*, veri-

fiche successive), costituiscono preziosi strumenti per controlli periodici mirati a verificare l'evoluzione del degrado nel tempo e la relativa velocità; tale indicazione è essenziale per programmare con le giuste priorità gli interventi effettivamente necessari.

La prima finalità, ovvero l'esigenza di documentare i lavori, era stata manifestata chiaramente fin dalle prime formulazioni teoriche del restauro: a partire dai principi enunciati da Camillo Boito nel 1883, i concetti di "distinguibilità" delle parti reintegrate e di "documentazione" degli interventi eseguiti si sono precisati ed evoluti attraverso le successive Carte, che fissavano norme e criteri per il restauro (*Carta Italiana del Restauro*, del 1931; *Istruzioni per il Restauro dei Monumenti*, del 1938; *Carta di Venezia*, del 1964; *Carta del restauro del Ministero della pubblica istruzione*, del 1972); in esse si raccomandava di documentare accuratamente lo stato di conservazione dell'opera, prima, durante e dopo i lavori, in modo da testimoniare chiaramente quanto su di essa era stato effettuato.

L'obiettivo della gestione delle informazioni sullo stato di conservazione di un bene si deve confrontare necessariamente con la recente evoluzione delle tecnologie applicate per lo studio diagnostico-conoscitivo; tale sviluppo ha consentito notevoli approfondimenti, ma ha pure comportato la produzione di una significativa quantità di dati, spesso frammentari e disomogenei e per questo difficilmente utilizzabili in studi successivi; nasce così la necessità di utilizzare sistemi informativi per la raccolta e la gestione della documentazione storica e scientifica.

All'esigenza primaria di illustrare i restauri per renderli riconoscibili si sono così aggiunte, in seguito, nuove necessità di documentazione, sempre più complesse e differenziate: dalle informazioni di tipo "conoscitivo", utili per la gestione, la valorizzazione e la fruizione dei beni culturali, a quelle di tipo "conservativo", di supporto alla salvaguardia e alla conservazione. Si può affermare, quindi, che le logiche della documentazione nel restauro sono molteplici e spesso in relazione tra loro, ma, in linea generale, si possono individuare, tra le diverse esperienze, due finalità principali:

- conoscere l'oggetto e comunicarne il significato e i valori;
- costituire una base di informazioni necessarie per la conservazione.

Oggi con il termine "documentazione" vengono descritte essenzialmente due attività: la raccolta di informazioni relative alla storia, alle caratteristiche fisiche, ai problemi conservativi di monumenti e siti, nonché il processo di organizzazione, gestione e conservazione dei dati raccolti (Leblanc, Eppich, 2005). La prima attività descrive, di fatto, il processo conoscitivo che è alla base di un serio studio preliminare per il restauro, mentre la seconda rielabora i dati e le conoscenze acquisite, organizzandole in un "sistema di informazioni" accessibili in futuro.

Una documentazione efficace, infine, è essenziale anche dopo l'intervento conservativo, per il monitoraggio, la gestione e la programmazione degli interventi manutentivi; un'opportuna base informativa è importantissima, quindi,

per l'ordinaria gestione del patrimonio, ma diventa preziosa soprattutto in caso di emergenza, quando le condizioni in cui si è costretti a operare rendono impossibile la conduzione di studi preliminari esaustivi sull'opera.

### 3.2.2. La documentazione dello stato di conservazione

La necessità di una conoscenza approfondita della storia conservativa e degli interventi eseguiti su un'architettura storica, che si affianchi alle informazioni relative ai materiali costitutivi e allo stato di conservazione, è stata già evidenziata da tempo da diverse autorevoli voci; tuttavia, ancora oggi alla difficoltà di raccogliere informazioni certe sui restauri compiuti in passato (per la scarsità o la completa assenza di fonti documentarie) si aggiunge spesso anche l'impossibilità di accedere a documentazioni in grado d'illustrare in maniera adeguata gli interventi più recenti.

Un'opportuna raccolta di dati sarebbe necessaria, come già anticipato, anche per conservare e organizzare i risultati delle indagini tecnico-scientifiche, resi così disponibili per approfondimenti ulteriori; molto spesso, infatti, «gli apporti specialistici [...] non concorrono unitariamente alla risoluzione di un problema, ma vivono di una loro separatezza che è il segno più chiaro della reale difficoltà di dialogo tra le professionalità solitamente implicate [...] nelle operazioni di conservazione» (Cordaro, 1990, p. 155).

Risultano pertanto chiare la necessità e l'importanza di utilizzare strumenti per la documentazione in grado di archiviare tutte quelle informazioni preziose per la conservazione che, generalmente, rischiano di essere smarrite nel giro di pochi anni; strumenti di tal genere faciliterebbero il confronto fra i diversi apporti specialistici e consentirebbero d'integrare più facilmente i risultati, perlopiù diversi e parziali, utili all'elaborazione di una sintesi critica efficace.

La documentazione può costituire, in questo modo, uno strumento per realizzare un reale e proficuo confronto fra le diverse discipline implicate nel processo di conservazione; a questo proposito già Cesare Brandi osservava che «mentre si fanno sempre più vive le esigenze della interdisciplinarietà, le singole scienze si sviluppano in modo così autonomo e con un linguaggio formalizzato così particolare ad ognuna, che i contatti divengono sempre più difficili» (Brandi, 1976, p. 615).

L'obiettivo di realizzare una base informativa per valutare e monitorare nel tempo lo stato di conservazione di un'opera, tuttavia, non può essere semplicemente ricondotto alla raccolta di "mappature" dei materiali e del loro degrado, ma deve muovere da una preliminare e approfondita conoscenza storico-critica della fabbrica e delle sue vicende costruttive e conservative. Tale conoscenza è fondamentale per una corretta interpretazione delle patologie in atto e delle relative cause, ma è basilare anche per impostare correttamente le indagini scientifiche. È necessario, dunque, raccogliere tutte le informazioni relative alla storia costruttiva, alle tecniche esecutive, ai diversi restauri eseguiti nel tempo, oltre ai risultati delle indagini svolte sui materiali e sulle strutture;

si tratta una molteplicità di dati raramente disponibili, che presuppongono uno studio rigoroso e opportuni tempi di approfondimento. Le informazioni di questo tipo, inoltre, provengono da fonti differenti (bibliografiche, archivistiche, indagini dirette, orali ecc.) e costituiscono una mole di materiale disomogeneo e disorganizzato (studi, relazioni tecniche, perizie e computi, disegni, fotografie, filmati, immagini ecc.) che non è sufficiente mettere insieme, ma che deve essere organizzata in modo da costituire una base di dati effettivamente accessibile e aggiornabile in futuro; l'impiego della strumentazione informatica fornisce oggi un'importante risorsa per gestire una documentazione così vasta e complessa secondo criteri di strutturazione dei dati generalmente validi e condivisibili.

In linea generale, sono stati delineati già da tempo alcuni principi per articolare le informazioni in una serie di "sottosistemi" informativi: tipologico-anagrafico, storico-conservativo (includendo in questo settore, solitamente, i procedimenti costitutivi e lo stato di conservazione), diagnostico e degli interventi; a queste categorie di dati si aggiunge la documentazione grafica, cioè il "modello dell'opera" cui le informazioni devono essere correlate (Sacco, 1993, 2002).

Un'esigenza peculiare della disciplina del restauro, infatti, è quella di doversi necessariamente riferire a una documentazione grafica, che diventa il principale strumento di comunicazione e di sintesi delle informazioni, al quale possono essere associate relazioni descrittive e fotografie. Si sottolinea qui che il disegno è un atto critico, in cui l'individuazione di "che cosa" rappresentare, di "come" farlo e del "perché" si basa su scelte consapevoli, compiute osservando con attenzione l'oggetto e comprendendone il significato; dunque, la graficizzazione di un'architettura non può essere equiparata direttamente a una fotografia, la quale registra passivamente un'immagine in un dato momento senza fornire una mirata selezione di informazioni (se non quelle che derivano dalle particolari condizioni di visibilità, luce/ombra, contrasto ecc.). A maggior ragione, le necessarie mappature dei materiali e l'analisi dello stato di conservazione non possono essere compiute su fotografie, strumenti utili di supporto, ma assolutamente non sostitutivi di osservazioni dirette sull'opera.

### 3.2.3. Le prime esperienze di "documentazione informatizzata"

Negli ultimi decenni, con la progressiva diffusione delle tecnologie informatiche, si è reso evidente che il problema della documentazione nel campo della conservazione dei monumenti può ricevere dal settore dell'*Information and Communication Technology* un contributo determinante. A partire dallo scorcio del secolo scorso, infatti, si sono elaborate numerose applicazioni di questa tecnologia per "informatizzare" la materia dei beni culturali, sia a livello generale, sia alla scala del singolo bene. La ricerca e le sperimentazioni compiute sono molto varie e, muovendo da esigenze espresse in campo architettonico



(Torraca, 1988), lo studio sulla gestione della documentazione è stato sviluppato, con notevoli apporti, anche in altri settori conservativi.

Alcune sperimentazioni importanti derivano dall'ambito del restauro pittorico, soprattutto dei dipinti murali, dove le esperienze di documentazione sembrano quasi aver superato, allo stato attuale, la quantità e la ricchezza di proposte elaborate per l'architettura.

Tra i primi casi di "documentazione informatizzata" si colloca l'esperienza della banca dati, realizzata a partire dal 1986, per i restauri sui dipinti di Michelangelo nella Cappella Sistina in Vaticano; nel corso del restauro, infatti, era stata condotta una campagna fotografica talmente accurata che, nel giro di qualche anno, la massa di dati sarebbe divenuta non consultabile (Mancinelli, 1994). Si decise quindi di ricorrere alle tecnologie informatiche per archiviare i dati relativi all'intervento (15.000 fotografie e 45 km di pellicola filmata, relative ad oltre 1.000 mq di superficie dipinta); a questo scopo fu realizzato un rilievo fotogrammetrico della volta e dei dipinti, da utilizzare come base grafica di riferimento per le informazioni di dettaglio, costituite da una serie di riprese fotografiche eseguite prima, durante e dopo i lavori, e da annotazioni diverse relative a tecniche esecutive, stato di conservazione, indagini compiute e intervento di restauro (Borrelli, Laurenzi Tabasso, 1994; Mancinelli, 1994).

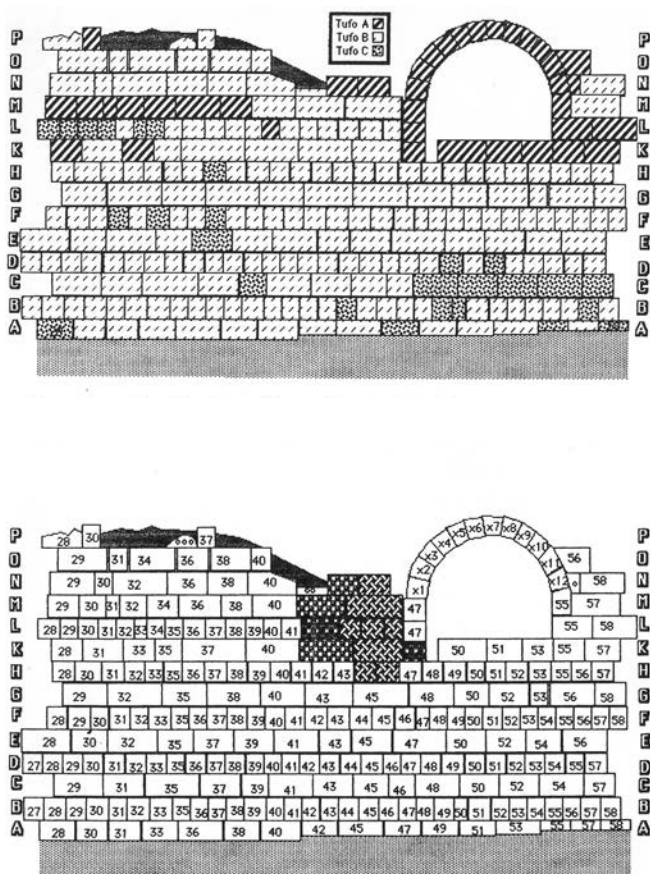
Dopo questa esperienza, diverse altre interessanti sperimentazioni, sempre nel campo del restauro pittorico, sono state illustrate in vari convegni; fra di esse si ricorda il seminario di ricerca organizzato nel 1999 a cura dell'ICCROM (International Centre for the Study of the Preservation and Restoration of Cultural Property) su *GraDoc. Graphic Documentation Systems in Mural Painting Conservation* (Schmid, 2000).

Tra le prime applicazioni pratiche di documentazione "informatizzata" per la conservazione architettonica vi è la "registrazione computerizzata" dello stato di conservazione delle superfici di interesse monumentale realizzata per il chiostro di S. Chiara a Napoli e per le mura serviane a Roma (FIG. 3.15); in entrambi i casi, il software impiegato per archiviare i dati permette di associare direttamente le informazioni sullo stato di conservazione (materiali e degrado) a un riferimento grafico – una rappresentazione molto sintetica degli oggetti di studio – che permette di localizzare le diverse informazioni (Ferragni, Malliet, Torraca, 1987).

Tale intuizione, cioè la necessità di "localizzare" esattamente le informazioni contenute nella base di dati (Torraca, 1988), verrà ripresa e affinata successivamente, trovando uno strumento risolutivo, come si vedrà più avanti, nell'uso dei sistemi informativi geografici.

Più tardi, in occasione dei restauri condotti sulla facciata di S. Andrea della Valle a Roma, venne proposto un prototipo di "archivio multimediale" per la consultazione della documentazione relativa al restauro. In questo caso il disegno della facciata è diviso in *tranches* su cui "cliccare" per accedere alla

FIGURA 3.15  
Una schermata del software per archiviare i dati sullo stato di conservazione delle mura serviane a Roma



Nel disegno viene rappresentato un tratto delle mura con la numerazione dei conci e le informazioni contenute nel database su materiali, degrado e interventi eseguiti.

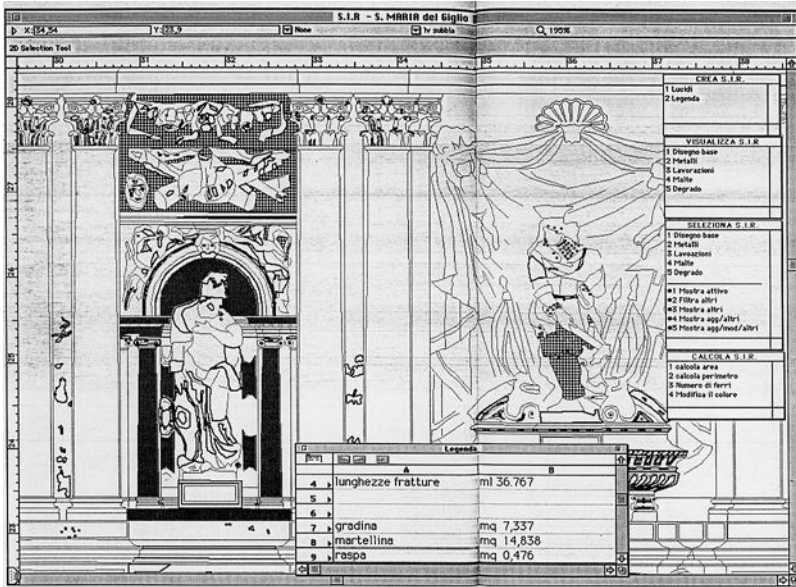
Fonte: Ferragni, Malliet, Torraca (1987).

visualizzazione dei vari documenti relativi alle zone individuate; i dati (appunti, fotografie, registrazioni vocali ecc.) non sono strutturati, ma solo raccolti per essere visualizzati tramite computer. Lo scopo è di rendere accessibile, per studi e interventi successivi, un materiale d'archivio di difficile reperimento e consultazione; la consultazione, dunque, risente di un approccio molto semplificato, senza alcuna pretesa di organizzazione dei dati (Benso, Omet, 1995).

Nel 1997 un sistema per la gestione dei rilievi (Torsello, 1997) illustra, per

FIGURA 3.16

Una schermata del sistema informativo per la gestione dei dati sulla facciata di S. Maria del Giglio a Venezia



Il programma consente di visualizzare su una base grafica le informazioni relative a materiali, lavorazioni superficiali, degrado.

Fonte: Torsello (1997).

la facciata di S. Maria del Giglio a Venezia, un modello informativo di tipo geografico, ovvero basato sull'interazione fra il rilievo dell'oggetto e un archivio di dati (FIG. 3.16). In questo caso le informazioni registrate sono relative ai materiali, alle lavorazioni superficiali, al degrado, in vista della definizione del progetto di restauro: la logica geografica permette, infatti, di selezionare opportune viste tematiche (ad esempio relative al degrado) e di misurarne esattamente i vari elementi (Torsello, 1997).

La predisposizione di uno strumento utile alla “conservazione programmata” orienta anche alcune altre esperienze di documentazione informatizzata, come quella elaborata per l'intervento sulla chiesa parrocchiale di Vilminore di Scalve, presso Bergamo. In questo caso è stato sperimentato un “progetto ipermediale” per la registrazione sistematica di tutti i dati riguardanti la programmazione e il cantiere di restauro; non si tratta ancora di un sistema informativo di tipo geografico, ma di un software che consente di consultare, attraverso collegamenti ipertestuali, la documentazione relativa al manufatto, che viene suddivisa per sezioni: materiali e tecniche, vicende conservative, stato di conservazione, diagnostica, intervento previsto, manutenzione programmata (Treccani, 2000).

### 3.2.4. I sistemi informativi geografici per la documentazione in ambito conservativo

I GIS (*Geographic Information Systems*, sistemi in grado di gestire informazioni con riferimento geografico) nascono negli anni ottanta come strumenti di analisi e gestione di dati territoriali; essi possono in realtà essere applicati alle scale più diverse: basta utilizzare come basi grafiche, al posto delle mappe geografiche, disegni a scala ridotta, relativi a un contesto territoriale più limitato (come la città o un settore urbano) o anche a un singolo manufatto.

Come già accennato, l'uso della tecnologia GIS fornisce un contributo risolutivo al problema della documentazione, poiché permette una relazione "topologica" fra l'archivio dati e la rappresentazione grafica dell'oggetto, quindi consente di localizzare esattamente ogni informazione. L'uso dei sistemi informativi geografici comporta, dunque, il passaggio da una logica informativa finora basata su "schede" a un'organizzazione dei dati in archivi relazionali geografici, che integrano l'aspetto descrittivo a quello grafico.

Rispetto agli strumenti grafici più noti (tipo CAD, ovvero *Computer Aided Design*), i sistemi GIS, oltre a fornire la possibilità di un disegno vettoriale, contengono quindi un database, ovvero un archivio di informazioni riferite a una base cartografica.

Tra le caratteristiche fondamentali dei GIS, oltre alla capacità di "georeferenziare" le informazioni, vi è la possibilità d'integrare dati disomogenei (dati "vettoriali": disegni tipo CAD; dati "raster": cartografia e immagini acquisite tramite scanner; dati alfanumerici o "attributi" degli oggetti grafici: informazioni organizzate in database), consentendo anche elaborazioni complesse (quantitative, statistiche, modellazioni, previsioni ecc.). La consultazione dei dati può avvenire con un semplice "clic" sul disegno, oppure tramite specifiche *queries* nell'archivio dati (ricerca per singole parole chiave, oppure SQL, cioè *Structured Query Language*, interrogazioni strutturate secondo condizioni prestabilite).

Sulla base delle nuove potenzialità offerte dai sistemi informativi geografici, che mostrano ampie possibilità di applicazione, si collocano le esperienze compiute nell'ultimo decennio, fra le quali si citano il sistema informativo per la documentazione del restauro sulle superfici lapidee della Torre di Pisa (AKIRA GIS Server), realizzato dall'Istituto Centrale per il Restauro e dal Centro ricerche informatiche per i beni culturali della Scuola Normale Superiore di Pisa (Capponi *et al.*, 2001; D'Elia *et al.*, 2005). In questo caso è stato messo a punto un sistema informativo specifico con lo scopo di documentare esattamente lo stato di fatto e gli interventi compiuti; la complessità dell'opera rendeva necessario gestire una notevole quantità di dati relativi ai differenti materiali, ai diversi tipi di degrado che essi presentavano, alle indagini compiute e agli interventi conservativi effettuati. Il software consente di localizzare le informazioni sulla rappresentazione geometrica del manufatto (ottenuta dal rilievo fotogrammetrico); in questo caso, la particolare morfologia dell'og-

getto ha evidenziato la difficoltà di utilizzare solo riferimenti grafici bidimensionali, imponendo di scomporre la torre in una serie di elementi architettonici (TAV. IIIa).

Le informazioni registrate nel sistema sono relative, sostanzialmente, alla mappatura dei litotipi e delle tipologie di degrado (con un preciso riferimento cronologico); per ogni singolo concio è possibile conoscere la superficie e l'estensione delle forme di alterazione relative e, quindi, compiere elaborazioni quantitative e statistiche sulla distribuzione dei diversi fenomeni (come sovrapporre il degrado ai litotipi, oppure tipi di degrado diversi). Il sistema informativo ha consentito di programmare con precisione le operazioni di restauro e di documentare esattamente tutti i tipi di intervento eseguiti, che possono essere ripercorsi in sequenza cronologica; il sistema è stato poi concepito anche per gestire eventuali informazioni acquisite successivamente, in vista del monitoraggio futuro.

Sperimentazioni analoghe sono state svolte, parallelamente, anche in altri ambiti, in particolare nel campo delle tecnologie applicate alla conoscenza dei beni culturali; all'interno di un progetto CNR sulle tecniche di acquisizione automatica di immagini è stato proposto un sistema informativo geografico in cui archiviare dati anagrafici, geometrici, tecnico-costruttivi e sul degrado (ARKIS, ovvero *Architecture Recovery Knowledge Information System*). Le sperimentazioni vanno dalla scala architettonica (Teatro Romano di Aosta) a quella territoriale e le informazioni archiviate sono relative a: dati geometrico-dimensionali, caratteristiche dei materiali e patologie di degrado (Salonia, 2000; Salonia, Negri, 2001).

### 3.2.5. La documentazione a livello territoriale: la Carta del Rischio del patrimonio culturale e il Sistema informativo generale del catalogo

Un'esperienza importante per la documentazione informatica con strumenti GIS applicati, in questo caso, all'intero territorio nazionale, è legata al progetto "Carta del Rischio del patrimonio culturale", avviato all'inizio degli anni novanta dall'Istituto Centrale per il Restauro (oggi Istituto Superiore per la Conservazione ed il Restauro), del Ministero per i Beni e le Attività Culturali.

Il fine del progetto era di elaborare un sistema in grado di individuare rapidamente, nell'ambito dell'esteso patrimonio italiano, i beni più esposti a rischio di degrado o di perdita, così da facilitare la programmazione degli interventi più urgenti sulla base di una valutazione oggettiva. L'idea centrale della "Carta del Rischio" è quella di collegare l'archivio di informazioni sui singoli monumenti al territorio in cui si trovano, perché la possibilità di perdita – come appare evidente all'insorgere di catastrofi naturali – non dipende solo dallo stato di conservazione dei manufatti, ma è collegata alle caratteristiche e alla pericolosità del territorio (TAV. IIIb).

Il rischio, dunque, viene considerato in funzione di due differenti grandez-

ze: la pericolosità, ovvero la probabilità che si verifichino eventi dannosi (legata alle caratteristiche del territorio) e la vulnerabilità, intesa come attitudine del bene a essere danneggiato (connessa alle sue caratteristiche costitutive e allo stato di conservazione). La pericolosità del territorio è definita da tre domini: statico-strutturale (cioè caratteristiche geomorfologiche quali sismicità, frane e dissesti, subsidenza, esondazioni, dinamica dei litorali, valanghe, pericolosità vulcanica); ambiente-aria (fattori climatici e microclimatici, inquinanti, aerosol); antropico (dinamiche demografiche e socioeconomiche, come abbandono delle aree, concentrazione della popolazione, pressione turistica, suscettibilità al furto). La vulnerabilità del bene è valutata sulla base dei seguenti parametri: caratteristiche di superficie; caratteristiche costruttive e statico-strutturali; uso e sicurezza (Accardo, 1998b; Accardo *et al.*, 2003).

Il censimento del patrimonio fa riferimento a tre categorie di beni: archeologici, architettonici e contenitori museali di beni mobili. Il “modello schedografico” di ogni singolo bene è articolato in due sezioni principali, rispettivamente dedicate alle informazioni anagrafico-identificative e allo stato di conservazione (quest’ultima, a sua volta, è suddivisa in due possibili livelli di approfondimento). L’acquisizione delle informazioni sulla vulnerabilità dei beni avviene attraverso la fase di “schedatura conservativa”, che prevede una valutazione metrica dei singoli elementi di cui l’oggetto è costituito e una stima dell’estensione e della gravità delle differenti forme di degrado che si riscontrano su di esso. Il tracciato delle schede conservative prevede un primo livello di analisi (scheda sintetica), i cui dati vengono utilizzati per il calcolo dell’indice di vulnerabilità, e un secondo livello di approfondimento (scheda analitica), che procede nella valutazione dello stato di conservazione con un’analisi di maggior dettaglio ed è corredato di basi grafiche per la mappatura delle forme di alterazione riscontrate (*Carta del Rischio*, 1996; Accardo, 2000).

Oltre alla Carta del Rischio, il Ministero per i Beni e le Attività Culturali dispone di altri sistemi per la gestione delle informazioni relative al patrimonio culturale nel territorio nazionale; fra questi si ricordano il Sistema informativo generale del catalogo realizzato dall’Istituto Centrale per il Catalogo e la Documentazione (ICCD). Il SIGEC è la banca dati di riferimento per la catalogazione del patrimonio culturale, realizzata sulla base della digitalizzazione delle schede ICCD, che fissano i criteri standard di catalogazione a livello nazionale. Il sistema consente d’integrare in un unico contesto i dati conoscitivi relativi a beni di diversa natura (monumenti architettonici, beni e complessi archeologici, parchi e giardini, opere d’arte ecc.), normalmente oggetto di aree di competenza di amministrazioni diverse. Le informazioni contenute sono di tipo anagrafico-descrittivo (oggetto, localizzazione, notizie storiche, condizione giuridica e vincoli, provvedimenti di tutela, riferimenti bibliografici e archivistici, documentazione grafica ecc.), ma è prevista anche la possibilità d’inserire dati relativi alla georeferenziazione degli edifici (coordinate IGM).

### 3.2.6. La documentazione a livello del singolo oggetto: esperienze recenti

Parallelamente alle sperimentazioni compiute nella Carta del Rischio, era stata avvertita da tempo anche la necessità di uno strumento di documentazione relativo al singolo oggetto, una sorta di “cartella clinica” in cui archiviare le informazioni utili alla conservazione del bene (Torraca, 1988; Cordaro, 1990; Urbani, 2000).

Le esperienze sopra citate evidenziano il contributo determinante che gli strumenti GIS possono fornire al problema della documentazione nel restauro; risulta evidente, tuttavia, che tale questione non ha ancora trovato una metodologia unica e universalmente valida. Nonostante alcune riflessioni di metodo (Sacco, 2002, 2006; Buzzanca, 2003), rimane ancora da definire completamente la “struttura” della documentazione, ovvero come consentire, pur nell’ambito di una molteplicità di casi particolari, una “normalizzazione” del sistema informativo, indispensabile ai fini dello scambio dei dati fra utenti diversi e della gestione di archivi numerosi e diversificati fra loro.

Al di là dei problemi posti dagli aspetti tecnologici dei sistemi informativi, in continua e rapida evoluzione, si avverte la necessità di rivolgere maggiore attenzione ai contenuti, ovvero al tipo e alla qualità delle informazioni da archiviare; d’analogia importanza appare la conseguente necessità di provvedere a regole chiare ed efficaci sull’organizzazione di queste informazioni in un archivio che possa essere consultato e aggiornato agevolmente.

Come già osservato, alcune sperimentazioni sembrano limitarsi a registrare informazioni tecniche sui materiali e sul degrado e forniscono quindi una visione parziale e deformata dei problemi affrontati, mentre è indispensabile che l’informazione storica assuma, in un sistema di documentazione per il restauro, una specifica centralità.

Sulla base di tali considerazioni è stata proposta e sperimentata una “cartella clinica” per la facciata di S. Maria di Collemaggio a L’Aquila, nell’ambito di uno studio più generale condotto sull’edificio (Bartolomucci, 2003, 2004a, 2004b). Le informazioni presenti nella cartella clinica – georiferite al rilievo fotogrammetrico della facciata – sono: analisi storico-critica (cronologia, individuazione delle fasi costruttive); restauri eseguiti in passato; analisi strutturale (tecnologie costruttive, quadro fessurativo); interventi conservativi eseguiti (localizzazione, tipo di intervento, data, materiali usati, controlli periodici); indagini diagnostiche e saggi conoscitivi (localizzazione, tipo di indagine, scopo, risultato, data); tipi di degrado (e relative cause). A queste informazioni possono essere aggiunte tutte le immagini utili a documentare l’oggetto, sia storiche che attuali, anch’esse georiferite. In particolare, a ogni concio lapideo del paramento bicromo della facciata sono riferite le seguenti informazioni: tipo di materiale; presenza di lavorazioni superficiali; datazione (ovvero se si tratta di elemento originario o di reintegrazione); tipologie di alterazione/degrado (con la possibilità di graduarne le relative intensità); trattamenti eseguiti (TAV. IVA).

Le informazioni sono registrate su “strati” (*layers*) differenti e possono essere messe in relazione tra di loro, ogni volta, in vario modo; lo scopo è quello di definire, per esempio, l’individuazione delle zone maggiormente interessate dal degrado e pianificare i controlli nel monitoraggio, nonché di valutare, tramite rilevazioni periodiche dello stato di conservazione, la velocità di evoluzione del degrado nel tempo.

Negli ultimi anni l’impiego dei GIS si è ulteriormente diffuso, anche se rimangono relativamente poche, in particolare nel campo della conservazione architettonica, le esperienze di documentazione che ne fanno uso. Tra le sperimentazioni più recenti si segnalano:

- il GIS per la documentazione finalizzata a un piano di “conservazione programmata” elaborato, in base a successivi approfondimenti, per la chiesa di Vilminore di Scalve (Bergamo); in questo caso è stato predisposto un database organizzato in tre sezioni: anagrafico-descrittiva, vicende conservative e piano di manutenzione (Treccani, 2006; Coccoli, Scala, 2006);

- un database geografico, denominato “GIS dei restauri”, sperimentato dal Laboratorio di fisica dell’Istituto Superiore per la Conservazione e il Restauro per la cripta di S. Magno nel Duomo di Anagni; esso raccoglie le informazioni relative allo stato di conservazione degli affreschi, alla posizione e alla tipologia dei danni subiti, alle indagini diagnostiche, ai rilevamenti dei parametri microclimatici, ai restauri eseguiti (Cacace, 2006). Tale strumento di documentazione è stato successivamente applicato anche a casi diversi, tra cui la documentazione per le indagini e il restauro di siti archeologici quali la *domus* dei *Coiedii* a Castelleone di Suasa (Ancona) e le grotte di Ajanta in India; anche in questo caso il GIS permette di raccogliere e organizzare i dati che interessano lo stato di conservazione e le informazioni sul restauro (TAV. IVb). In sintesi, il “GIS dei restauri” è un prodotto integrato tra un sistema geografico informativo (GIS) e un database relazionale (RDBMS) che consente un’efficiente gestione delle informazioni generate da indagini storiche, conservative e scientifiche su siti architettonici o archeologici;

- un database per la documentazione dei restauri, denominato *Modus Operandi*, elaborato con la consulenza scientifica dell’Opificio per le Pietre Dure. In questo caso è stato messo a punto un software per archiviare, attraverso procedure standardizzate, i dati relativi agli interventi di restauro e renderli fruibili a tipologie diverse di utenti (restauratori, soprintendenze ecc.). Particolare attenzione è dedicata alla struttura logica con cui archiviare le informazioni (“albero tematico”), ma le sperimentazioni finora effettuate appaiono rivolte soprattutto a opere pittoriche, in particolare dipinti su tela e tavola (Chimenti, 2003; TAV. va).

Sulla traccia delle esperienze di documentazione informatizzata per la conservazione compiute finora, nel 2005 è stato avviato uno specifico “progetto per la digitalizzazione del patrimonio” coordinato dal Ministero per i Beni e le Attività Culturali, con il supporto scientifico della Scuola Normale Superiore di Pisa. Il progetto ARTPAST (“Applicazione informatica in rete per la tutela e



la valorizzazione del patrimonio culturale nelle aree sottoutilizzate”) ha affrontato, tra le differenti finalità, anche il problema di come strutturare e informatizzare la documentazione di restauro, «nella consapevolezza che è ormai tempo di riconoscere a questa attività, essenziale per una corretta tutela, lo *status* di attività istituzionale e di disciplina autonoma, in grado di supportare la progettazione e il monitoraggio degli interventi in corso» (Baracchini *et al.*, 2007, p. 84). A tale scopo sono stati proposti alle Soprintendenze, come oggetto di sperimentazione, due diversi software sviluppati nella Soprintendenza di Pisa:

– l’archivio informatico per la storia della tutela delle opere storico-artistiche (ARISTOS). Si tratta di un archivio-dati funzionante via *web*, dedicato all’organizzazione e alla gestione delle informazioni relative alla storia della tutela e contenute negli archivi delle varie Soprintendenze;

– il sistema informativo per la documentazione dei cantieri di restauro (SICAR). Quest’ultimo deriva dall’esperienza di AKIRA GIS *server*, ovvero del sistema informativo realizzato per la documentazione del restauro delle superfici lapidee della torre di Pisa; in questo caso è stato sviluppato un *web-GIS* (cioè un GIS fruibile via internet) per la progettazione esecutiva e la gestione degli interventi di restauro (Baracchini *et al.*, 2005). La principale innovazione introdotta da SICAR w/b rispetto al prototipo consiste, quindi, nella divulgazione sul *web*, che consente a una molteplicità di utenti di consultare il sistema ovunque (per esempio nel cantiere stesso, tramite connessioni *wireless*) e d’inserire ulteriori informazioni sulla base di una rappresentazione “realistica” del bene (cioè immagini fotografiche, non disegni). Il sistema informativo, sperimentato inizialmente per la mappatura dello stato di conservazione e degli interventi effettuati in due cantieri della piazza dei Miracoli di Pisa (porta di S. Ranieri nell’abside della cattedrale e affreschi del Camposanto monumentale), consente di visualizzare immagini fotografiche ad altissima risoluzione e di graficizzare su di esse le diverse mappature (degrado, interventi; TAV. *vb*).

Allo stato attuale è in corso la sperimentazione di tale sistema informativo – da parte delle Soprintendenze – e la verifica della coerenza dell’architettura logica e della struttura dati – da parte dell’ISCR. Ulteriori integrazioni, ancora oggetto di studio, riguardano la possibilità di gestire un piano di manutenzione, l’adeguamento alle metodologie e agli standard di documentazione in via di definizione da parte dell’ISCR, e la possibilità di evidenziare il rapporto tra tematismi diversi, ai fini dell’interpretazione delle cause di degrado.

Per quanto riguarda, invece, i sistemi informativi finalizzati in modo specifico al piano di manutenzione, sono in corso da tempo apposite ricerche per organizzare la documentazione necessaria e predisporre software particolari; a questo proposito si segnala lo studio condotto nell’ambito del Politecnico di Milano, che propone un sistema di archiviazione specifico per il patrimonio storico-architettonico, allo scopo di evitare modalità manutentive inadeguate derivanti più dall’ambito tecnologico che da quello conservativo. SIRCOP, sistema informativo per la conservazione programmata, è un software appositamente studiato che permette di elaborare schede operative derivanti dalla

scomposizione dell'edificio per elementi tecnologici – cfr. norma UNI 82/90 – annotando le informazioni relative a materiali e tecniche, danni, interventi, diagnostica, problematiche emerse da sopralluoghi e così via (Della Torre, 2004; D'Ascola, 2005).

In sintesi, si osserva, sulla base delle esperienze citate, che nei primi anni di sperimentazione di sistemi per la documentazione si siano privilegiati soprattutto gli aspetti tecnici dell'opera (relativi ai materiali e allo stato di conservazione). Solo in seguito è emersa la necessità di considerare anche la storia conservativa del manufatto, ma quest'ultima, pur basilarne per una corretta interpretazione dei fenomeni di degrado, appare ancora oggi piuttosto trascurata nelle applicazioni pratiche.

Si rilevano infine, in modo più o meno diretto, finalità diverse alla base delle varie esperienze di documentazione: dalla semplice organizzazione e gestione dei dati alla raccolta di informazioni di supporto alla conservazione e alla tutela, alla predisposizione di strumenti per “aggiornare” tecnologicamente il progetto e il cantiere o, addirittura, alla creazione di “sistemi esperti”, ipoteticamente in grado di compiere valutazioni dello stato di conservazione attraverso procedimenti automatici. È utile, a questo riguardo, fare chiarezza sugli obiettivi prefissati e sui destinatari di tali iniziative, che, talvolta, possono risultare insufficientemente definiti. Sembra opportuno ricordare, ancora una volta, che tali strumenti debbano costituire un mezzo per la conservazione, non il fine; la comprensione e l'interpretazione, così come le scelte progettuali, non possono scaturire automaticamente da strumenti tecnologici di supporto, ma devono essere affidati a competenze specialistiche consapevoli, che abbiano il controllo degli aspetti scientifici, ma anche dell'ineludibile dimensione culturale che investe ogni serio intervento di conservazione.

### 3.3 Materiali e indagini

#### 3.3.1. Materiali dell'edilizia storica

I materiali utilizzati nelle costruzioni antiche possono essere classificati in vario modo, in base alle caratteristiche strutturali o prestazionali che manifestano, alla composizione, alla microstruttura, al loro impiego ecc. In questa sede si ritiene utile suddividere i materiali in base alla loro origine, distinguendo perciò due gruppi fondamentali, con ulteriori suddivisioni al loro interno:

- a) materiali naturali:
  - lapidei (coerenti, incoerenti);
  - lignei;
- b) materiali artificiali:
  - litoidi (ceramici, calcestruzzi e malte);
  - metallici;
  - vetri.

Prima di descrivere nello specifico i diversi tipi di materiale, è utile richiamare alcuni concetti di base che riguardano le loro proprietà in generale.

La caratterizzazione dei materiali da costruzione descrive la materia costitutiva degli edifici nelle sue proprietà fondamentali ed è differente a seconda delle finalità per cui è compiuta, per esempio dal punto di vista chimico-fisico, mineralogico-petrografico, meccanico-strutturale, tecnologico e così via (Fratini, Rescic, Sardu, 2001; Musso, 2004; Binda, 2005). La caratterizzazione può essere eseguita:

- a livello macroscopico, attraverso un esame visivo, per osservare le caratteristiche fisiche e morfologiche del materiale, le tecniche e i segni di lavorazione ecc.;
- a livello microscopico, per definirne la composizione chimica, mineralogica, la microstruttura ecc.

Nel primo caso, il metodo di analisi, che si basa sulla percezione sensoriale, è empirico e non richiede prelievi di materiale; nel secondo caso, invece, l'analisi è strumentale e viene compiuta per lo più tramite microprelievi di materiale dall'opera (analisi microdistruttive).

Il "campionamento", ovvero le operazioni relative al prelievo di campioni destinati a indagini strumentali, è un'operazione molto delicata, in grado di condizionare notevolmente i risultati dello studio scientifico (Lalli, Lanterna, 1992). Le superfici architettoniche, infatti, oltre all'azione degli agenti atmosferici hanno subito, nel tempo, anche frequenti interventi di riparazione o modifica; il materiale e il suo stato di conservazione, quindi, possono variare notevolmente da un punto a un altro. È essenziale, perciò, che la posizione dei punti di prelievo sia scelta dopo uno studio molto accurato, che tenga conto della storia conservativa del manufatto; non si può prescindere da un preciso progetto diagnostico, in cui definire gli scopi delle indagini e i risultati attesi; infine è fondamentale documentare esattamente tutto quanto eseguito tramite fotografie e annotazioni relative alla posizione del campione, al materiale, alla sua consistenza e ai motivi per cui ogni singolo prelevamento è stato fatto. È necessario stabilire, inoltre, la sequenza delle indagini da eseguire sui campioni, effettuando prima le misurazioni che lasciano il campione inalterato e consentono di condurre ulteriori indagini, poi quelle che modificano il campione fino a distruggerlo. Le parti residue del materiale campionato vanno conservate con cura, insieme a una precisa documentazione, poiché preziose in vista di future indagini; esse consentiranno non solo nuovi approfondimenti, ma anche il confronto con la situazione attuale per valutare l'evoluzione del degrado nel tempo (Torraca, 2008).

I metodi di analisi strumentale sono utilizzati, in genere, per determinare:

- la composizione chimica del materiale, allo scopo di individuare gli elementi di cui è composto; l'analisi può essere di tipo qualitativo, quantitativo o semiquantitativo (a seconda che abbia il solo scopo di identificare i componenti oppure di fornirne anche le quantità assolute o relative);

- la composizione mineralogica, che definisce la costituzione reale del materiale, ovvero la natura delle fasi cristalline o amorfe;
- la morfologia, ovvero la struttura e la tessitura che il campione presenta. Con il termine “struttura” si indica, per esempio, la forma dei singoli minerali componenti una roccia, le loro dimensioni, il modo di aggregarsi; con il termine “tessitura” si indica la disposizione dei componenti nello spazio (come l’orientamento dei cristalli). La tessitura può essere granulare, porfirica, spatica, vetroso, lamellare ecc. A livello macroscopico, la struttura può essere compatta, vacuolare, cavernosa, porosa, scistosa, stratificata ecc. A livello microscopico, la struttura degli atomi e delle molecole costituenti il materiale esaminato può essere: cristallina (ordinata) nei metalli e rocce; semicristallina, in alcuni materiali del tipo pozzolana, cocciopesto; amorfa (disordinata) nei vetri (Bugini, Folli, 2005; Mottana, Crespi, Liborio, 2006).

I parametri che definiscono le caratteristiche di un materiale sono di tipo diverso e possono essere schematizzati in:

- proprietà meccaniche: resistenza a compressione, a trazione, a taglio, a flessione, elasticità/plasticità, duttilità/fragilità, durezza superficiale;
- proprietà chimico-fisiche: peso specifico, porosità, assorbimento d’acqua, coefficiente di saturazione, permeabilità al vapore acqueo;
- proprietà fisiche: ottiche, termiche, elettriche, magnetiche.

Alcuni parametri dipendono dal tipo di campione e dalle modalità con cui viene eseguita la prova a cui è sottoposto (per esempio di tipo meccanico), mentre altri sono specifici del materiale (peso specifico, porosità ecc.).

Di seguito si riportano alcune definizioni necessarie per la caratterizzazione dei materiali e per definire il comportamento del materiale nei confronti delle aggressioni ambientali (Varagnoli, 1996; Musso, 2004):

- il “peso specifico” è il rapporto tra il peso e il volume del materiale in esame; più esattamente, il peso specifico reale è misurato considerando il volume privo dei vuoti eventualmente presenti, mentre il peso specifico apparente è misurato considerando nel volume anche i vuoti;
- un materiale viene definito “isotropo” se il suo comportamento non varia a seconda della direzione in cui si esegue la prova; al contrario, è detto “anisotropo” se presenta caratteristiche differenti a seconda delle direzioni. I materiali con struttura microcristallina (come metalli, granito) o amorfa (come il vetro) sono isotropi, mentre le rocce sedimentarie e il legno, a causa delle rispettive stratificazioni e delle fibrosità, sono anisotropi;
- la “porosità” è il rapporto tra il volume dei vuoti e il volume totale di un campione; è una caratteristica molto importante per definire il comportamento di un materiale, poiché condiziona la resistenza meccanica, la conduzione termica, la resistenza al degrado ecc. Si distingue in porosità aperta o apparente (considerando solo il volume dei pori aperti e comunicanti tra loro e con l’esterno) e porosità totale o reale (considerando il volume totale dei pori, compresi quelli isolati). La porosità aperta, ovvero lo spazio vuoto effettivamente accessibile all’acqua, è dato dal rapporto tra il coefficiente di imbibizione e la

porosità totale; la sua determinazione, insieme a quella della distribuzione porosimetrica per dimensione dei pori, è molto importante per il comportamento dei materiali e la vulnerabilità al degrado;

– la “permeabilità” è la capacità di un materiale di essere attraversato da un fluido (gas o liquido) per effetto di una differenza di pressione; essa dipende dalla struttura del materiale e dal tipo di porosità;

– la “capacità di assorbimento” di un materiale definisce la sua attitudine ad assorbire acqua per capillarità senza che si verifichino reazioni chimiche; tale capacità dipende dal tipo di porosità, dalla forma e dalle dimensioni dei pori (pori aperti, comunicanti fra loro e di piccolo diametro favoriscono i fenomeni di capillarità);

– il “coefficiente di imbibizione” di un materiale definisce la sua attitudine a impregnarsi di acqua a seguito di immersione, fino a raggiungere la saturazione, senza che si verifichino reazioni chimiche; tale capacità dipende dal tipo di porosità, risultando nulla in presenza di pori chiusi (come per la pomice e il travertino);

– la “gelività” è la tendenza di un materiale a deteriorarsi a temperature inferiori a 0 °C; in questo caso, infatti, l’acqua assorbita dal materiale aumenta di volume, determinando tensionamenti meccanici all’interno dei pori. La gelività dipende, dunque, dalle caratteristiche di porosità (in particolare dalla porosità aperta e dalla distribuzione porosimetrica), risultando maggiore nei materiali con pori piccoli, nonché dalla resistenza meccanica del materiale.

### 3.3.2. Materiali lapidei naturali

Si definisce materiale lapideo o litico (dal latino *lapis* o dal greco λίθος, “pietra”) qualsiasi materiale proveniente dalla lavorazione di rocce presenti in natura.

Esistono, come si vedrà in seguito, anche materiali lapidei artificiali (quali calcestruzzi, laterizi, malte ecc.), ma in questo paragrafo ci si soffermerà esclusivamente su quelli di origine naturale, che possono essere coerenti (rocce) oppure incoerenti (ghiaie, sabbie, argille e limi).

Le rocce sono formazioni geologiche della crosta terrestre costituite da un aggregato naturale di uno o più minerali, ovvero sostanze naturali inorganiche, generalmente allo stato solido, caratterizzate da un reticolo cristallino e da una specifica composizione chimica. A seconda della composizione chimica, i principali minerali costituenti le rocce possono essere: silicati, carbonati, solfati, ossidi ecc.

I materiali lapidei vengono classificati in vario modo, con esiti anche molto diversi a seconda delle finalità commerciali o scientifiche (Alessandrini, Pasetti, 1995); esistono, sostanzialmente, una classificazione tecnologica codificata in base alla durezza dei materiali (Norma UNI 8458:1983) e una classificazione petrografica basata sull’origine geologica delle rocce. Poiché il processo formativo delle rocce ha una notevole importanza sulle caratteristiche del materiale

e sulle modalità di degrado, si preferisce fare riferimento, in questa sede, alla classificazione geologica, di seguito illustrata (Artini, 1941; Mottana, Crespi, Liborio, 2006).

*Rocce magmatiche (o ignee)* Hanno origine dalla solidificazione, in seguito al raffreddamento, di magma o di lava allo stato fuso. A seconda dell'ambiente in cui è avvenuto il raffreddamento e della conseguente velocità, si definiscono:

- “intrusive” le rocce magmatiche solidificate lentamente all'interno della terra, che presentano grossi cristalli ben formati (come nel granito);
- “effusive” le rocce magmatiche solidificatesi velocemente in superficie, caratterizzate da pochi cristalli immersi in una pasta microcristallina o vetrosa (per esempio porfido, basalto, trachite, ossidiana, pomice).

Dal punto di vista della composizione chimica, i minerali costituenti le rocce ignee sono i medesimi contenuti nel magma, dunque sostanzialmente silicati (quarzo) e silico-alluminati (feldspati, miche).

*Rocce sedimentarie* Sono rocce formatesi in seguito alla deposizione e successiva compattazione per diagenesi di materiali detritici di varia natura, detti sedimenti. In base alla natura dei sedimenti, tali rocce possono essere:

- di origine “clastica”, cioè detritica, se provenienti dalla disgregazione di rocce preesistenti (come arenarie, formate dalla compattazione di sabbie, oppure conglomerati e breccie, caratterizzati da elementi detritici di dimensioni anche notevoli);
- di origine “piroclastica”, nel caso in cui i detriti siano sabbie vulcaniche o frammenti rocciosi provenienti da un'attività vulcanica di tipo esplosivo (come tufi e breccie vulcaniche); queste sono spesso associate alle rocce ignee a causa della composizione e dell'origine vulcanica dei sedimenti, ma in realtà, dal punto di vista della loro formazione, sono rocce di natura sedimentaria;
- di origine “organogena”, se derivanti dall'accumulo di gusci, conchiglie o scheletri di animali (calcarei conchiliferi), oppure prodotte direttamente da organismi vegetali (alghe calcificate) o animali (pietra corallina);
- di origine “chimica”, formatesi per precipitazione e sedimentazione delle particelle disperse in soluzione nell'acqua (ad esempio calcari, travertini, dolomie).

A differenza delle rocce magmatiche, le rocce sedimentarie possono presentare una composizione chimica molto varia, a seconda della provenienza del materiale detritico e del legante. Quindi possono essere raggruppate, dal punto di vista chimico, in carbonatiche (calcare, travertino, dolomia), silicatiche (arenaria, breccie), solfatiche (gesso), miste (tufi).

*Rocce metamorfiche* Derivano dalla trasformazione di rocce preesistenti, per effetto di notevoli variazioni di temperatura e/o di pressione che si verificano in profondità nella crosta terrestre, determinando modificazioni nella composizione mineralogica, nella struttura e nella tessitura delle rocce originarie (che possono essere ignee, sedimentarie o metamorfiche). Il metamorfismo può es-

sere dovuto a fenomeni differenti ed essere parziale o completo, a seconda delle condizioni termodinamiche in cui è avvenuta la trasformazione. Si distinguono perciò due tipi di rocce metamorfiche:

- di tipo “blastico”, con residui di strutture cristalline precedenti, sono maggiormente diffuse (come il marmo, derivante dal metamorfismo di rocce sedimentarie calcaree);
- di tipo “scistoso”, con iso-orientamento dei minerali secondo piani paralleli (come ardesia e gneiss).

Anche in questo caso la composizione chimica delle rocce metamorfiche può essere molto varia, a seconda della precedente origine delle rocce.

Un discorso a parte meritano i materiali lapidei incoerenti (ghiaie, sabbie, argille, limi), che derivano dalla sedimentazione di materiale detritico più o meno grossolano prodotto dalla disgregazione di rocce primarie; in questo caso la sedimentazione avviene senza cementazione dei detriti, che dunque rimangono incoerenti. A seconda dell’ambiente di sedimentazione, i detriti possono essere:

- sedimenti “continentali”: subaerei (detriti di frana, sabbie moreniche, sabbie desertiche, sabbie vulcaniche) o subacquei (ghiaie e sabbie di fiume, limi e argille lacustri o lagunari);
- sedimenti “marini”: pelagici (molto fini, poiché formati in acque profonde), neritici (più grossolani, formati in acque di media profondità), intracotidali (caotici con inclusioni di materiale organico, formati in acque poco profonde).

In base alla composizione chimica delle rocce primarie da cui derivano, i materiali lapidei incoerenti possono essere silicei, calcarei o argillosi.

Mentre i sedimenti silicei e calcarei vengono utilizzati come aggregati nel confezionamento di malte e calcestruzzi (cfr. PAR. 3.3.4), l’argilla può essere usata direttamente come materiale da costruzione (terra cruda); nella storia questo materiale è stato ampiamente utilizzato, in particolare nell’Antichità e nel Medioevo, ed è largamente diffuso ancora oggi (Galdieri, 1982; Bertagnin, 1999). Le tecniche costruttive in terra cruda variano molto, anche nelle denominazioni, a seconda dell’ambiente geografico; in sintesi se ne possono individuare le principali:

- mattone crudo (*opus latericium* descritto da Vitruvio, oggi definito *adobe*);
- terra pressata (*muros formaceos* descritti da Plinio, oggi definito *pisé*);
- blocchi di terra (denominazione che presenta una serie di varianti geografiche; nell’Italia centrale è detta massone, mentre in ambito internazionale è detta *bauge* o *cob*);
- murature miste a graticcio, con struttura lignea (*opus craticium* o *torchis*).

I muri in terra, a esclusione dei tramezzi formati da graticci (TAV. VIa), sono riconoscibili per la caratteristica di presentare grandi spessori, ma, in particolare, quelli realizzati in mattoni o in *pisé* presentano sempre superfici verticali, mentre le strutture in blocchi di terra sono generalmente rastremate verso

l'alto. Le differenti tecniche possono essere distinguibili, anche su una struttura molto degradata, per la presenza o meno di blocchi (molto regolari con sistemi a mattoni, decisamente più irregolari, anche se comunque individuabili, negli altri casi; TAV. *vib*), oppure per la disposizione di buche pontate o di altri segni che indicano l'esecuzione del muro entro casseforme (TAV. *vic-d*).

Oltre alle tecniche costruttive murarie, la terra argillosa è stata ampiamente usata anche come legante nelle murature in pietra, nei nuclei di murature rivestite in pietra o in laterizi e, ancora, molto diffusamente, per realizzare intonaci e rivestimenti, caratterizzati dalla presenza di fibre vegetali o animali usate come inerti per contrastare gli effetti del ritiro.

Il riconoscimento dei materiali lapidei in generale può essere effettuato, in prima approssimazione, mediante metodi empirici, ovvero osservazione diretta (a occhio nudo o con lente d'ingrandimento) delle caratteristiche strutturali del materiale, l'osservazione delle tecniche di lavorazione ecc.; solo successivamente è opportuno procedere a specifiche indagini strumentali. In questa sede ci si limiterà alla descrizione delle peculiarità che permettono di individuare alcuni tra i materiali lapidei più comuni; si rimanda a Hochleitner (1985) e Mottana, Crespi, Liborio (2006) per i necessari approfondimenti.

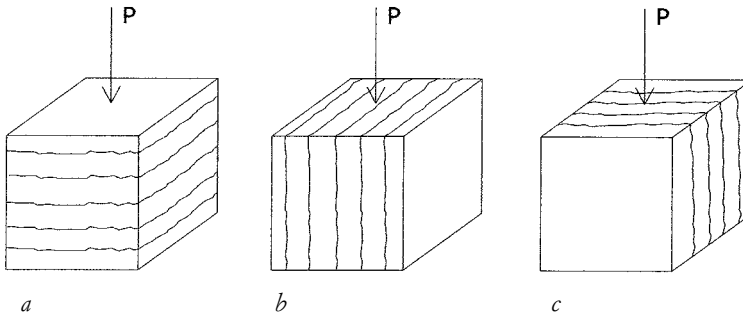
È importante considerare, in ogni caso, che nelle costruzioni storiche talvolta il materiale era "simulato" attraverso tecniche di lavorazione superficiale molto accurate, che oggi costituiscono preziose testimonianze da conservare (come nel caso dei finti marmi, delle finiture a falso bugnato o a falsa cortina laterizia, dell'intonaco trattato con buchi per simulare il travertino o, addirittura, di alcuni casi in cui la pietra stessa è lavorata in modo da alludere a materiali diversi, come nel caso della muratura in arenaria a Fathepur Sikri in India – TAV. *vie* –, in cui i conci lapidei simulano una cortina laterizia). Purtroppo, molto spesso, tali finiture vengono oggi sostituite o rimosse, senza capirne il significato e il valore, allo scopo di "rivelare" il materiale sottostante, che, invece, doveva essere dissimulato.

Uno degli elementi distintivi delle rocce sedimentarie è quello di presentare stratificazioni, dovute al processo formativo; esse possono essere più o meno evidenti e riconoscibili. Tra le rocce sedimentarie i travertini, formati per un processo di deposizione chimica avvenuto in ambiente continentale piuttosto turbolento, sono caratterizzati da diffuse vacuolarità – anche di grandi dimensioni – disposte secondo stratificazioni ben visibili (TAV. *vi f*); nei calcari di tipo organogeno sono spesso riconoscibili a occhio nudo – o con lente di ingrandimento – i frammenti di materiale organico (gusci, conchiglie; TAV. *vii a*); le rocce di origine clastica (conglomerati, arenarie, tufi) si distinguono per la loro composizione granulare e le inclusioni di materiale detritico. In particolare, nei conglomerati i frammenti detritici, inglobati nel materiale cementante, sono grossolani e ben visibili (se sono di forma spigolosa il materiale è detto breccia, se presentano forma arrotondata è detto puddinga; TAV. *vii b*); nelle arenarie il materiale detritico è molto minuto (granelli di sabbia) e



FIGURA 3.17

Possibile disposizione delle stratificazioni nel materiale lapideo posto in opera



L'esempio *a* rispetta il "verso" naturale della pietra (più alta resistenza a compressione); gli altri due sono sfavorevoli (in particolare in *c*, con le stratificazioni parallele alla superficie esterna, si osserva un maggior rischio di esfoliazioni e scagliature del materiale).

cementato da una pasta fine che può essere di natura silicea o calcarea (TAV. VIIIc-d).

La presenza di stratificazioni determina un comportamento anisotropo del materiale; in questo caso le caratteristiche meccaniche dipendono dal "verso" in cui il materiale è posto in opera (FIG. 3.17). In particolare, la resistenza a compressione è maggiore quando la sollecitazione avviene perpendicolarmente alle stratificazioni, ovvero quando la pietra è disposta nel suo verso naturale (Rockwell, 1989).

Le rocce magmatiche o ignee sono generalmente molto dure e compatte, caratterizzate dalla presenza di cristalli di grandi dimensioni e ben riconoscibili nelle rocce intrusive (granito), a struttura microcristallina o vetrosa nelle rocce effusive (basalto, porfido; TAV. VIIIe).

Le rocce metamorfiche possono presentare una struttura "foliata", talvolta con evidenti pieghe dovute a compressioni durante il processo formativo; la struttura può essere scistosa (con stratificazioni fitte che tendono a staccarsi) oppure gneissica (alternanza di foliazioni compatte). Tra le rocce metamorfiche, particolare importanza nella storia delle costruzioni rivestono i marmi, ottenuti dalla metamorfosi di rocce calcaree, e l'ardesia, caratterizzata da piani di clivaggio che ne consentono la facile divisibilità in lastre (TAV. VIIIf). Nell'uso comune viene definito "marmo" qualsiasi litotipo levigabile e lucidabile, indipendentemente dalla composizione chimica e dalla genesi; in realtà, "marmo" è solo la pietra di origine metamorfica, con struttura cristallina e costituito essenzialmente da calcite e altri eventuali componenti che ne determinano colore e venature (TAV. VIIIg).

Dopo un preventivo riconoscimento basato sull'aspetto macroscopico della pietra, in una fase più approfondita di indagine ci si può avvalere di metodi

scientifico-strumentali, mediante l'osservazione al microscopio ottico di campioni provenienti da microprelievi e appositamente preparati per la caratterizzazione mineralogico-petrografica (sezioni sottili e sezioni opache), che consente di conoscerne la composizione mineralogica e le caratteristiche strutturali (TAVV. VIIIa-f; IXa-b). Ulteriori indagini possono essere l'osservazione al microscopio elettronico a scansione (SEM), per un'indagine microstrutturale mediante ingrandimenti molto spinti; la diffrazione ai raggi X (XRD) su granelli di materiale frantumato, per la determinazione dei componenti minerali cristallini (TAV. IXc); le analisi termogravimetrica e termica differenziale (TGA-DTA), che prevedono la cottura di un campione del materiale per identificare i minerali amorfi; la porosimetria mediante riempimento di un frammento di materiale con mercurio sotto pressione, per la valutazione della distribuzione volumetrica dei pori aperti (TAV. IXd).

Per i materiali litici incoerenti è fondamentale l'analisi granulometrica, che studia la forma e la dimensione dei frammenti, raggruppandoli in specifiche classi (pietrisco, ciottoli, ghiaia, sabbia) attraverso l'impiego di vagli standardizzati e di bilance di precisione.

### 3.3.3. Il legno

Il legno è un materiale vegetale ricavato dal fusto e dai rami di alcuni tipi di piante; è costituito da fibre di cellulosa trattenute da una matrice di lignina e, dal punto di vista chimico, è composto da idrogeno, carbonio e ossigeno. Esso possiede buone caratteristiche meccaniche (resistenza a compressione e a trazione), che sono però notevolmente condizionate da eventuali difetti presenti nel materiale (come nodi o lesioni dovute al ritiro); ha un comportamento anisotropo e viscoelastico, subisce pertanto deformazioni non del tutto reversibili, che dipendono dal tempo durante il quale esso è sottoposto a sollecitazione (Tampone, 1987; Tampone *et al.*, 2002).

Se si seziona trasversalmente il tronco di un albero, si possono distinguere diversi strati concentrici, a partire dall'esterno verso l'interno (Varagnoli, 1996; Dal Mas, 2004a):

- la corteccia, un tessuto periferico che ha la funzione di rivestire e proteggere il tronco;
- il libro, il tessuto che ha la funzione di trasportare la linfa;
- il cambio, la parte nascente che permette l'accrescimento del tronco; esso produce all'esterno le cellule del *floema*, che trasporta le sostanze nutritive ma è privo di lignina (libro e corteccia), all'interno le cellule dello *xilema*, il legno vero e proprio (alburno e durame);
- l'alburno, la parte legnosa più giovane del tronco degli alberi, è meno resistente dal punto di vista meccanico, facilmente putrescibile e attaccabile da insetti xilofagi;
- il durame, la porzione più interna e meno recente (detta anche cuore del

legno), che svolge solo funzioni di sostegno; ha le migliori caratteristiche di resistenza meccanica rispetto agli altri strati;

– il midollo, tessuto tenero e connettivo centrale.

Gli anelli concentrici visibili nella sezione trasversale di un tronco corrispondono alle fasi di accrescimento della pianta; lo spessore degli anelli non è costante, ma risente delle condizioni in cui è avvenuta la crescita (come l'alternarsi delle stagioni o i periodi di siccità). La lettura degli anelli e la correlazione con eventi climatici noti può consentire la datazione di un manufatto ligneo ("dendrocronologia").

Le specie legnose utilizzate come materiale da costruzione si suddividono, in base alle modalità riproduttive, in:

– *gymnospermae* (conifere), che producono per lo più legni dolci (abete, pino), ma anche alcuni legni duri (larice, cipresso);

– *angiospermae* (latifoglie), che generano per lo più legni duri (quercia, castagno, olmo, noce), ma anche alcuni legni dolci (pioppo, pero).

Il riconoscimento delle specie legnose può avvenire in base all'osservazione diretta, preferibilmente su una sezione trasversale di un tronco, oppure per via strumentale (osservazioni al microscopio ottico ed elettronico, analisi chimiche) nei legni particolarmente deteriorati (Nardi Berti, 2006).

In linea generale, le differenti caratteristiche che identificano le due specie legnose sono le seguenti:

– le "conifere" presentano un legno senza vasi, abbastanza uniforme; anelli concentrici di accrescimento ben visibili (netta distinzione tra zone di accrescimento primaverile e zone di accrescimento tardivo); presenza di canali resiniferi; ramificazione a fusto semplice, ovvero disposizione dei nodi lungo un solo asse (monopodiale);

– le "latifoglie" presentano un legno con vasi, spesso visibili a occhio nudo (essi appaiono in sezione come piccolo fori); anelli concentrici di accrescimento poco o per niente evidenti; assenza di canali resiniferi; ramificazione complessa, ovvero disposizione dei nodi lungo più assi (sinpodiale).

Nei casi in cui non sia possibile osservare direttamente la sezione di un tronco, come perlopiù avviene nello studio di una costruzione storica, il riconoscimento della specie legnosa si basa sulla valutazione di alcune caratteristiche fisiche, quali:

– il colore, generalmente bruno, ma con una gamma che varia dal bianco (abete, betulla, pioppo) al giallo (olivo, noce), al rosa (faggio), al rosso (larice), al nero (ebano);

– la venatura (visibile in sezione longitudinale), dovuta all'alternanza delle zone di accrescimento primaverile e tardive; può essere molto visibile (conifere in genere, castagno, quercia) oppure poco o per nulla riconoscibile (faggio, pioppo);

– la tessitura (osservabile in sezione longitudinale), riferita alla grandezza degli elementi cellulari costituenti; può essere grossolana (castagno, quercia, pino) o fine (betulla, faggio, pioppo);

– l'odore; può essere aromatico (conifere in genere), rancido (abete bianco, pioppo), di tannino (castagno, quercia).

Anche la presenza di difetti può essere utile al riconoscimento della specie arborea, come per esempio l'insorgenza di macchie di tannino, tipiche del castagno, o la presenza di tasche resinose, propria del larice, o le nodosità, in genere rinvenibili nella betulla, nel noce, nel frassino.

### 3.3.4. Materiali lapidei artificiali

Nel campo dei materiali lapidei vengono considerati anche quelli prodotti artificialmente dall'uomo, come malte e calcestruzzi, laterizi e ceramiche; tutti possiedono caratteristiche fisiche e meccaniche simili ai materiali lapidei naturali e sono perciò definiti litoidi.

Ceramiche, terracotta e laterizi sono prodotti a base di argilla, una roccia sedimentaria incoerente formata dalla disgregazione di rocce precedenti; essa può essere più o meno pura a seconda dell'origine e dell'ambiente di formazione. Si distinguono, quindi, argille primarie (o caoliniche), molto chiare e senza impurità, e argille secondarie, più scure perché contenenti altri minerali (ad esempio ossidi di ferro). Dal punto di vista chimico, l'argilla è composta prevalentemente di silicati di alluminio, caratterizzati da una struttura a fogli sovrapposti, che scorrono su se stessi in presenza di acqua, e presenta una grana finissima (particelle di 0,2-2 micron). Per queste caratteristiche l'argilla, quando assorbe acqua, diventa un materiale facilmente plasmabile. Ha anche la caratteristica di essere refrattaria (ossia resiste bene alle alte temperature, ma la sua resistenza dipende notevolmente dalla presenza di impurità, che rendono il prodotto più scadente) e, quindi, può essere sottoposta a cottura per migliorare le caratteristiche meccaniche e fissare la forma (Vincenzini, 1995; Alessandrini, Fabbri, 2000; Cuomo di Caprio, 2007).

I prodotti litoidi realizzati con un impasto a base di argilla e sottoposti a cottura sono definiti prodotti ceramici; all'interno di questa categoria si distinguono le ceramiche porose, che possono presentare un rivestimento di vernice o smalto (maioliche) oppure nessun rivestimento (terrecotte), e le ceramiche compatte, a pasta bianca (porcellane) o a pasta colorata (grès).

Esistono in edilizia molti tipi di prodotti ceramici, che possono essere classificati dal punto di vista tecnologico-produttivo in base alle caratteristiche dell'impasto (poroso o compatto, con rivestimento o senza) o per forma e dimensioni (mattoni, piastrelle, tubi, tegole ecc.).

I laterizi, molto usati nelle costruzioni fin dall'antichità, rientrano nel campo delle terrecotte. Il termine usato oggi, in realtà, è piuttosto ambiguo, in quanto in epoca romana venivano definiti *lateres* solo i mattoni crudi, mentre quelli cotti venivano detti *testae* (da cui la distinzione tra *opus latericium*, in terra cruda, e *opus testaceum*, in cotto).

Tra i tipi di terracotta usati per l'edilizia, anche le tegole costituiscono una

parte rilevante; esse presentano una discreta serie di varianti morfologiche a seconda del contesto geografico.

Il riconoscimento dei materiali ceramici in generale, dal punto di vista empirico, si basa essenzialmente su alcuni elementi:

- il colore, che può fornire importanti informazioni sul procedimento produttivo, varia dal giallo chiaro al rosa (spesso mattoni poco cotti; TAV. IXe), fino al rosso scuro o marrone (perlopiù mattoni molto cotti; TAV. IXf);
- la forma, le dimensioni, i segni di lavorazione e le eventuali decorazioni superficiali possono variare moltissimo e sono oggetto di studi specifici (Montelli, 2004).

Nell'edilizia si fa riferimento soprattutto alla forma e alla dimensione dei mattoni, molto variabili sia dal punto di vista cronologico che geografico, nonché all'eventuale presenza di bolli di fabbricazione, perlopiù utilizzati in età romana, ma rinvenibili anche in opere successive. Proprio analizzando la grande varietà di forme e dimensioni dei laterizi, la "mensiocronologia" tenta di stabilire dei criteri di datazione, confrontando i diversi elementi con esemplari di datazione nota (Mannoni, 1988; Pittaluga, Ghislanzoni, 1991; Pittaluga, Quirós Castillo, 1997).

Dal punto di vista strumentale, lo studio dei materiali ceramici può essere condotto attraverso le stesse metodiche utilizzate per l'analisi del materiale lapideo naturale, ovvero l'osservazione al microscopio ottico di sezioni sottili (per il riconoscimento dei minerali presenti nell'impasto) e di sezioni opache (per osservare la morfologia generale e le eventuali inclusioni di materiale organico), l'analisi termica differenziale (DTA, per individuare il tipo di argilla impiegata e la presenza di sostanze organiche), la termoluminescenza (tecnica usata per la datazione di reperti archeologici ceramici; TAV. xa-b).

### 3.3.5. Malte e calcestruzzi

Le malte e i calcestruzzi sono composti essenzialmente da legante, aggregato (anche detto inerte) e acqua, con l'eventuale aggiunta di additivi per migliorarne alcune caratteristiche. La differenza sostanziale tra malta e calcestruzzo risiede nella dimensione degli inerti, molto piccola (inferiore al centimetro) nella prima e decisamente maggiore (dimensioni anche superiori a 10 cm) nel secondo.

Nell'edilizia contemporanea il termine "calcestruzzo" viene utilizzato spesso come sinonimo di conglomerato cementizio, ma in realtà la tecnica di costruire strutture murarie in conglomerato fu introdotta dai romani, che ne fecero ampio ricorso impiegando come legante calce aerea o calce idraulica naturale (Adam, 1984).

In base al tipo di legante usato, le malte possono essere di gesso, calce aerea, calce idraulica, cemento, miste (anche dette "bastarde").

Le caratteristiche delle malte dipendono dal tipo e dalle quantità dei com-

ponenti (che devono avere un determinato rapporto proporzionale), ma anche dalle condizioni di esecuzione dell'impasto.

In base alla funzione, le malte possono essere classificate per allettamento (nelle murature e nella posa di pavimenti e rivestimenti), rivestimento (intonaci), decorazione (stucchi), per usi speciali (stilature di giunti, stuccature, impermeabilizzazione ecc).

Di seguito vengono descritti gli elementi costitutivi delle malte usate nell'edilizia storica (Torraca, 2002; Esposito, 2004; Colombo, Sansonetti, Aliverti, 2005).

I leganti sono materiali inorganici miscelabili con acqua; essi formano così un composto plastico che è in grado di far presa (quindi asciugarsi e indurire) inglobando in un blocco monolitico i diversi componenti dell'impasto; questo può avvenire in tempi più o meno lunghi, a seconda delle condizioni ambientali e delle caratteristiche del legante.

I leganti sono prodotti artificialmente dall'uomo mediante cottura di materie prime (rocce sedimentarie); essi si distinguono in leganti "aerei" (calce, gesso), se fanno presa solo a contatto con aria, e leganti "idraulici" (calce idraulica, cemento), se fanno presa anche in presenza di acqua.

Il gesso deriva dalla cottura di selenite, una pietra sedimentaria contenente solfato di calcio bi-idrato ( $\text{CaSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$ ); durante la cottura, a basse temperature (130-170 °C), questo perde acqua e si trasforma in solfato di calcio semi-idrato ( $\text{CaSO}_4 + 1/2\text{H}_2\text{O}$ ), che ha la spiccata caratteristica di tornare alla configurazione iniziale se si trova in presenza di acqua. Questo processo chimico avviene molto rapidamente (meno di un'ora) ed è caratterizzato, contrariamente ad altri casi analoghi, da aumento di volume e sviluppo di calore. Se la cottura avviene a temperature maggiori (fino a 250 °C), il prodotto finale ha la caratteristica di fare presa più lentamente e viene quindi usato quando sono necessari tempi di lavorazione più lunghi, come per decorazioni e stucchi. Se la cottura avviene a temperature superiori, il prodotto finale sarà il solfato di calcio anidro ( $\text{CaSO}_4\beta$ ), detto anche "gesso morto", che non fa presa ed è insolubile in acqua; esso viene usato come inerte per particolari malte da stuccatura.

Il gesso è stato largamente usato nelle costruzioni storiche come legante, da solo o mescolato alla calce, per realizzare malte per intonaci particolari molto levigati (come nei finti marmi) e stucchi; tuttavia, in presenza di grandi disponibilità e di climi secchi, è stato usato anche per intonaci comuni. Le malte a base di gesso sono molto porose e, per questo, offrono un buon isolamento termico e acustico; non subiscono ritiro e forniscono anche una buona resistenza al fuoco. Il gesso presenta, tuttavia, problemi di compatibilità con il ferro; il contatto tra i due materiali provoca infatti una rapida ossidazione del metallo, fino alla completa corrosione.

Le caratteristiche che permettono di riconoscere le malte a base di gesso sono:

- colore bianco del legante;
- scarsa o nulla presenza di inerti;
- assenza di fessurazioni da ritiro.

La calce deriva dalla cottura di pietre calcaree, costituite essenzialmente da carbonato di calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) che, durante la cottura, si trasforma in ossido di calcio ( $\text{CaO}$ ), detto anche “calce viva”. Quest’ultimo, in presenza di acqua, si idrata trasformandosi in idrossido di calcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), ovvero “calce spenta” (sotto forma di calce idrata in polvere o di grassello). L’idrossido, in presenza di anidride carbonica (contenuta nell’aria), ha la capacità di ritrasformarsi in carbonato: esso, infatti, fa presa e indurisce, diventando materiale litoide; questo processo chimico, detto “carbonatazione”, comporta una certa diminuzione di volume, che viene compensata dalla presenza di inerti. La calce aerea, per questo motivo, non è mai usata da sola ma, anche in presenza di spessori sottili (ad esempio per intonaci o giunti murari), viene addizionata con materiale inerte che ne riduce il ritiro. Gli intonaci e le murature realizzati con calce aeree sono traspiranti e non idrorepellenti.

Le caratteristiche che permettono di riconoscere le malte a base di calce aerea sono:

- colore chiaro del legante (bianco, avorio o giallino);
- presenza costante di inerti;
- presenza di fessurazioni da ritiro.

La calce idraulica naturale (NHL, ovvero *Natural Hydraulic Limes*) si ottiene dalla cottura di pietre calcaree marnose (contenenti argilla) con formazione di silicati e alluminati di calcio che reagiscono e fanno presa, in presenza di acqua, con l’idrossido di calcio. A seconda del contenuto di argilla, le calci possono essere più o meno idrauliche e offrire una presa diversamente rapida; in generale, le caratteristiche meccaniche delle malte idrauliche sono superiori a quelle delle malte aeree. Oggi le calci idrauliche sono prodotte artificialmente (la produzione industriale si avvia nel XIX secolo), ma storicamente la malta idraulica veniva ottenuta mediante l’aggiunta di aggregato con proprietà “idraulicizzanti”, come la pozzolana o il cocchiopesto. La pozzolana è una sabbia vulcanica (ovvero una roccia piroclastica incoerente) con struttura amorfa o vetrosa, contenente silice e allumina; queste reagiscono in presenza di acqua formando silicati e alluminati di calcio idrati, con proprietà leganti. A seconda delle caratteristiche geologiche del territorio di provenienza, la pozzolana può essere di colori diversi (nera, bianca, marrone, rossa, grigio-violacea) e conferire alla malta colorazioni tipiche, che la rendono riconoscibile (TAV. xc). Anche nelle malte addittivate con cocchiopesto la colorazione rossiccia e la presenza di piccoli frammenti di laterizi possono consentire una prima identificazione del materiale a occhio nudo, da verificare con osservazioni strumentali (TAV. xd).

Il colore delle malte idrauliche, dunque, può risultare molto vario a seconda degli inerti utilizzati; un’osservazione ravvicinata, con lente di ingrandi-

mento o tramite microscopia ottica, permette di distinguere il colore del legante (dal giallino al marrone chiaro) da quello degli aggregati (rosso, nel coccopesto; variabile nella pozzolana).

Altri possibili additivi con proprietà idraulicizzanti sono le scorie di lavorazione del ferro o il caolino (un'argilla primaria, di colore bianco); quest'ultimo può essere identificato tramite analisi chimiche o diffrattometria a raggi x (XRD).

Il cemento si ottiene dalla cottura, a temperature molto alte, di pietre calcaree marnose (con un contenuto di argilla di 21-27%); al prodotto raffreddato, detto "clinker", possono essere aggiunti vari additivi. Esistono cementi di vario tipo, tra cui quelli naturali, ottenuti solo dalla cottura di marne, ma il tipo usato oggi per la preparazione del calcestruzzo è il cemento Portland, inventato nel 1824 in Inghilterra. Miscelando cemento con acqua e inerti si ottiene un impasto molto lavorabile, in grado di indurire in poche ore e di far presa in un mese; tale processo può avvenire anche in presenza di acqua e produce un materiale caratterizzato da elevata resistenza meccanica.

Le malte a base di cemento sono riconoscibili generalmente per il colore grigio del legante (a meno che non venga utilizzato cemento bianco, di recente produzione) e per la consistenza molto tenace (ma solo una minuziosa analisi di laboratorio può dare la certezza della composizione).

In linea generale, un primo riconoscimento del tipo di malte presenti in una costruzione storica, a carattere empirico ma molto importante anche per indirizzare le successive indagini strumentali, può essere compiuto in base a una descrizione delle caratteristiche macroscopiche (Esposito, 2004; Musso, 2004), ovvero:

- il colore del legante, che può variare dal bianco (gesso, calce aerea) al giallino (calce idraulica) al marrone chiaro (calce idraulica) al grigio (calce idraulica, cemento);
- la presenza o meno di inerti (solo nelle malte a base di gesso possono essere molto scarsi o mancare del tutto);
- il tipo di inerti, la loro dimensione e composizione (aggregato conglomeratico, microconglomeratico, arenaceo, siltoso);
- la coesione che, secondo una prima valutazione empirica, può essere: più o meno tenace (se non si rompe o si spezza senza sbriciolarsi), friabile (si sbriciola sotto la pressione delle dita) oppure incoerente;
- la presenza di eventuali sostanze organiche (come paglia, peli animali), tipiche delle malte a base di terra cruda o argilla (TAV. xe);
- la tessitura (negli intonaci) può essere omogenea e uniforme, oppure a strati.

La presenza o meno di microfessurazioni da ritiro negli intonaci (*craquelures*) consente di distinguere una malta di calce aerea da una malta di gesso, priva di fenomeni di ritiro (TAV. xf).



Le analisi strumentali, compiute in laboratorio su campioni prelevati dall'opera, mirano alla caratterizzazione fisica (porosità, assorbimento d'acqua in fase liquida e in fase di vapore, permeabilità al vapore acqueo, densità) e alla caratterizzazione mineralogico-petrografica e chimica; accertano quindi il tipo di legante, la natura dell'inerte e di altri eventuali componenti e additivi, il rapporto legante/aggregato e la granulometria di quest'ultimo (Laurenzi Tabasso, 1990).

Le tecnologie diagnostiche più utilizzate a tale scopo sono: l'osservazione al microscopio ottico su sezioni sottili (TAV. XIa) e, in caso di intonaci, anche su *cross section*, per osservarne la morfologia e gli spessori degli strati (TAV. XIb-c); la diffrattometria a raggi X (XRD), per conoscere la composizione mineralogica qualitativa; le analisi termiche per identificare i componenti organici (TGA-DTA; TAV. XIa); l'osservazione al microscopio elettronico con sonda EDAX, per microanalisi chimiche puntuali (SEM-EDS).

### 3.3.6. Coloriture

In appendice all'argomento sulle malte e sugli intonaci, è utile soffermarsi sulle coloriture, quindi sui diversi tipi di pigmenti, di tinteggiature e di pitture applicate alle superfici architettoniche (Bureca, Palandri, 1986; Cardilli, 1990; Miarelli Mariani, 1995; Esposito, 2004; Musso, 2004).

I pigmenti sono materiali, naturali o artificiali, in grado di colorare altri materiali a cui vengono miscelati, costituiti solitamente da leganti e inerti (anche detti, in pittura, "cariche"). I pigmenti naturali possono essere di natura organica e avere origine vegetale (come l'indaco e il bitume) o animale (come la cocciniglia o la seppia) oppure di natura inorganica (origine minerale, come ossidi metallici o terre coloranti). I pigmenti artificiali, creati artigianalmente già dal Medioevo e poi prodotti a livello industriale dalla fine dell'Ottocento, hanno risposto alla necessità di procurarsi pigmenti rari in natura o particolarmente costosi (soprattutto l'azzurro, ottenuto inizialmente da una pietra preziosa, il lapislazzulo, fu uno dei primi colori prodotti artificialmente).

Per quanto riguarda le tinteggiature applicate sugli intonaci, molto diffuse in passato sono le tinte a calce, realizzate miscelando grassello o calce idrata con pigmenti ed eventuali fissativi, solitamente di origine organica (colle animali, uovo, caseina ecc.). Presentano una buona trasparenza, tanto da essere applicate talvolta come scialbature o per successive velature, e offrono una gamma di colori piuttosto limitata. Sono riconoscibili per la trasparenza e per la tendenza del colore ad attenuarsi nelle zone più esposte agli agenti atmosferici e a conservarsi maggiormente nelle parti protette; entro certi limiti, questo modo "naturale" di invecchiare conferisce alle superfici un valore aggiunto, espressione della patina del tempo, che talora altri trattamenti sintetici cercano di imitare (TAV. XIe).

Le tecniche di applicazione delle tinte a calce possono essere "a fresco" (su intonaco umido) oppure "a secco" (su intonaco asciutto), ma esistono an-

che soluzioni intermedie, quali il “finto affresco” (con una base a fresco e rifiniture a tempera). Nell’affresco il colore si fissa al supporto per reazione chimica con il carbonato di calcio contenuto nell’intonaco (quindi i colori sono molto resistenti, ma in fase di presa i meno stabili potrebbero alterarsi), mentre nella tecnica a secco il colore aderisce all’intonaco grazie alla presenza della colla (quindi non c’è rischio di alterazione dei colori, ma la pellicola pittorica nel tempo tende a staccarsi dal supporto). Ovviamente, il supporto su cui applicare la tinta deve essere compatibile, dunque le tinte a calce possono essere applicate su coloriture a calce già esistenti o su intonaci di calce, vecchi o nuovi, purché non compromessi da precedenti trattamenti polimerici.

Alternative recenti alle tradizionali tinte a calce possono essere:

- le tinte a colla o tempera, che offrono una gamma cromatica più ampia rispetto alle tinte a calce e che, essendo opache, permettono la sovrapposizione di colori. Tendono tuttavia ad alterarsi con il tempo e, per la presenza di componenti organici, a essere attaccate da muffe e quindi a scrostarsi e spolverare. Al posto delle colle tradizionali, di recente si usano fissativi sintetici (vinilici o acrilici) che sono più stabili, ma meno traspiranti;

- le tinte ai silicati, più resistenti di quelle a calce e di quelle a tempera. Meno soggette a scolorimento, tendono anch’esse, come le tinte a calce, a invecchiare “nobilmente” (cioè con attenuazioni di colore dovute a dilavamento e progressiva erosione, senza distacchi). Sono applicabili su intonaci cementizi, su intonaci di calce o di malta bastarda, purché contenenti inerti silicei. Contrariamente a quanto avviene con le tinte a calce, esse devono essere applicate a secco su supporto ben asciutto, per evitare l’insorgenza successiva di efflorescenze;

- le tinte a basso peso molecolare, che derivano da ricerche recenti e mirano a riproporre un procedimento simile alla pittura a fresco, utilizzando però, al posto dell’acqua, un veicolo impregnante a basso peso molecolare, in grado di penetrare più in profondità. Il risultato è simile a quello dell’affresco, ma richiede una notevole capacità di esecuzione e non permette ritocchi. Trattandosi di prodotti idrorepellenti, non dovrebbero essere usati su murature storiche, anche per problemi di reversibilità dell’intervento;

Le pitture sono costituite da pigmenti, leganti (detti anche “veicoli”), “diluenti” e “seccanti”, a cui possono essere aggiunti additivi antimuffa. Esse formano una pellicola costituita dal legante e dalle particelle colorate (il diluente è volatile e si disperde dopo l’applicazione); il degrado si manifesta, solitamente, con il distacco della pellicola pittorica.

Le pitture si differenziano, in base al tipo di legante, in pitture a olio (brillanti e impermeabili, permettono ritocchi ma hanno tempi di essiccamento molto lunghi; venivano usate, in passato, lì dove si voleva ottenere una superficie lavabile); pitture all’acqua o idropitture (aderiscono bene al supporto e resistono agli agenti atmosferici, degradandosi lentamente per successivo scolorimento); pitture in emulsione, costituite da pigmenti e inerti sospesi in una resina sintetica. Queste ultime, molto usate nel campo del recupero edili-

zio (come le pitture al quarzo), consentono di realizzare strati di finitura sia di grande spessore che molto sottili, ma tendono a esfoliarsi, perché non traspiranti e quindi facilmente distaccabili dal supporto, soprattutto in presenza di umidità. Esse si riconoscono, oltre che per tale caratteristico modo di degradarsi, anche per l'effetto cromatico del tutto uniforme, completamente diverso dalle sfumature presenti nelle tradizionali tinte storiche.

Le vernici sono soluzioni di resine (naturali o artificiali) miste a olii; anch'esse producono una pellicola e vengono applicate, solitamente, ai materiali lignei e a quelli metallici.

In linea generale sono definiti "tinte" tutti i prodotti per coloritura murale che non formano pellicola (tinte a calce, a tempera, ai silicati), mentre sono denominati "pitture" quei prodotti che formano un film o pellicola sulla superficie murale (UNI 8681:1984).

Il riconoscimento del tipo di finitura può essere effettuato anche in base a un esame macroscopico, osservando la superficie architettonica, la tecnica di stesura del rivestimento e, in particolare, la sua modalità di degradarsi. Le tinte, infatti, hanno un comportamento rigido (immaginando di piegare uno strato campione, esso si spezza frantumandosi), mentre le pitture presentano una certa elasticità (lo strato campione, in questo caso, tende a flettersi). Ciò significa che le tinte – a meno che non vengano additivate con resine – mostrano facilmente fessurazioni, coerenti con le lesioni del supporto e della muratura sottostante, mentre le pitture potrebbero nascondere lesioni retrostanti, manifestando piuttosto distacchi e rigonfiamenti.

Le tinte, inoltre, si degradano in genere per erosione superficiale e alterazione di colore (scolorimento) presentando distacchi e cadute localizzate e circoscritte, mentre le pitture tendono a rigonfiare e distaccarsi su superfici anche molto estese che, non appena intaccata la continuità della superficie, si estendono molto rapidamente.

Esistono studi specifici circa il riconoscimento dei diversi tipi di tinte e di pitture, anche in relazione alla tecnica di applicazione, ossia alla stesura "a fresco" o "a secco" (Santopuoli *et al.*, 2000; Musso, 2004); gli elementi da osservare, in sintesi, sono la brillantezza e la durata dei colori (nelle tempere tendono a essere asportate dall'acqua), la gamma cromatica (più limitata negli affreschi), gli eventuali segni sulla superficie (le "giornate" di esecuzione nelle superfici affrescate) e le modalità di degrado (nelle tinte a secco la caduta può essere molto superficiale, scoprendo uno strato sottostante liscio, mentre nell'affresco la caduta può essere più profonda e interessare tutto lo strato dell'intonachino, rivelando una superficie sottostante più ruvida).

Per quanto riguarda le tecniche di indagine diagnostica, bisogna innanzitutto individuare se i componenti (leganti, pigmenti, additivi) sono di origine minerale od organica; a tale scopo si può utilizzare la diffrattometria a raggi X (XRD) per osservare i componenti cristallini, l'analisi termogravimetrica (TGA) per evidenziare i componenti organici, l'osservazione al microscopio ottico delle sezioni sottili e delle *cross section*, che evidenziano le successioni strati-

grafiche. In particolare per lo studio delle superfici dipinte possono essere utilizzate anche le analisi spettroscopiche all'infrarosso (FTIR) o RAMAN, che consentono di eseguire indagini senza prelevare campioni.

Il colore, inoltre, può essere misurato con apposita strumentazione (colorimetro) in base ai tre parametri definiti da Munsell: il tono (*hue*) indica il colore di base, la luminosità (*value*) segnala le quantità di bianco e di nero presenti, la saturazione (*chroma*) indica l'intensità di colore in relazione a una scala di grigi. In linea generale, il degrado si manifesta sui parametri di luminosità e di saturazione (ovvero il colore può risultare sbiadito o scurito da depositi superficiali), ma non su variazioni di tono, a meno che non si verifichino alterazioni chimiche dei pigmenti, per loro natura irreversibili.

Il riconoscimento di determinati pigmenti può consentire la datazione di un colore, nei casi in cui il pigmento è prodotto artificialmente a partire da una determinata epoca (*Leganti, fissativi, pigmenti*, 1978).

Al fine di ricostruire la successione cronologica delle finiture e delle coloriture, che in passato venivano applicate alle facciate degli edifici senza mai rimuovere gli strati sottostanti (essi, semmai, venivano solo scalpellati per una migliore adesione del nuovo rivestimento), è utile un'analisi stratigrafica; questa, rimuovendo con bisturi, su una piccola superficie, i diversi strati di finitura in successione, può rivelare la sovrapposizione di finiture e colorazioni differenti (Laurenzi Tabasso, 1990).

### 3.3.7. Materiali metallici

I metalli si trovano in natura allo stato di composti, a eccezione dei metalli nobili (oro, argento, rame), che possono trovarsi allo stato puro. Furono quindi questi ultimi a essere usati per primi, mentre a partire dal II millennio a.C. iniziarono i procedimenti metallurgici per la realizzazione delle prime leghe (bronzo), tramite fusione. La produzione di oggetti di ferro inizia più tardi, verso il 1200 a.C., a causa della sua difficile estrazione (Matteoli, Violi, De Santis, 1979).

I metalli utilizzati per l'edilizia possono essere costituiti da metalli "elementari", ovvero sostanze costituite da atomi di un unico elemento chimico (come ferro, piombo, rame, alluminio), oppure da leghe metalliche, ottenute combinando due o più metalli (bronzo, ottone) o un metallo con altri componenti (acciaio, ghisa).

Le principali caratteristiche dei metalli sono: la struttura chimica cristallina omogenea (che li rende isotropi), l'elevata conducibilità (termica ed elettrica), le caratteristiche di lavorabilità (duttilità e malleabilità), la tendenza a ossidarsi in combinazione con l'ossigeno producendo una pellicola superficiale costituita da ossidi.

I principali metalli utilizzati nell'edilizia storica sono di seguito descritti (Gimma, 1989; Marabelli, 1995; Varagnoli, 1996; Dal Mas, 2004b).

Il ferro, di colore grigio lucente, si ossida molto facilmente se esposto all'a-

ria umida, producendo una patina facilmente sgretolabile (ruggine o carbonato basico idrato) che intacca sempre più profondamente il materiale, fino alla perdita completa (i fenomeni di corrosione possono essere innescati anche dal contatto con altri materiali, tra cui il gesso). Le più importanti leghe di ferro sono la lega ferro-nichel, la ghisa e l'acciaio, ottenute da combinazioni diverse di ferro e carbonio, con l'avvento delle tecnologie industriali. In particolare, le maggiori temperature di lavorazione consentirono, già ai primi del Settecento, la produzione della ghisa (ferro, carbonio e silicio), molto usata nell'edilizia ottocentesca; essa ha un comportamento meccanico di tipo "litoide", poiché resiste bene a compressione ma non a trazione ed è fragile. Con la sperimentazione di procedimenti per rendere la ghisa più pura e migliorarne le caratteristiche meccaniche, venne brevettato nel 1784 il ferro pudellato, resistente a trazione, con il quale fu costruita la Torre Eiffel; più tardi si ottenne l'acciaio, con proprietà meccaniche molto superiori, ma poco resistente a corrosione.

Il rame, dal tipico colore rosso lucente, si ossida producendo, a seconda delle condizioni ambientali in cui è esposto, una patina verde-azzurra oppure bruna (in questo caso, come in altre patine metalliche – eccetto la ruggine del ferro, che è un fenomeno degenerativo –, tale patina protegge il materiale e non è da considerarsi degrado). Le principali leghe del rame sono il bronzo (ottenuto solitamente dalla combinazione di rame e stagno, talora anche con piombo e zinco) e l'ottone (ottenuto dalla combinazione di rame e zinco), dal tipico colore dorato.

Il piombo, di colore grigio-azzurro, poco lucente, si ossida facilmente diventando opaco. È un metallo tenero, molto malleabile, non adatto a funzioni strutturali per la sua scarsa resistenza meccanica, ma largamente usato nei rivestimenti per la possibilità di piegarsi e adattarsi a spigoli e forme curve (cupole); fu molto usato, nell'antichità, anche allo stato fuso per saldare i perni di collegamento tra conci lapidei. In presenza di acido carbonico (o a contatto con malte di calce, cemento o anche con alcuni tipi di legno, come quercia, castagno, cedro) subisce fenomeni di corrosione anche molto gravi.

Lo zinco, di colore bianco-azzurro, e lo stagno, di colore bianco-argenteo, raramente venivano usati da soli, ma solitamente venivano aggiunti al rame nelle leghe. Per la loro resistenza agli agenti atmosferici vengono usati anche per rivestire il ferro con una patina e proteggerlo dalla corrosione (latta, lamiera di ferro stagnato, o ferro zincato).

In prima approssimazione i metalli possono essere distinti in due categorie, facilmente riconoscibili mediante una calamita: magnetici (ferro, nichel, acciaio) e non magnetici (rame, zinco, alluminio, ottone e bronzo). Sulla base di una osservazione macroscopica delle loro caratteristiche fisiche e delle tecniche di lavorazione (Musso, 2004) è possibile avanzare alcune ipotesi e condurre ulteriori indagini di approfondimento, quali la fluorescenza a raggi x (XRF) eseguita direttamente sulla superficie dopo aver rimosso localmente la patina; l'osservazione al microscopio elettronico (SEM-EDS); la spettrometria di assorbimento atomico (AAS), eseguita su un microprelievo; la diffrazione

raggi x (XRD), che consente di riconoscere le sostanze cristalline presenti (Sansonetti, 1999).

### 3.3.8. Vetri

Sono materiali isotropi caratterizzati da un'elevata viscosità, ottenuti lavorando a caldo una miscela di silice, di silicati alcalini e alcalino-terrosi, che vengono fusi formando una pasta lavorabile; questa, subendo un rapido raffreddamento, non ha il tempo di formare i reticoli cristallini e assume una struttura amorfa. I componenti base del vetro sono, dunque: la silice ( $\text{SiO}_2$ ), che ha funzione vetrificante; gli alcali (ossidi di sodio, di potassio, di calcio), impiegati come fondenti per abbassare la temperatura in cui il vetro è lavorabile; a questi componenti di base possono essere aggiunti, come coloranti, ossidi metallici o altri pigmenti (Cinquegrana de Divitiis, Piccioli, 1997; Dal Mas, 2004c).

Le principali caratteristiche dei vetri sono la trasparenza alla luce, la durezza, la fragilità, la plasticità ad alte temperature (600-800 °C).

Il riconoscimento dei vetri si fonda sull'osservazione delle caratteristiche di trasparenza, sulla rilevazione delle tracce di produzione e di lavorazione (vetri colati entro stampi, vetri soffiati) e sulle tecniche di decorazione (vetro placcato, *grisaille*).

I vetri antichi, prodotti artigianalmente, presentano spesso numerose impurità e piccole bolle d'aria che ne pregiudicano la trasparenza e li rendono molto fragili (Agosti, Angellotto, Tommasello, 2004).

# Tecnologie per i problemi di umidità

di *Barbara Malandra e Simona Rosa*

## 4.1 Umidità e diagnostica

### 4.1.1. Introduzione

L'umidità può essere presente all'interno delle murature sotto forma di "acqua di costruzione" oppure può avere origini esterne ("acqua di invasione") ed essere assorbita in fase di vapore direttamente dall'atmosfera o in fase liquida quando si verificano fenomeni di condensa, di risalita per capillarità dal terreno e d'infiltrazione di acque meteoriche. La sua presenza all'interno o sulla superficie della maggior parte dei materiali da costruzione tradizionali si determina per via dell'interazione fisico-chimica tra molecole d'acqua e materiale da costruzione.

Il verificarsi di fenomeni di degrado da umidità è riconducibile a cause intrinseche ed estrinseche al manufatto, che possono essere identificate nelle condizioni legate alla costruzione dell'edificio (caratteristiche costitutive e difetti di progettazione o realizzazione, quali l'eccesso d'acqua negli impasti o l'errata disposizione dei sistemi per l'allontanamento delle acque meteoriche; caratterizzazione idrogeologica del sito; caratteristiche climatiche e così via) oppure nei successivi eventi di origine antropica o naturale (guasti negli impianti, mancate manutenzioni ecc.; Fiorani, 1996a).

La diagnosi delle strutture interessate da fenomeni d'umidità ha come obiettivo l'individuazione delle cause che determinano la presenza dell'acqua così da consentirne la rimozione, considerando i caratteri dell'edificio, del sito e dei "segni" (visibili o meno) lasciati dal passaggio dell'acqua attraverso le strutture e sulle superfici. In considerazione della complessità degli aspetti che occorre indagare, si comprende il ricorso al termine "diagnosi", che in ambito medico significa definire una malattia attraverso il rilevamento e l'interpretazione dei sintomi e in base agli eventuali esami di laboratorio e strumentali, nonché in considerazione dello stato clinico del paziente; si possono così identificare tre fasi correlate del processo diagnostico, solo in parte e per comodità cronologicamente distinte: una prima, di natura ricognitiva preliminare e di studio storico dell'edificio ("anamnesi"), il successivo rico-

noscimento dei diversi fenomeni di alterazione e degrado (“eziologia”), infine, il ricorso a tecniche di rilevamento anche di tipo strumentale.

Si comprende pertanto la necessità di un metodo d’approccio conoscitivo e tecnico-scientifico multidisciplinare da applicare seguendo un percorso indagativo complesso, in cui l’osservazione e il rilevamento delle manifestazioni visibili dei meccanismi di degrado causati dalla presenza di umidità nelle strutture s’inseriscono nel quadro dell’interpretazione storico-critica della fabbrica e forniscono a loro volta elementi utili alla conoscenza delle caratteristiche tecnico-costruttive e alla comprensione delle vicende evolutive dell’edificio.

Non esiste una procedura normalizzata di diagnosi, sebbene in Italia va ricordata l’attività svolta da alcuni anni all’interno della Commissione NORMAL (attualmente Commissione UNI/NORMAL) finalizzata all’elaborazione di documenti che disciplinano le modalità di svolgimento di prove e indagini volte alla conoscenza dell’edificio e del suo stato di conservazione.

L’indagine visiva rappresenta generalmente il punto di partenza dello studio; tuttavia, nella maggior parte dei casi, una disamina risolutiva dei problemi richiede la realizzazione di un controllo strumentale mirato. È innanzitutto fondamentale stabilire se i fenomeni legati alla presenza di umidità sono ancora in atto o se, viceversa, le tracce lasciate sulla struttura dal passaggio dell’acqua si riferiscono a un evento concluso o a cause ormai rimosse. L’osservazione diretta permette di formulare le ipotesi sulla base di informazioni esclusivamente qualitative, mentre il successivo vaglio quantitativo consente la verifica o l’opportuna modifica degli scenari ipotizzati (D’Urbano, Pandolfi, Pietrini, 1998; Salemi, 2000; Niglio, 2004).

Le patologie da umidità sono spesso ingannevoli: frequentemente ci si può trovare in presenza di ambienti umidi dove gli effetti della presenza dell’acqua non si manifestano visivamente. In questi casi, l’impiego di metodi strumentali d’indagine permette di verificare se la quantità d’acqua presente corrisponde o meno alle condizioni d’equilibrio determinabili sperimentalmente al variare dell’umidità relativa dell’ambiente, note le caratteristiche fisico-chimiche dei materiali.

Sulla base delle osservazioni condotte sull’edificio e sul contesto e di un adeguato studio storico-conoscitivo preliminare si è in grado di predisporre un vero e proprio progetto diagnostico, così da rendere possibile lo svolgimento mirato di indagini selezionate sulla base dello stato di conservazione della fabbrica (D’Urbano, Pandolfi, Pietrini, 1998; Niglio, 2004; Besana, 2005).

La letteratura scientifica distingue fra tecniche e metodi “distruttivi” e “non distruttivi”, separazione peraltro piuttosto aleatoria, poiché prescinde dalle condizioni di conservazione del manufatto e dalle finalità delle indagini (Niglio, 2004). Al di là del valore relativo di questa classificazione, rimane comunque la necessità di privilegiare le operazioni meno invasive (D’Urbano, Pandolfi, Pietrini, 1998).

Nell’ottica della conservazione del bene storico-artistico da investigare si è già affermato da alcuni anni il “monitoraggio ambientale” strumentale. L’indi-



viduazione e la descrizione delle patologie legate alla presenza dell'umidità vengono fatte sulla base dell'interpretazione dei fenomeni fisici da cui dipendono le alterazioni che si verificano a seguito delle interazioni fra l'ambiente e le architetture e al variare delle condizioni di equilibrio. Tali alterazioni vengono interpretate quali conseguenze di trasformazioni termodinamiche subite dal sistema ambiente-manufatto.

L'attività di monitoraggio assume un'importanza notevole anche dopo la realizzazione dei lavori di risanamento, sia per verificare l'efficacia degli interventi eseguiti, sia per tenere sotto controllo un sistema soggetto a possibili variazioni. Le tecniche di monitoraggio ambientale, infine, trovano un loro ampio campo di applicazione nel controllo dei sistemi museali, dove alla necessità di conservare l'edificio si affiancano esigenze espositive e di salvaguardia delle opere d'arte.

#### 4.1.2. L'acqua e l'interazione con la costruzione

L'interazione fisico-chimica che ha luogo tra le molecole d'acqua e la superficie dei materiali si verifica in ragione della natura elettrochimica delle prime e dipende sia dalla composizione delle superfici esposte al contatto con l'acqua, sia dalle caratteristiche e dalle proprietà fisiche dei materiali.

Le caratteristiche di legame tra gli atomi di ossigeno e idrogeno sono tali che la molecola d'acqua, pur essendo elettricamente neutra, è dotata di cariche positive e negative (poli elettrici); a seconda delle specificità elettrochimiche dei materiali e della loro conseguente capacità di attrazione, essi possono essere classificati in "idrofili" e "idrofobi".

È idrofila la maggior parte dei materiali da costruzione (mattoni, intonaci, pietre, calcestruzzo, vetro, legno, carta, metalli). Tali materiali presentano sulla superficie gruppi dipolari ossidrilici ( $-O-H^+$ ) o ioni ( $Ca^{++}$ ,  $CO_3^{--}$ ) oppure ancora legami ionico-covalenti ( $Si^+-O^-$ ,  $Al^+-O^-$ ): tra questi gruppi dotati di carica elettrica e la molecola polare dell'acqua si stabiliscono forze attrattive. Viceversa, si definiscono idrofobi quei materiali che non hanno dipoli elettrici o ioni (o ne hanno pochi) in superficie, ovvero materiali che presentano gruppi dotati di bassa elettronegatività (gruppi  $-C-C$  o  $-C-H$ ), quali idrocarburi, grassi od olii, materie plastiche come i siliconi). Questi, per tale loro caratteristica possono essere applicati sulla superficie di materiali idrofili per conferire loro proprietà idrorepellenti (Torraca, 2002).

Si richiamano sinteticamente le principali caratteristiche e le proprietà fisiche dei materiali da costruzione.

*Porosità e permeabilità* Ogni materiale tende ad assorbire vapore dall'ambiente in quantità proporzionale alla sua porosità e alla percentuale di vapore contenuta nell'aria, nonché in ragione inversa al suo contenuto di acqua. Per ogni valore dell'umidità relativa dell'aria a una data temperatura, quindi, esiste una condizione di equilibrio corrispondente a un particolare contenuto di

umidità nel materiale, determinabile sperimentalmente; quando il contenuto di umidità supera questo valore di equilibrio, l'eccesso d'acqua è da mettere in relazione con cause esterne.

I materiali da costruzione possiedono al loro interno una certa quantità di vuoti, genericamente definita "porosità"; i pori possono essere chiusi, non comunicanti tra di loro ("porosità chiusa"), oppure "a canale", comunicanti tra loro e formanti reticoli ("porosità aperta"). Sono impermeabili i materiali caratterizzati da porosità chiusa; viceversa, i materiali a porosità aperta sono in grado di assorbire acqua per capillarità e di consentirne la circolazione all'interno della struttura attraverso la rete di canali intercomunicanti. Questa possibilità dipende dalla dimensione dei pori, ovvero dalla porometria, definita come la «ripartizione dei pori aperti in funzione della loro dimensione» (Salemi, 2000, p. 32), da cui dipende in misura maggiore la vulnerabilità di certi materiali rispetto ad altri nei confronti di alcuni meccanismi di degrado fisico-meccanico legati alla presenza di umidità, quali cristallizzazione salina e gelività (Salemi, 2000; Torraca, 2002; Bosia, 2005; Mundula, Tubi, 2006).

*Capillarità* L'ingresso e la diffusione dell'umidità nelle murature sono dovuti al fenomeno fisico della capillarità. In presenza di materiali idrofilici e porosi, l'acqua viene assorbita e trattenuta all'interno dei capillari, dove può risalire, anche se contrastata dall'azione della gravità, grazie alle forze intermolecolari attrattive che si esercitano nell'interfaccia acqua-superficie interna dei pori. Essa raggiunge in tal modo altezze di risalita che, a parità di altre condizioni, dipendono dalla porometria e dalla natura fisico-chimica della superficie del poro ("legge di Jurin").

In un muro con risalita di umidità dal terreno, tuttavia, l'altezza non raggiunge i valori ricavabili in linea teorica: condizioni al contorno influiscono sul fenomeno della risalita, in concomitanza del quale si verifica il processo di evaporazione dell'acqua assorbita dal muro. L'acqua risale all'interno del muro fino al raggiungimento delle condizioni d'equilibrio da parte del sistema: il muro può essere assimilato a una condotta idrica in cui il livello di risalita si stabilizza solo quando la quantità assorbita in corrispondenza della sezione a contatto con il terreno ("portata della sezione assorbente") eguaglia la "portata in uscita", ovvero la quantità d'acqua persa per evaporazione attraverso le pareti ("bilancio idrico"; Massari, Massari, 1981). Si tratta di un equilibrio dinamico, legato alle condizioni climatiche (temperatura, umidità relativa, velocità dell'aria, condizioni di esposizione e soleggiamento) e alle caratteristiche costruttive. La disposizione di zoccolature poco permeabili al vapore o di eventuali rivestimenti che modificano le caratteristiche e l'estensione della superficie evaporante, come intonaci impermeabili o piastrelle, condiziona sensibilmente il comportamento della parete. Il massimo livello d'innalzamento è, in generale, proporzionale al contenuto d'umidità atmosferica e all'ampiezza della sezione muraria e inversamente proporzionale alla grandezza della superficie d'evaporazione, oltre che dipendente dalle caratteristiche climatiche di esposizione.

Sempre in analogia con quanto accade in una condotta idrica, si comprende il motivo per cui il prosciugamento di un muro con umidità di risalita comincia dalla parte superiore della zona umida, dove solitamente sono localizzati i fenomeni di degrado: all'aumentare della velocità di evaporazione e, di conseguenza, di risalita si verifica una perdita di carico per attrito, responsabile del prosciugamento, ovvero dell'abbassamento della linea di demarcazione tra asciutto e umido ("ipotesi di Kettenacker").

Si osserva che il fenomeno dell'assorbimento per capillarità è responsabile dell'avanzamento dell'acqua anche in direzioni diverse da quella verticale; essa viene infatti aspirata e diffusa attraverso le "reti capillari" che si possono determinare sulla superficie esterna di muri perimetrali dotati di rivestimenti particolari (come avviene con i giunti fra le piastrelle) oppure dopo l'apparizione di fenomeni di degrado (quali cavillature dell'intonaco esterno).

Nella diagnosi dei problemi da umidità le prove di laboratorio per immersione in acqua dei campioni presentano un interesse limitato; esse studiano le caratteristiche di assorbimento dei materiali edilizi, i quali non si trovano mai completamente immersi nelle normali condizioni di posa in opera. Assumono invece una certa importanza le prove condotte su campioni che attingono l'acqua da una porzione limitata di superficie (prove di assorbimento "in emersione"), che riproducono con buona approssimazione ciò che avviene in presenza di umidità ascendente dal terreno, consentendo la misurazione del "coefficiente di adesamento" (quantità di acqua assorbita in emersione) e della "potenza di adesamento" (quantità in peso assorbita nell'unità di tempo; Massari, Massari, 1981).

Data l'eterogeneità delle modalità costruttive e dei materiali nelle murature storiche, le loro caratteristiche di permeabilità e assorbimento (in particolare nei paramenti esterni) possono essere indagate *in situ* impiegando strumenti e attrezzature portatili quali la "scatola di assorbimento" e il "tubo di assorbimento" (Cigni, Codacci Pisanelli, 1987; Biscontin, 1988; Massari, Massari, 1981; Aveta, 1996; Salemi, 2000; Bosia, 2005; Mundula, Tubi, 2006).

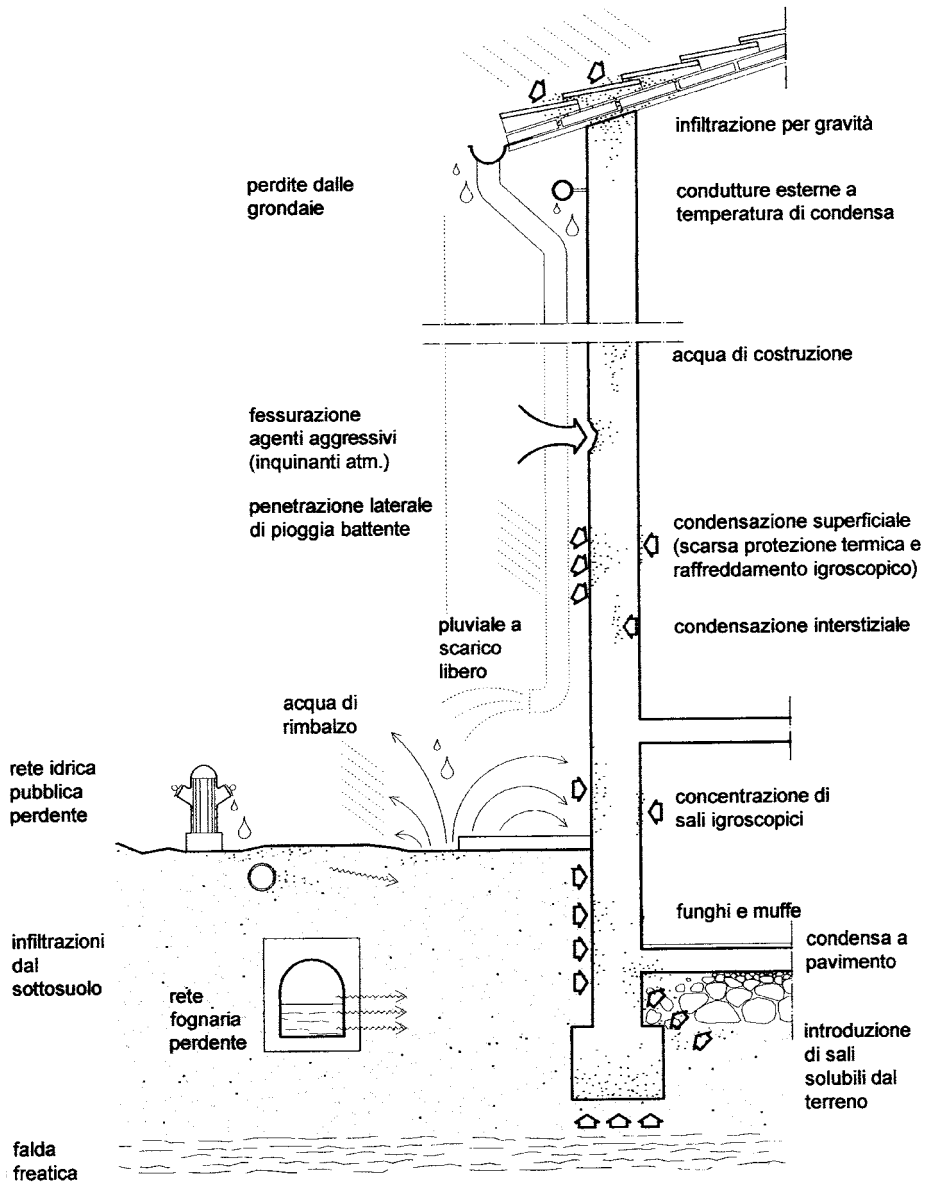
La presenza di umidità nelle costruzioni può essere riconducibile alle seguenti casistiche (FIG. 4.1).

*Umidità da costruzione* I fenomeni connessi all'umidità da costruzione possono essere rilevati anche in edifici molto antichi in considerazione del tempo necessario ("tempo di prosciugamento") affinché un muro si asciughi completamente (Cigni, Codacci Pisanelli, 1987; Cattaneo, 1999; Salemi, 2000; Bosia, 2005).

*Umidità da infiltrazione* Infiltrazioni d'acqua attraverso le strutture murarie possono avere origine meteorica oppure essere ricondotte alla presenza di acque disperse presenti nel terreno o all'interno di un edificio per cause accidentali (perdita o rottura di conduttore per alimentazione, riscaldamento, smaltimento ecc.).

Sono esposte al rischio d'infiltrazione delle acque meteoriche le pareti

FIGURA 4.1  
Cause della presenza d'umidità nelle strutture murarie



Fonte: rielaborazione da Cesari, Gelsomino, Massa (1988).

esterne che presentano evidenti soluzioni di continuità dipendenti da caratteristiche intrinseche alla fabbrica (FIG. 4.2) oppure difetti dovuti al degrado (intonaci fessurati, malte deteriorate, infissi e coperture fatiscenti ecc.). Tali fattori incidono in modo differente anche in presenza di diverse condizioni al contorno, quali l'esposizione, la direzione dei venti, le caratteristiche orografiche del sito ecc.

In un muro in buone condizioni e senza apparenti discontinuità, l'eventualità d'attraversamento dell'acqua piovana è limitata alle sole precipitazioni a vento intense e frequenti che non consentono evaporazione sufficiente. Nei casi più frequenti alle nostre latitudini, il contributo principale del vento consiste nel portare l'acqua a contatto con il muro; si attivano così un assorbimento orizzontale per capillarità e il successivo raffreddamento della struttura. Quest'ultimo sarà tanto maggiore quanto più velocemente avviene l'evaporazione dell'acqua che ha bagnato la superficie esterna: gli effetti di questa evaporazione espongono la superficie interna del muro al rischio di un concomitante fenomeno di condensazione, qualora si raggiunga il punto di rugiada (ossia la temperatura in cui il vapore contenuto nell'aria raggiunge lo stato liquido; FIG. 4.3).

La presenza d'acqua sulle superfici murarie esterne può infine essere dovuta all'azione di rimbalzo della pioggia sui basamenti delle fabbriche (Cigni, Codacci Pisanelli, 1987; Cesari, Gelsomino, Massa, 1988; Massari, Massari, 1981; Aveta, 1996; Salemi, 2000; Cattaneo, 1999; Bosia, 2005; Mundula, Tubi, 2006).

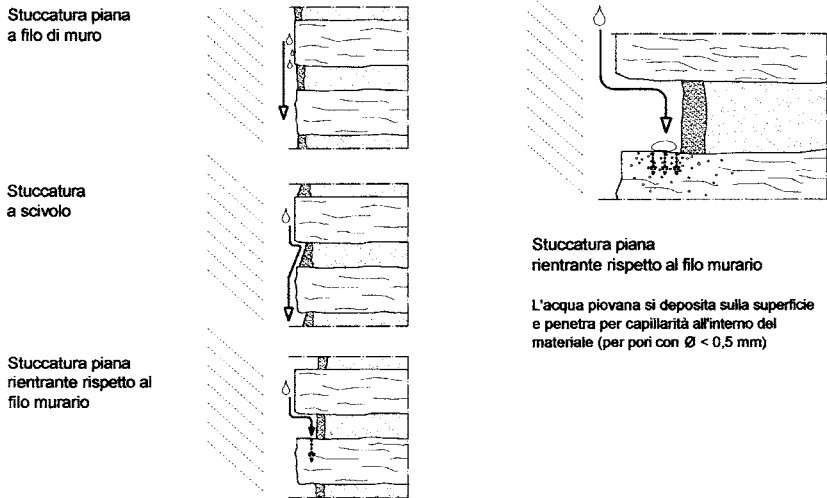
*Umidità da risalita* L'umidità può risalire per capillarità dal terreno imbibito d'acqua per la presenza nel sottosuolo di una "falda freatica" o di "acque disperse di scorrimento".

Il fenomeno della risalita d'umidità da falda è strettamente connesso con le caratteristiche geologiche del terreno di fondazione. Interessa in primo luogo gli strati superiori del terreno: non si ha alcun fenomeno di risalita se la falda è separata dalle strutture di fondazione da strati drenanti oppure se è posta a profondità notevoli (maggiori di 4-5 m). Il fenomeno è in genere continuo nel tempo, a meno di leggere variazioni legate alle alternanze cicliche stagionali ed, eventualmente, alle trasformazioni dell'assetto idrogeologico del sottosuolo.

La presenza di acque disperse è dovuta alle precipitazioni atmosferiche che impregnano il terreno in assenza di un adeguato sistema di raccolta e smaltimento oppure a difetti di costruzione e a mancata o errata manutenzione dell'edificio e degli impianti. Caratteristiche orografiche, geologiche e di sistemazione delle pertinenze esterne dell'edificio possono favorire un ristagno in corrispondenza delle pareti perimetrali, come avviene in muri realizzati su terreni in pendenza o poco drenanti, attraverso cui l'umidità risale dal livello di terra anziché da quello fondale.

Quale ne sia l'origine, l'umidità risale per capillarità solo con il contemporaneo verificarsi di due condizioni: l'imbibizione o la totale immersione della

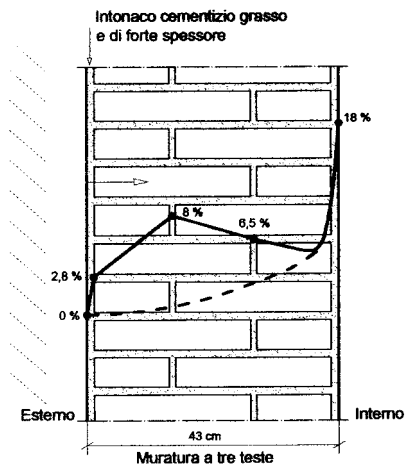
FIGURA 4.2  
Cause intrinseche d'infiltrazione dell'acqua piovana



La stuccatura dei giunti del paramento esterno può costituire un valido presidio contro le infiltrazioni se rifinita a filo o a scivolo.

Fonte: rielaborazione da Cesari, Gelsomino, Massa (1988).

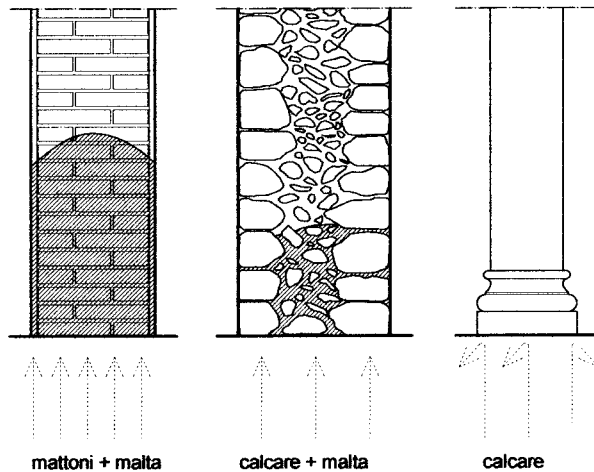
FIGURA 4.3  
Diagramma rappresentativo del contenuto percentuale d'umidità in un muro interessato da infiltrazioni d'acqua piovana. Il muro è esposto a violenta bora all'esterno e a condensa sulla faccia interna



Il ramo tratteggiato in figura indica l'andamento della curva senza il ritardo di evaporazione dovuto all'applicazione esterna di uno spesso strato d'intonaco cementizio (tratto a linea continua).

Fonte: rielaborazione da Massari, Massari (1992).

FIGURA 4.4  
Risalita capillare e caratteristiche costruttive



Le caratteristiche di assorbimento per capillarità di una struttura variano con il tipo di materiale e con le tecniche costruttive impiegate.

Fonte: rielaborazione da Cesari, Gelsomino, Massa (1988).

base muraria (in caso contrario, l'umidità presente nelle strutture si sposterebbe per gravità verso il basso non essendo sostenuta alla base da una colonna capillare alimentata dalla zona sottostante) e l'attivazione d'una buona potenza di adescamento, legata alle caratteristiche costruttive della fabbrica (FIG. 4.4; Vignali, 1983; Cigni, Codacci Pisanelli, 1987; Biscontin, 1988; Cesari, Gelsomino, Massa, 1988; Massari, Massari, 1981; Aveta, 1996; Cattaneo, 1999; Salemi, 2000; Bosia, 2005; Mundula, Tubi, 2006).

*Umidità da condensa* Il vapore acqueo presente nell'atmosfera può trovarsi all'interno d'un ambiente con concentrazione e pressione parziale diverse, variabili con le condizioni termoigrometriche. Queste ultime sono descritte da un insieme di grandezze fisiche tra loro correlate (temperatura dell'aria, umidità specifica, umidità assoluta di saturazione, pressione del vapore e del vapore saturo, umidità relativa); le variazioni di tali grandezze sono correlate alle trasformazioni di fase dell'acqua presente nell'atmosfera o contenuta nelle murature.

La formazione di condensa si verifica per il raggiungimento di locali condizioni di saturazione ( $UR = 100\%$ ), ovvero quando la pressione parziale del vapore eguaglia la pressione di saturazione; ciò può avvenire nelle pareti sia sulla superficie, interfaccia di scambio con l'aria-ambiente, sia all'interno del muro (il vapore può infatti migrare attraverso la sezione della parete in presenza di gradienti igrometrici, ovvero di differenze di pressione fra interno ed esterno, e in assenza di barriere che ne ostacolino il flusso).

In entrambi i casi, la condensa può avvenire sia per diminuzione della temperatura superficiale dei materiali fino a raggiungere un determinato valore (“temperatura di rugiada”), sia per un aumento della quantità di vapore fino al valore massimo ammissibile in determinate condizioni di temperatura, ovvero per un aumento della pressione parziale del vapore fino al raggiungimento del valore della pressione di saturazione.

Per determinare le condizioni di saturazione, si può ricorrere all’uso del diagramma “psicrometrico” (FIG. 4.5; Cigni, Codacci Pisanelli, 1987; Arcangeli, Augelli, 1987; Cesari, Gelsomino, Massa, 1988; Massari, Massari, 1981; Aveta, 1996; Cattaneo, 1999; Salemi, 2000; Bosia, 2005; Mundula, Tubi, 2006).

*Condensa superficiale (e ponti termici)* Caratteristiche costruttive e disomogeneità dei materiali impiegati incidono sul fenomeno della condensa, il quale si verifica quanto più alto è il coefficiente di conducibilità termica interna del materiale. Tale coefficiente aumenta all’aumentare del peso specifico e dell’eventuale contenuto d’acqua che può avere origine diversa. Sono esposte al rischio di condensa le pareti “fredde” che, per ubicazione e caratteristiche costruttive, si trovino a una temperatura più bassa di quella dell’aria e i “ponti termici”, zone murarie a minore resistenza termica dove sono stati utilizzati materiali più pesanti; in entrambi i casi il fenomeno si verifica, comunque, solo quando si raggiunge il punto di rugiada.

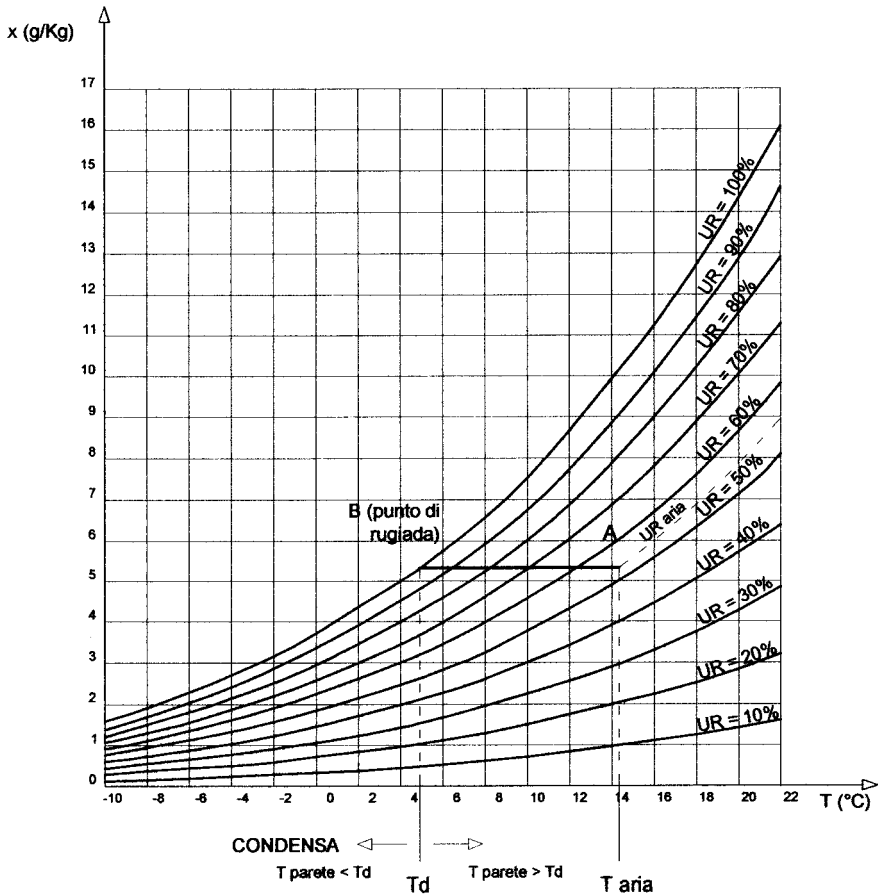
*Condensa interstiziale* Per verificare il rischio di condensazione in una struttura occorre conoscere l’andamento delle pressioni parziali e la distribuzione delle temperature all’interno della muratura. Anche se sono stati elaborati alcuni metodi grafici (come il “metodo di Glaser”), risulta evidente che nel campo della conservazione delle strutture murarie antiche, le quali sono solitamente poco omogenee, è molto difficile analizzare il fenomeno in termini geometrici e fisico-matematici esatti.

*Caratteristiche stagionali dell’umidità da condensa* La formazione di condensa all’interno degli edifici ha un andamento discontinuo al variare delle stagioni: in inverno il fenomeno può manifestarsi sulle pareti interne quando i locali non sono riscaldati o sufficientemente protetti dal raffreddamento dell’aria esterna per la bassa inerzia termica delle murature; viceversa, in estate, condizioni termiche favorevoli alla condensa dell’aria calda e umida proveniente dall’esterno si possono avere in corrispondenza di muri spessi e dei pavimenti nei locali al pian terreno o ipogei.

Altre forme di condensa a carattere transitorio, difficili da diagnosticare “ad occhio” in quanto legate a precisi eventi climatici, possono interessare le strutture murarie durante la stagione invernale, in concomitanza, per esempio, al verificarsi di repentini cambiamenti meteorologici, caratterizzati da depressione barometrica e aumento delle temperature, che possono dare origine alla formazione di goccioline sulle superfici di ambienti aperti (androni, scale, porticati ecc.) ubicati al pian terreno o di strutture murarie caratterizzate da notevoli spessori (“stillicidio sciroccale”; Massari, Massari, 1981). Altro fenomeno



FIGURA 4.5  
 Diagramma psicrometrico



Consente di verificare le condizioni di condensa a partire dal valore di temperatura e di umidità relativa (o umidità specifica) dell'aria. Si segue la trasformazione a umidità specifica costante, a partire dal punto rappresentativo nel diagramma delle condizioni termoisometriche dell'aria ambiente (A) sino a raggiungere la curva di saturazione ("punto di rugiada"; B); se la temperatura della parete ( $T_{\text{parete}}$ ) risulta inferiore o uguale alla temperatura corrispondente al punto di rugiada ("temperatura di rugiada";  $T_d$ ) si avrà formazione di condensa.

Fonte: rielaborazione da Arcangeli, Augelli (1987).

transitorio, tipicamente invernale (possibile, ma con minore intensità, anche d'estate con il raffreddamento notturno), consiste nella comparsa di acqua nei locali seminterrati o interrati nella zona basamentale dei muri e a ridosso della quota pavimentale ("zona critica" di Knapen) per effetto della condensa del vapor acqueo contenuto nell'aria "tellurica" che può risalire grazie a moti ascensionali causati da depressioni barometriche. L'umidità proveniente dal

sottosuolo trova una via d'uscita preferenziale verso l'alto alla base dei muri, formando condensa, o attraverso i giunti delle lastre pavimentali, che assumono per questo un colore più scuro proprio sui bordi (Massari, Massari, 1981; Aveta, 1996; Salemi, 2000).

*Umidità da igroscopicità* Sali solubili igroscopici presenti in una muratura sono in grado di assorbire umidità dall'atmosfera e possono essere soggetti a dissoluzione in condizioni di elevata umidità relativa (comunque inferiore al valore di saturazione dell'aria). Al variare delle condizioni termoigrometriche, questi possono essere pertanto causa di fenomeni di alterazione, come la comparsa di macchie e aloni, e di degrado connessi ai cicli di cristallizzazione salina, assorbimento d'umidità e dissoluzione dei sali (Massari, Massari, 1981; Fiorani, 1996a; Massari, 2003).

#### 4.1.3. Ricognizione preliminare e indagine visiva: impostazione della diagnostica

Lo studio dei problemi da umidità prevede l'impiego di tecniche diagnostiche diverse, fra le quali solo alcune presentano carattere strumentale.

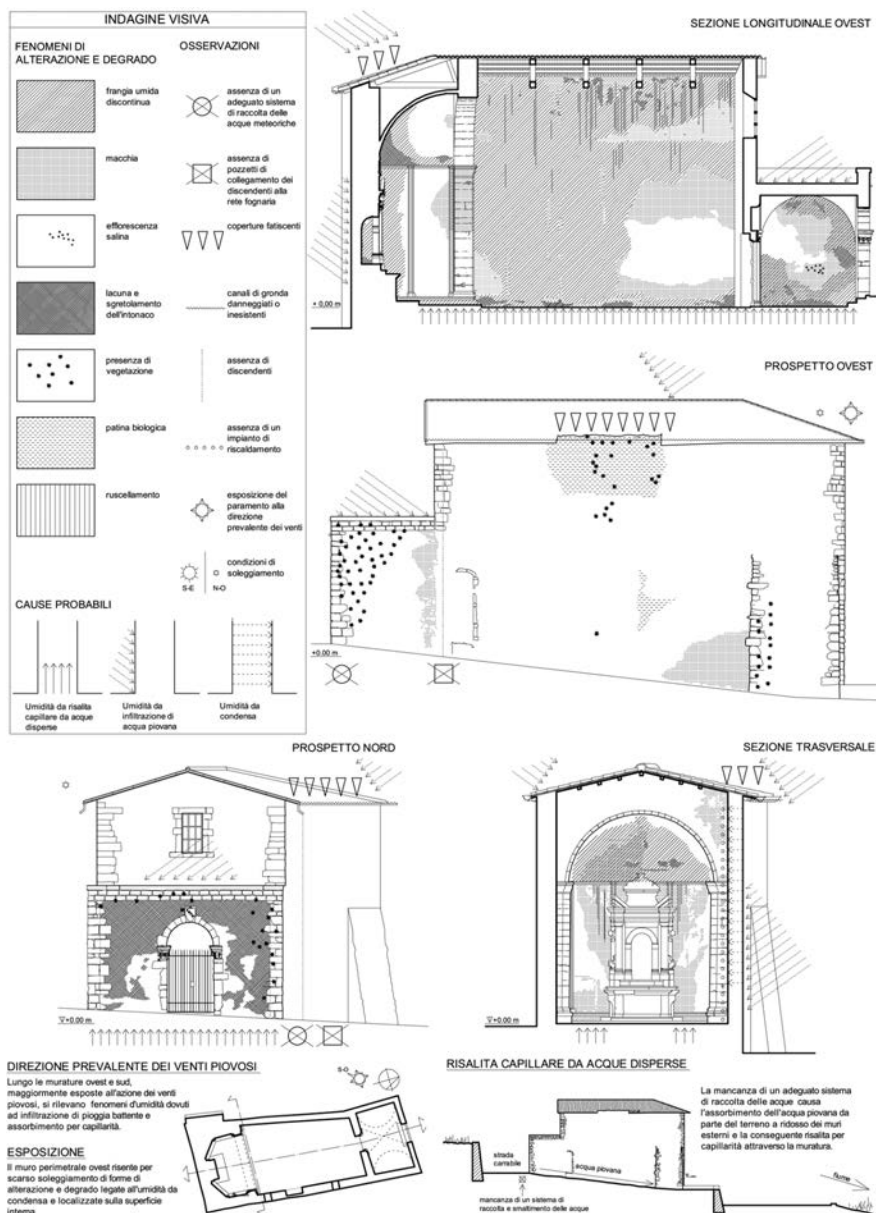
Nell'ambito di una ricognizione preliminare (possibilmente accompagnata dallo studio storico-critico dell'edificio) può essere utile far ricorso all'elaborazione grafica delle informazioni raccolte tramite apposite tavole sinottiche, ovvero "mappature tematiche" (FIG. 4.6) che illustrino la presenza di acqua

TABELLA 4.1

Ricognizione diagnostica preliminare. Sintesi delle informazioni utili nella diagnosi dei problemi da umidità da reperire tramite l'osservazione visiva e lo studio storico-critico dell'edificio

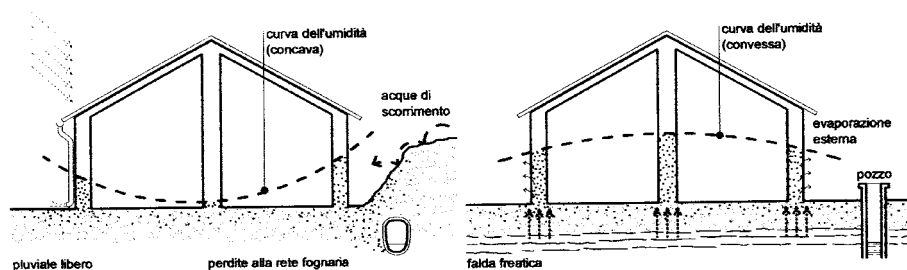
L'edificio	Il sito	Fenomeni di alterazione e degrado
Fasi costruttive ed eventuali restauri, risanamenti e manutenzioni già eseguite. Materiali e tecniche costruttive. Destinazione di uso e modalità di fruizione del bene. Presenza di impianti di riscaldamento e/o condizionamento e modalità e orari di funzionamento. Condizioni di cattiva manutenzione o errata progettazione/realizzazione.	Caratteristiche geografiche e orografiche. Caratteristiche idrogeologiche. Condizioni di esposizione (soleggiamento, esposizione ai venti ecc.). Caratteristiche della vegetazione (ad esempio, presenza di sempreverdi). Caratteristiche di manutenzione delle opere della rete di distribuzione e di quella fognaria. Caratteristiche degli edifici circostanti e dei fenomeni rilevabili.	Presenza di acqua di condensa sulle superfici. Variazioni dimensionali e conseguenti deformazioni e fessurazioni di elementi edilizi (pavimenti, infissi ecc.). Macchie e aloni. Efflorescenze. Scagliature, erosioni e disgregazioni di materiali lapidei e laterizi. Rigonfiamenti, distacchi e disgregazione degli intonaci. Degrado biologico (muschi, licheni, funghi, muffe e piante superiori).

FIGURA 4.6  
Sulmona (L'Aquila), chiesa di S. Maria di Roncisvalle. Mappatura tematica del degrado da umidità e prime ipotesi diagnostiche



Fonte: esame di Restauro architettonico, facoltà di Ingegneria Edile-Architettura, Università degli Studi dell'Aquila, a.a. 2001-02, prof. D. Fiorani, studenti N. Carusi, B. Malandra.

FIGURA 4.7  
Andamento della curva della soglia dell'umidità in presenza di risalita da acque disperse e da falda freatica



Fonte: rielaborazione da Cesari, Gelsomino, Massa (1988).

nelle strutture, «i percorsi preordinati “fisiologici” delle acque meteoriche (pendenza delle coperture, doccioni, grondaie, discendenti interni o esterni, pozzetti di raccolta, cornici e sporti sulle strutture esterne in elevazione ecc.), i percorsi preferenziali “patologici” dovuti all’inefficienza di uno, o più, dei precedenti sistemi di protezione, allontanamento e raccolta, le reti idriche interne ed esterne, la localizzazione e la morfologia dei danni specifici, l’inserimento topologico della costruzione» e così via (D’Urbano, Pandolfi, Pietrini, 1998, p. 331).

Le patologie elencate in TAB. 4.1 sono riconducibili a meccanismi di degrado fisico-meccanico, chimico e biologico.

Fenomeni di tipo disgregativo accompagnano le tensioni esercitate all’interno dei materiali sia dai cicli di gelo e disgelo sia dalla cristallizzazione dei sali, ben visibile nella zona di bagnasciuga di un muro. Rigonfiamenti e distacchi della superficie intonacata esterna possono essere attribuiti alle pressioni esercitate sui materiali dalla formazione di cristalli di sale o di ghiaccio o alle sovrappressioni del vapore al di sotto della finitura superficiale che, per insufficienti caratteristiche di traspirabilità e permeabilità, ostacola la fuoriuscita del vapore stesso. La comparsa di macchie isolate può essere dovuta a infiltrazioni d’acqua piovana, che prediligono le zone di discontinuità nelle pareti o, più frequentemente, in copertura. Aloni e macchie isolate possono essere inoltre ricondotti a fenomeni di condensa o alla presenza di sali igroscopici. La stessa presenza di specie biologiche diverse, la cui crescita è favorita dalla disponibilità d’acqua, può essere interpretata come sintomo della presenza di umidità.

È infine possibile ipotizzare la causa dell’umidità di risalita (da falda o da acqua disperse) sulla base delle modalità di diffusione del fenomeno nell’edificio, delle caratteristiche del sito e dell’altezza dei fronti di risalita (FIG. 4.7; TAB. 4.2).

Per distinguere i fenomeni di umidità da risalita da quelli di condensa oc-

TABELLA 4.2

Caratteristiche distintive dell'umidità da risalita

	Umidità di risalita da falda freatica	Umidità di risalita da acque disperse
<i>L'edificio</i>	Attacca l'edificio in tutta la sua estensione con perfetta uniformità, salvo che l'ossatura sia costruita con materiali diversi, se le caratteristiche del sito permangono costanti.	Ha manifestazioni imponenti, ma spesso localizzate su un solo lato o su una sola parte dell'edificio.
<i>Il sito</i>	È comune a tutti gli edifici coevi della stessa zona e omogenei per materiali impiegati.	È caratteristica di un solo edificio o di un limitato gruppo di edifici in cui siano stati impiegate le stesse tecnologie costruttive e i medesimi materiali e che insistono in una stessa area omogenea per caratteristiche geologiche.
<i>L'altezza di risalita</i>	L'altezza di risalita è tendenzialmente uniforme. I valori più elevati si rilevano nell'esposizione nord e nord-est e nei muri interni, meno ventilati rispetto a quelli perimetrali. L'altezza di risalita presenta oscillazioni trascurabili, dovute in generale a variazioni cicliche stagionali del livello della falda.	In generale non è uniforme. A parità di altre condizioni, presenta valori maggiori lungo i muri perimetrali. L'altezza di risalita presenta spesso oscillazione annua.

Fonte: Massari, Massari (1992).

corre innanzitutto confrontare le soglie di evaporazione sui muri interni e su quelli esterni dell'edificio: se i due livelli sono paragonabili, si è in presenza di umidità ascendente; se le murature interne mostrano livelli superiori a quelle esterne, dopo aver considerato il contributo offerto all'evaporazione dalla ventilazione, in grado di abbassare il livello della risalita all'esterno, è in qualche caso ipotizzabile un concomitante fenomeno di condensa (TAB. 4.3; Vignali, 1983; Cigni, Codacci Pisanelli, 1987; Aghemo, Cirillo, Fato, Filippi, 1991; Massari, Massari, 1981; Aveta, 1996; Fiorani, 1996a; D'Urbano, Pandolfi, Pietrini, 1998; Salemi, 2000; Besana, 2005; Bosia, 2005; Mundula, Tubi, 2006).

#### 4.1.4. Diagnosi strumentale

La diagnosi strumentale dei problemi da umidità può mirare alla caratterizzazione termica e igrometrica delle strutture e dell'ambiente o allo studio dei meccanismi di degrado di tipo biologico e fisico-chimico (indagini microbiologiche, tecniche di microscopia per la caratterizzazione degli agenti biologici, dosaggio dei sali solubili, misura della qualità dell'aria ecc.).

È così possibile ricorrere a metodi di misura di tipo indiretto, che consentono di conoscere con una certa approssimazione il contenuto d'umidità di materiali e strutture in base alle variazioni subite dalle proprietà elettriche ed

TABELLA 4.3

## Caratteristiche dell'umidità ascendente e da condensazione

Caratteristiche dell'umidità da risalita	Caratteristiche dell'umidità da condensa
È indipendente dalla stagione.	Ogni anno si ripresenta alla stessa stagione.
Sale poco sul muro: 2-3 metri.	È a qualunque altezza dell'edificio.
Impregna tutto lo spessore del muro da una parte all'altra.	Bagna in superficie la parete, con acqua liquida che si combina subito con lo smog.
Prende l'acqua dal terreno: o superficiale perduta da fogne e tubi o profonda da falde freatiche.	Prende acqua dall'aria per raffreddamento del vapore contenuto.
Si elimina in qualche anno dopo aver allacciato tutte le acque superficiali, oppure dopo aver tagliato il muro alla base se le acque vengono dal profondo.	Si elimina all'improvviso con il calore e la ventilazione, ma successivamente ritorna.

Fonte: rielaborazione da Massari, Massari (1992).

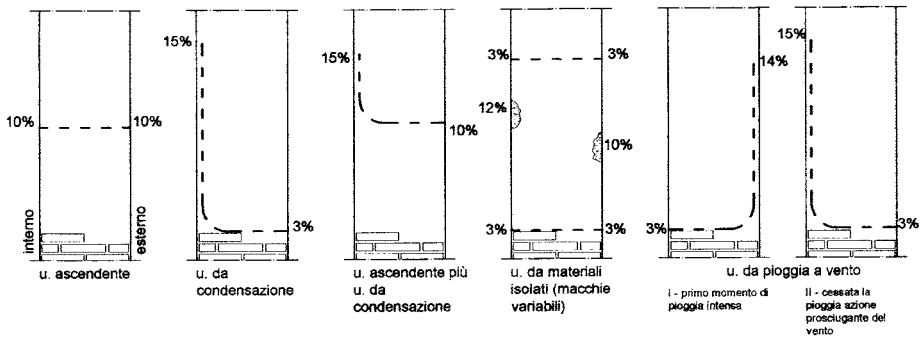
elettromagnetiche. Queste sono espresse dalla resistenza elettrica (“metodo conduttimetrico”), dalla capacità elettrica (“metodo capacitivo”), dall'assorbimento delle onde elettromagnetiche (“metodo a microonde”) e dalle proprietà termiche (“termografia” e “metodo termico”); tutti i metodi di misura di questo tipo non sono dannosi per la struttura. Gli strumenti a capacità elettrica sono influenzati dall'eventuale presenza dei sali solubili; essi consentono pertanto una prima identificazione solo qualitativa delle parti umide. Analogamente avviene in genere con l'indagine termografica, che evidenzia le zone fredde e umide della parete.

Tecniche d'indagine di tipo diretto, quali i metodi “ponderale” e “al carburo di calcio”, consentono di determinare più precisamente il contenuto d'acqua presente all'interno delle strutture e dei materiali. Tramite tecniche d'indagine puntuali e reiterate operazioni di misura, è possibile ricostruire l'andamento sul piano murario delle masse d'acqua presenti all'interno; questo può essere reso graficamente costruendo sugli elaborati di rilievo le “isoumide” (linee a cui corrisponde lo stesso contenuto d'acqua). È inoltre possibile conoscere i gradienti igrometrici eventualmente presenti nello spessore murario. La rappresentazione della distribuzione dell'acqua sul piano della sezione muraria può essere realizzata tramite l'elaborazione di appositi “diagrammi diagnostici” (Massari, Massari, 1981; FIG. 4.8).

Il contenuto d'acqua in un materiale può essere rilevato invece con elevata precisione tramite prove di laboratorio, previo campionamento, utilizzando metodi nucleari (attenuazione dei raggi gamma, radiografia neutronica NR, metodo della risonanza magnetica nucleare NMR) e misure spettrofotometriche; la spettrofotometria nell'infrarosso, in particolare, si è rivelata di grande efficacia nelle superfici affrescate, per la determinazione di piccole ma non trascurabili concentrazioni d'acqua sullo strato pittorico (Bui, Milazzo, 1988).

FIGURA 4.8

Diagrammi della distribuzione d'acqua nella sezione trasversale di un muro



L'andamento del contenuto percentuale d'acqua consente di ipotizzare la provenienza dell'umidità.

Fonte: rielaborazione da Massari, Massari (1992).

La caratterizzazione dell'ambiente interno ed esterno ai fini della diagnosi dell'umidità avviene attraverso la misurazione dei parametri termoigrometrici effettuata con strumenti comuni, come barometri, psicrometri, igrometri, termometri, termoigrometri, o tramite appositi monitoraggi microclimatici. Questi ultimi si avvalgono di strumenti che registrano su carta i valori rilevati nel tempo, come i barografi e i termoigrografi e, più recentemente, di sistemi elettronici per l'acquisizione automatica e registrazione prolungata dei dati (Vignali, 1983; Massari, 1983; Rocchi, 1983; Cigni, Codacci Pisanelli, 1987; Gelsomino, 1988; Aghemo, Cirillo, D'Ambrosio, Alfano, 1991; Massari, Massari, 1981; Aveta, 1996; Alfano, D'Ambrosio, Riccio, 1999; Salemi, 2000; Niglio, 2004; Besana, 2005; Bosia, 2005; Mundula, Tubi, 2006).

#### 4.1.5. Monitoraggio ambientale. Indagini microclimatiche e termografiche

È possibile seguire il percorso dell'acqua nelle strutture analizzando le interazioni dei componenti edilizi con l'ambiente interno ed esterno dal punto di vista delle trasformazioni termodinamiche subite dal sistema ambiente-manufatto, ovvero dall'ambiente con le opere in esso contenute. Si tratta di un sistema fisico in continua evoluzione, dalle cui trasformazioni (di tipo irreversibile) dipende il processo di naturale invecchiamento delle strutture: «fine ultimo perseguito dall'indagine microclimatica sarà quello di comprendere l'equilibrio termoigrometrico del sistema ambiente-manufatto per determinare le migliori condizioni in cui il processo di deterioramento del materiale possa essere rallentato al massimo» (Accardo, 1998a, p. 108). In altre parole, l'indagine microclimatica consente di evidenziare le situazioni a rischio per la conservazione delle strutture e delle opere d'arte per effetto degli scambi termoigrometrici che avvengono con continuità nello spazio e nel tempo fra le

strutture indagate, l'ambiente interno ed esterno e l'uomo. Nella disamina dei processi di scambio, quest'ultimo va considerato sia come "corpo fisico", dotato di una propria temperatura e in grado di produrre vapore, sia come possibile causa d'alterazione del contesto, responsabile dell'attivazione di alcune forzanti termoigrometriche, per esempio con l'accensione saltuaria dell'impianto di riscaldamento (Massari, Massari, 1981). Recenti indagini microclimatiche condotte nell'area alpina italiana hanno dimostrato che proprio l'impianto termico rappresenta un grave fattore di rischio per l'edificio e, in particolare, per le opere d'arte all'interno delle chiese (Camuffo, Sturaro, Valentino, Camuffo, 1998); a tale rischio è possibile far fronte adottando un sistema innovativo di riscaldamento in grado di confinare il calore nello spazio effettivamente occupato dalle persone (Camuffo, Pagan, 2003; Camuffo *et al.*, 2007).

Gli effetti delle interazioni fra l'aria-ambiente, l'aria esterna e il manufatto si concentrano in ogni caso sulla superficie delle strutture e delle opere d'arte, interfaccia di scambio con l'aria-ambiente, e sono denunciati dal confronto fra gli andamenti interni ed esterni di alcune grandezze fisiche direttamente misurabili, quali temperatura e umidità relativa, e derivate, come umidità specifica e temperatura di rugiada. Nel loro complesso, tali misurazioni consentono la descrizione del microclima del sistema, ovvero l'individuazione e la definizione dei «flussi di energia termica tra ambiente e struttura [...] i movimenti di acqua nei suoi stati di aggregazione [e] le possibili interferenze con le opere contenute» (Cacace, Gonzales Lopez, 1992, p. 921).

L'indagine microclimatica consiste nella misura continua nel tempo e discreta nello spazio dei parametri microclimatici e presuppone l'elaborazione di un progetto apposito in cui devono essere indicati diversi parametri. Fra questi vi è innanzitutto la localizzazione nell'edificio dei punti di misura fissi, a cui si possono aggiungere ulteriori misure "spot" di  $T$  e  $UR$  effettuate in altre zone (Lorusso, 2002) o misure intensive manuali integrative; in tal modo si è per esempio lavorato nella Sainte Chapelle a Parigi, per studiare come incidono sui processi di scambio a carico delle vetrate antiche le condizioni di apertura e chiusura delle porte e la presenza dei visitatori all'interno (Bernardi, Becherini, 2003). Occorre poi indicare i limiti temporali dell'indagine, che deve essere protratta almeno per un intero ciclo stagionale, nonché l'intervallo di campionamento delle misure e il tipo di strumenti per l'acquisizione e la registrazione dei dati (FIG. 4.9).

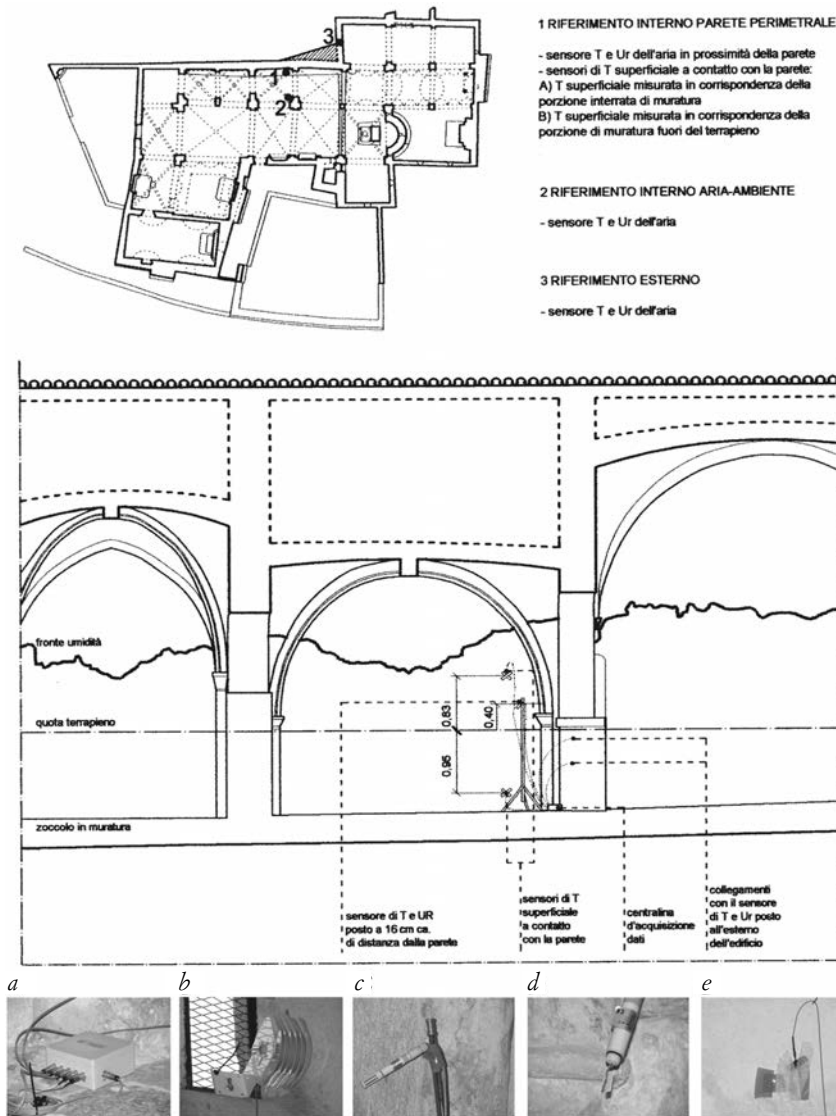
Altrettanto importante è l'analisi dei dati, oggi favorita dalla messa a punto di programmi informatici per la gestione di database complessi (Bennici, Cacace, Gerardi, 1992).

Talvolta è necessario ricorrere anche all'acquisizione nel tempo dei parametri climatici (velocità dell'aria, direzione del vento, irraggiamento solare, intensità luminosa e delle precipitazioni atmosferiche). L'influenza del clima sul degrado da umidità dei materiali impiegati all'esterno è stata evidenziata da



FIGURA 4.9

Localizzazione in pianta e sezione della strumentazione impiegata per l'indagine microclimatica condotta nella chiesa di S. Maria del Ponte a Tione degli Abruzzi (L'Aquila), messa a disposizione dal Laboratorio di fisica dell'ISCR di Roma



Si osservano, nell'ordine, la centralina di acquisizione dati (a), i sensori esterno (b) e interni (c-d) di T e UR dell'aria e il sensore di T superficiale a contatto (e). I sensori di T e UR sono stati disposti presso la parete perimetrale della navata sinistra, parzialmente interrata e interessata dalla presenza di umidità.

Fonte: tesi di laurea, facoltà di Ingegneria Edile-Architettura, Università degli Studi dell'Aquila, a.a. 2005-06, relatore prof. D. Fiorani, correlatore C. Cacace, laureanda B. Malandra.

uno studio condotto sulla torre di Pisa nel periodo 1956-95 (Camuffo, Sturaro, Valentino, 1999).

L'indagine microclimatica può essere integrata con un rilievo termografico le cui specifiche possibilità diagnostiche sono state sperimentate negli ultimi anni (Greco, 2005). L'utilità del monitoraggio termovisivo consiste nella possibilità d'individuare zone termicamente omogenee, caratterizzate da diversi valori del flusso evaporativo, le cui caratteristiche di distribuzione consentono di ragionare in termini qualitativi sull'origine dell'umidità (come è stato fatto per la diagnosi del degrado nel convento dei Camaldoli in Vico Equense, Napoli, oggi villa Giusto; Castagneto, 1997). L'integrazione fra la tecnica termografica e il metodo ponderale è stata risolutiva nello studio di palazzo Barnabò a Foligno (Perugia): il modesto gradiente igrometrico ottenuto ponderalmente per una delle pareti di un locale seminterrato e la non perfetta sovrapposibilità delle aree che si mostrano più fredde all'infrarosso termico con quelle corrispondenti alle zone più degradate comprovano che, pur trattandosi di umidità da risalita, il fenomeno non ha carattere permanente e si lega probabilmente all'esistenza di una falda temporanea alimentata dalle precipitazioni meteoriche e dalle piene stagionali di un fiume che scorre non lontano (Cruciani Fabozzi, Rosina, Valentini, 1999).

Lo studio della diffusività termica dei singoli materiali e la sua integrazione con prove di laboratorio sono stati particolarmente curati su diversi edifici in area lombarda (Cruciani Fabozzi *et al.*, 1998); in alcuni casi essi sono stati poi gestiti grazie alla messa a punto di opportuni modelli matematici per l'elaborazione dei dati (Cernuschi, Ghia, Lamperti, 1997).

È in corso di sperimentazione da alcuni anni la possibilità di effettuare valutazioni di tipo quantitativo soltanto per via termografica: prove di laboratorio condotte dall'Istituto di Fisica generale applicata dell'Università di Milano su alcuni campioni d'intonaco hanno dimostrato, per ciascun materiale e in diverse condizioni, la dipendenza del flusso evaporativo (ricavato con il metodo ponderale) dalla temperatura (rilevata simultaneamente con la termocamera) ottenendo, in tal modo, curve di taratura utilizzabili in prove *in situ* per il calcolo del tasso di evaporazione dalle quali si può risalire anche al contenuto d'acqua negli strati superficiali (Milazzo, Ludwig, Redaelli, s.d.; Ludwig, Milazzo, Poldi, 1997). Rimane, pertanto, verificata sperimentalmente la validità d'un modello fisico impostato per il bilancio energetico della superficie soggetta ad evaporazione, ma non utilizzabile direttamente per il calcolo del flusso di vapore a causa delle difficoltà connesse alla valutazione dei coefficienti di conduzione e convezione (Rosina, Ludwig, Redaelli, s.d.). Il metodo proposto presenterebbe il vantaggio di consentire una "diagnosi precoce" delle aree maggiormente esposte al rischio di degrado, caratterizzate da valori elevati del flusso evaporativo e non ancora dalla manifestazione di patologie particolari; esso può essere impiegato, pertanto, anche per il controllo e il collaudo dei lavori di risanamento (Ludwig, Milazzo, Poldi, 1997).

## 4.1.6. Alcune esemplificazioni

Nonostante la ribadita necessità di ricorrere a tecniche diagnostiche che non danneggino le strutture, l'esatta determinazione del contenuto d'acqua previo campionamento può talvolta diventare risolutiva, soprattutto qualora le verifiche qualitative dello stato di conservazione delle strutture non forniscano elementi sufficienti per la comprensione di fenomeni connessi a cause ormai rimosse (ne è un esempio la cappella di S. Brizio nel Duomo di Orvieto). Gli effetti che queste ultime continuano a produrre sono particolarmente deleteri quando ci si trovi in presenza di superfici dipinte o affrescate per le quali i danni maggiori sono causati dalla cristallizzazione salina. Può essere utile in questi casi ricorrere a tecniche d'indagine di tipo qualitativo e a prove di laboratorio fra loro complementari per valutare l'incidenza di concomitanti fattori di degrado, quali la presenza d'umidità nelle murature e di sali solubili, com'è stato effettuato per gli affreschi di S. Pietro in Valle a Ferentillo. La distribuzione delle diverse specie saline può inoltre fornire indicazioni anche sul percorso seguito dall'acqua che le veicola all'interno delle murature.

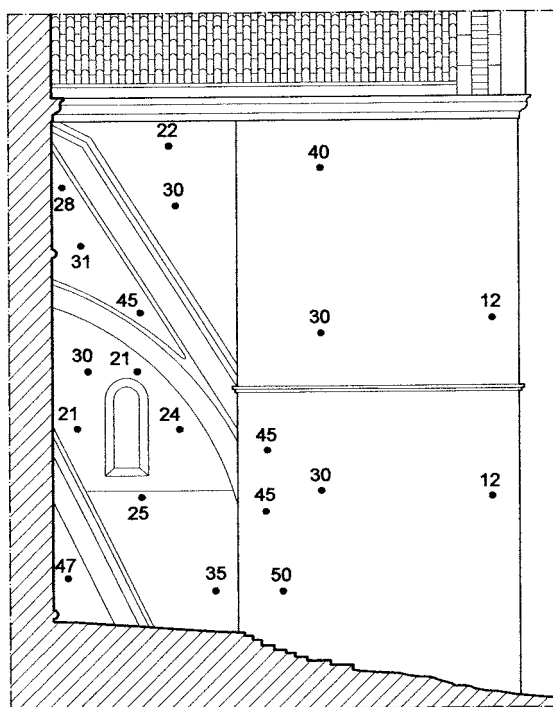
Le variazioni termoisometriche e ambientali da cui dipendono le reali possibilità d'innescio dei cicli di cristallizzazione salina e di altri meccanismi di degrado possono essere poi controllate agendo sulle cause e sulla provenienza dell'umidità senza che ciò comporti un intervento diretto sulla struttura, in linea con un indirizzo metodologico che ha dato notevoli risultati nell'ambito dell'attività svolta dall'ICR (oggi ISCR) negli ambienti ipogei e nei sistemi museali (il cosiddetto "restauro passivo"). Di fronte all'impossibilità di ricorrere a tecniche tradizionali d'intervento, per difficoltà operative connesse alle caratteristiche costruttive, alla localizzazione dei fenomeni e alla loro estensione, nonché per le specifiche esigenze conservative, le soluzioni illustrate nascono proprio dall'interpretazione della dinamica termoisometrica responsabile dei processi di degrado a carico di strutture, finiture e opere d'arte conservate nella fabbrica. Gli effetti di tali processi possono essere indagati a mezzo di indagini microclimatiche che, sempre più spesso, s'inseriscono all'interno di percorsi multidisciplinari di ricerca.

*La cappella di S. Brizio nel Duomo di Orvieto*

Il rifacimento delle coperture alla fine degli anni settanta del Novecento non aveva migliorato lo stato di conservazione delle murature, già interessate da infiltrazioni dovute a difetti dell'impianto di raccolta delle acque meteoriche. L'umidità era infatti rimasta intrappolata all'interno della parete e continuava ad arrecare danni agli affreschi di Luca Signorelli, realizzati fra la fine del xv secolo e l'inizio del xvi (Davano, Marchetti, 1996).

Nell'ambito dell'indagine microclimatica condotta dall'ICR (Accardo, Gianni, Rinaldi, Seccaroni, 1996), sulle pareti a est e ovest è stata effettuata una

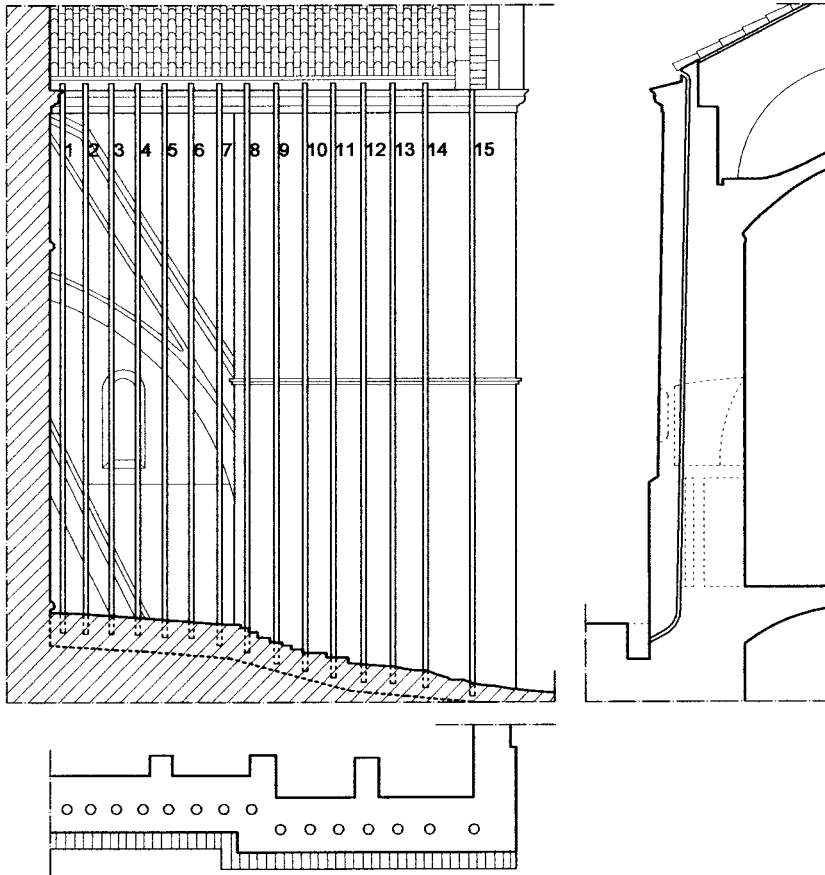
FIGURA 4.10  
Cappella di S. Brizio nel Duomo di Orvieto. Prospetto ovest con la localizzazione dei punti di prelievo dei campioni e relativi contenuti percentuali d'acqua



Fonte: rielaborazione da Massari (1996).

misurazione in continuo delle temperature superficiali, della temperatura e dell'umidità relativa dell'aria tramite la disposizione di sonde in corrispondenza dei punti di una griglia di riferimento. Dal confronto dei dati relativi all'umidità specifica si è rilevato che presso la parete est si registravano valori tendenzialmente più elevati rispetto alla parete ovest, essendo la prima più fredda della seconda. I valori dell'umidità specifica erano comunque abbastanza elevati su entrambe le murature e potevano essere correlati all'elevato contenuto di umidità, la cui misura, eseguita nel corso di un'estesa campagna nel 1977 e nel 1991, si aggirava intorno ai 500.000 litri di acqua per le strutture delimitanti la cappella (Massari, 1996). Il dato quantitativo e, soprattutto, la distribuzione non omogenea delle grandi masse di acqua in gioco confutavano l'ipotesi di una risalita dell'umidità dal basso, possibilità peraltro suggerita dai forti spessori murari (3 m circa; FIG. 4.10). La copertura, da poco rifatta, presentava un impianto di raccolta e smaltimento delle acque meteoriche efficiente, che non avrebbe permesso infiltrazioni; le quantità e la distribuzione del-

FIGURA 4.11  
Cappella di S. Brizio nel Duomo di Orvieto. Progetto di risanamento delle murature



Prospetto ovest e sezioni con la disposizione di 15 canali  $\varnothing 140$ , realizzati con perforazioni e comunicanti con l'esterno in alto e in basso tramite un'intercapedine aerata al piede del muro.

Fonte: rielaborazione da Massari (1996).

l'acqua rilevate nel muro non potevano essere spiegate nemmeno con eventuali penetrazioni, comunque possibili, attraverso il paramento murario.

L'origine dell'umidità era dunque da ricercare in passate infiltrazioni d'acqua piovana attraverso una preesistente canalizzazione collocata al di sotto delle volte della cappella; l'acqua, così accumulata, era rimasta intrappolata fra i due paramenti lapidei delle strutture murarie perimetrali che inglobano gli archi rampanti e i contrafforti creati nel XIV secolo da Lorenzo Maitani. Sono stati inoltre riconosciuti fenomeni localizzati di condensa presso l'affresco interno della parete ovest (*Resurrezione della Carne*) in corrispondenza di una

finestra tamponata. I risultati dell'indagine termografica hanno mostrato una distribuzione uniforme della temperatura, a eccezione d'una nicchia in basso (cui corrisponde un minore spessore murario), presso il vano sopra descritto e in un tratto in alto a sinistra (per la presenza, forse, di un ponte termico; Caneva, Pampallona, Testa, 1988).

La determinazione esatta del contenuto di umidità ha consentito di verificare l'efficacia delle diverse soluzioni possibili. L'idea di smontare parte del paramento esterno per consentire l'abbattimento del contenuto percentuale d'acqua dal 30% al 10%, oltre che molto distruttiva, si è rivelata anche poco efficace: per avere un effetto reale del provvedimento si sarebbe dovuto attendere circa 50 anni. L'intervento è consistito nell'aumentare la superficie evaporante realizzando alcuni camini verticali tramite perforazione all'interno del muro, così da creare un sistema permanente di aerazione naturale nella parete (FIG. 4.11). La soluzione adottata, inoltre, convoglia la migrazione dell'acqua presente all'interno del muro verso la superficie dei camini, trasportando con essa i sali in soluzione, che vengono così allontanati dalla superficie interna affrescata ("prosciugamento pilotato"; Massari, 1998).

Da un punto di vista microclimatico le problematiche conservative delle superfici pittoriche dipendono, comunque, non solo dal verificarsi di processi di scambio a carico della parete e dalla presenza di sali solubili, ma anche dalla qualità dell'aria e, di conseguenza, dai meccanismi di deposizione degli inquinanti strettamente connessi con le caratteristiche termoigrometriche dell'ambiente, come dimostrano alcune indagini condotte sul *Cenacolo* vinciano (Camuffo, Bernardi, 1991) e nella Cappella degli Scrovegni (*La Cappella degli Scrovegni*, 1998; Camuffo, 2001; Basile, 2003; Marabelli *et al.*, 2006).

### *La chiesa di S. Pietro in Valle a Ferentillo*

La necessità di un intervento conservativo nasceva dalle condizioni di degrado in cui versavano gli affreschi conservati all'interno della chiesa, che a partire dal 1981 è stata oggetto di una serie di lavori per il miglioramento antisismico e la bonifica da parte della Soprintendenza per i Beni Ambientali, Architettonici, Artistici e Storici dell'Umbria. In una prima fase (1983-84) è stato eseguito su entrambe le pareti della cappella un intervento per la messa in sicurezza delle strutture più degradate e la riduzione dell'umidità contenuta all'interno delle murature, propedeutico al restauro dei dipinti condotto dall'ICR fra il 1991 e il 1995 (Capponi, 2003; Napoli, 2003; Tamanti, 2003a).

Il ciclo pittorico, della fine del XII secolo, si svolge lungo la navata della chiesa ad aula unica e sull'arco trionfale; esso è stato in parte integrato nel Rinascimento, sottoposto a scialbatura nel Cinquecento-Seicento, riscoperto

nel 1869, poi restaurato e, infine, abbandonato a se stesso per circa un trentennio. La mancata manutenzione del tetto, delle finestre, dei canali di deflusso dell'acqua ha determinato un'eccessiva presenza d'umidità nelle murature, così da richiedere altri interventi fra il 1927 e il 1930 soprattutto rivolti alla soluzione dei problemi dell'umidità da risalita (sostituzione delle coperture, rimozione del terreno adiacente l'edificio e scavi; Albini, Mastropasqua, Zizola, 2003). Le prove effettuate nel 1984 hanno però ridimensionato il ruolo dell'umidità da risalita per capillarità, evidenziando invece fenomeni diffusi e intensi di condensa e di umidità da igroscopicità (Massari, 2003).

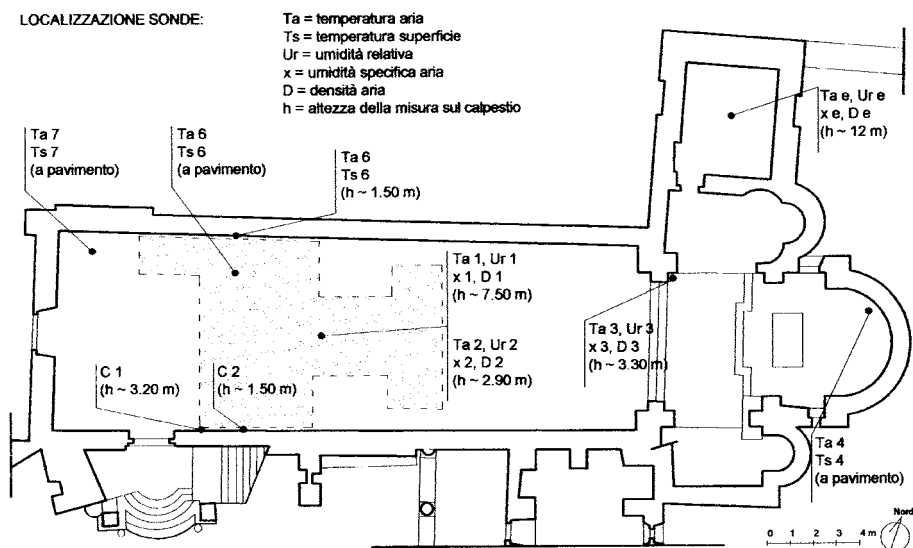
L'indagine visiva e gli studi sulla fabbrica hanno escluso la possibilità di alimentazione da falda, sia per l'irregolarità del fronte umido di arrivo, ancora elevato in facciata e nel fianco sinistro dell'edificio, ma trascurabile nel fianco destro e nell'abside, sia per le caratteristiche costruttive delle fondazioni, non molto profonde e realizzate con materiale poco assorbente. La conformazione orografica del sito e le caratteristiche di realizzazione dell'impianto di raccolta delle acque meteoriche con pluviali a scarico libero avrebbero, invece, favorito il ristagno dell'acqua in prossimità delle pareti perimetrali (soprattutto a nord, dove precedentemente era stato realizzato un drenaggio in materiale sciolto poco profondo e privo di un sistema di raccolta e allontanamento delle acque).

Lo stato di decoesione delle malte, con cadute ed erosioni superficiali dell'intonaco, i sollevamenti e gli sbiancamenti della pellicola pittorica avevano denunciato la presenza di sali solubili (Mancinelli, 2003). Un campionamento effettuato per studiare questi sali si è concentrato nella parete nord, sfruttando la presenza di lacune nella metà inferiore della parete, dove erano possibili prelievi distruttivi profondi pochi centimetri. Le analisi chimiche e mineralogiche hanno evidenziato la presenza prevalente di nitrati, distribuiti in maniera uniforme lungo la verticale del muro, lasciando intendere la loro provenienza dal basso, veicolati dall'umidità che risale per capillarità dal terreno; non mancavano inoltre infiltrazioni dalle coperture (Vigliano, 2003).

Altre prove condotte su campioni prelevati in alcuni punti della struttura muraria, a diverse quote dal piano di calpestio e a varie profondità, oltre a rilevare la presenza di gradienti igrometrici, segnalavano proprio la stretta dipendenza tra il contenuto di acqua e i nitrati presenti in maggiore concentrazione nella parte più basse delle murature (Massari, 2003). La significativa quantità di questi sali può essere ricondotta all'uso passato della chiesa come ricovero di animali e alla presenza di sepolture intensive situate al di sotto del pavimento nella parte anteriore della fabbrica.

Un monitoraggio, condotto nel 1992 dall'ICR, ha consentito di verificare l'efficacia degli interventi realizzati per contenere i fenomeni di risalita capillare e di condensa. Persistevano i problemi di umidità da igroscopicità, la cui soluzione richiedeva la stabilizzazione dei valori termoigrometrici interni, così da mantenere l'umidità relativa dell'aria su valori superiori a quelli in cui si

FIGURA 4.12  
Chiesa di S. Pietro in Valle a Ferentillo. Localizzazione in pianta delle sonde utilizzate per l'indagine microclimatica



Fonte: rielaborazione da Massari (2003).

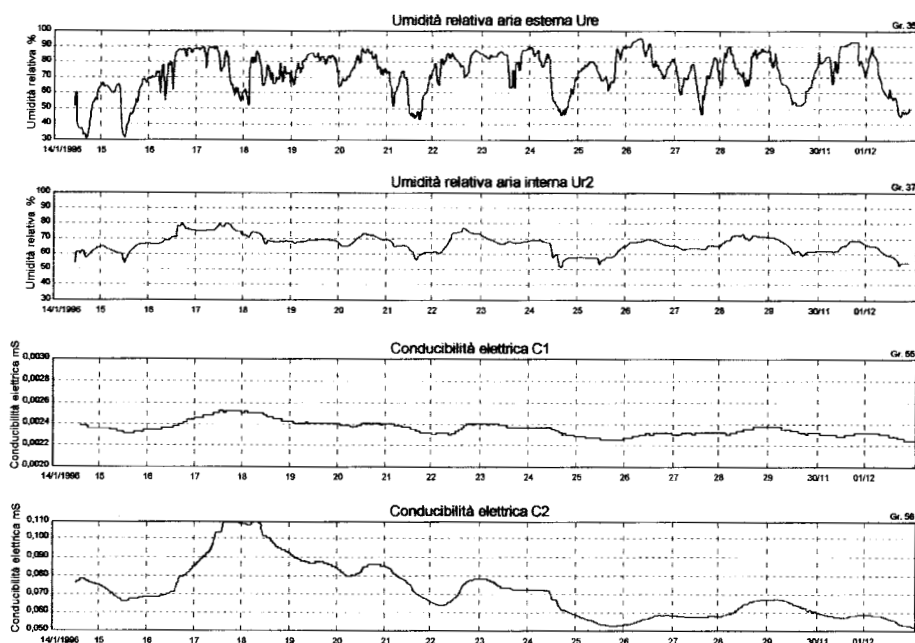
verifica la cristallizzazione salina. Tale necessità era però in contrasto con le esigenze di risanamento nei confronti della condensa. La soluzione scelta ha cercato un compromesso, realizzando una modesta ventilazione interna, come si vedrà in seguito. In altri casi, si è rivelato utile il ricorso a un leggero riscaldamento a pavimento per prevenire entrambi i fenomeni di umidità da condensazione e da igroscopicità, come quello realizzato nella cripta di Epifanio presso S. Vincenzo al Volturno (Massari, 1988).

La validità della soluzione è stata provata dai risultati ottenuti con le due campagne microclimatiche eseguite nel giugno e nel novembre del 1996, in cui sono state monitorate le variazioni di umidità relativa in relazione a quelle della conducibilità elettrica dello strato più superficiale, utilizzando elettrodi di acciaio inox da 2 mm inseriti per circa 20 mm e posti alla distanza di circa 10 cm. Le sonde sono state localizzate nella zona bassa (dove il campionamento del 1984 aveva rilevato un'elevata presenza di sali, C2) e più in alto (dove non erano presenti sali e fenomeni di capillarità, C1; FIG. 4.12).

Dal confronto fra l'andamento della conducibilità e quello dell'umidità relativa dell'aria rilevata a un'altezza da terra di 2,9 m circa (UR 2) emerge l'interdipendenza fra conducibilità elettrica del materiale e umidità relativa (le variazioni della conducibilità dipendono sia dal contenuto d'acqua che dai sali solubili in grado di assorbire acqua per igroscopicità; FIG. 4.13).



FIGURA 4.13  
Chiesa di S. Pietro in Valle a Ferentillo. Risultati dell'indagine microclimatica e della misura della conducibilità elettrica



Nella parte alta della parete, dove il contenuto di sali è minimo, la conducibilità elettrica è bassa e non dipende dalle variazioni di umidità relativa (Gr55, sonda C1); in basso (Gr56, sonda C2), in presenza di una maggiore quantità di sali, la conducibilità elettrica è molto più alta. Per poter apprezzare sensibilmente le variazioni di conducibilità e dei contenuti di acqua assorbiti per igroscopicità è necessario che l'UR si mantenga al di sopra del valore di dissoluzione dei sali per tempi sufficientemente lunghi: i massimi valori rilevati si registrano, infatti, solo dopo un prolungato periodo di tempo con umidità relativa sopra il 70%.

Fonte: Massari (2003).

### *La Domus Aurea, la Tomba dei Rilievi di Cerveteri e la Capilla Real di Granada*

Lo studio condotto sulla Domus Aurea prende le mosse da una serie di problematiche conservative comuni alla maggior parte degli ambienti ipogei, in cui dissesti statici, fenomeni di cristallizzazione salina, concrezioni calcaree, degrado biologico, distacchi e altre forme di degrado degli strati di rivestimento parietale sono il prodotto di squilibri termodinamici generati a seguito di eventi traumatici. Primo fra questi è la riscoperta rinascimentale del complesso, a cui seguono gli sterri e le esplorazioni del XVIII e XIX secolo e una sempre più intensa attività di scavi e restauri, soprattutto risalenti all'inizio del Novecento, quando si riporta alla luce la maggior parte degli ambienti conosciuti. Da una relazione del 1822 si evince che non solo la leggibilità dell'ap-

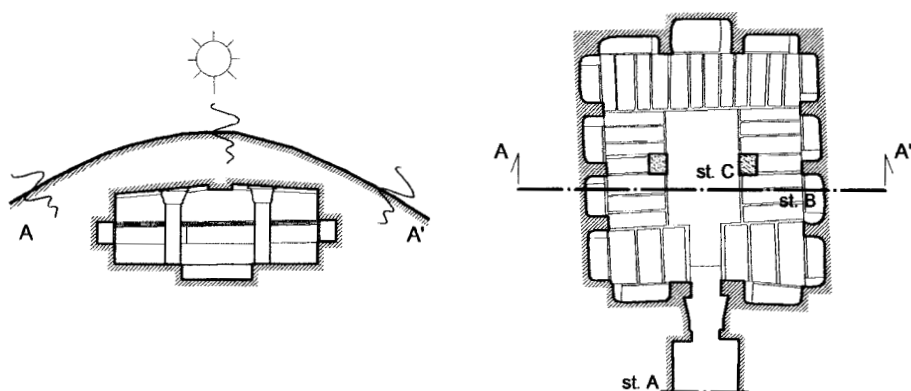
parato decorativo, ma anche l'integrità fisica di ciò che restava erano minacciate dalla velocità dei fenomeni di degrado, la cui evoluzione era strettamente correlata alle mutate condizioni ambientali: «Osservai che tali pitture quanto più sono esposte all'aria aperta e umida tanto più spariscono e si ricoprono di muffa che con qualche anno le corrode e le cancella» (documento dell'Archivio di Stato di Roma riportato in Baldi, 1986, p. 636).

La scelta degli ambienti da indagare, rappresentativi delle tipologie ambientali della Domus, è ricaduta su vani simili per diversi aspetti (presenza di ampie fasce dipinte, di un'impermeabilizzazione estradossale, di sensibili flussi d'aria in direzione longitudinale). Si sono così verificati gli effetti d'un intervento sperimentale di tipo "passivo", finalizzato alla stabilizzazione dei parametri termoisometrici e alla conseguente inibizione dei processi di degrado tramite l'effettuazione d'un confinamento forzato in due dei tre ambienti campione; questi sono stati chiusi tamponando in mattoni tutte le aperture, sistemando serramenti in acciaio inossidabile e vetro nei vani di comunicazione e limitando l'accesso ai soli addetti ai lavori per le operazioni strettamente necessarie ai fini della ricerca. Grazie anche al confronto tra i fenomeni registrati nei tre ambienti, è stato possibile verificare la possibilità d'interdire i cicli di cristallizzazione dei sali e studiare gli effetti indotti dalla modifica apportata nei vani sui processi di biodeterioramento, nonché verificare l'efficacia nel tempo di tre prodotti biocidi applicati sperimentalmente.

Prima della chiusura, i risultati dell'indagine microclimatica evidenziavano nei due vani una stabilità termoisometrica maggiore rispetto al terzo locale, in cui, tuttavia, l'assenza di variazioni dell'umidità relativa non trovava riscontro nell'aumento della temperatura dell'aria che si registra nella stagione primaverile-estiva. I valori costanti dell'UR si spiegano considerando l'apporto di vapore nell'ambiente prodotto per evaporazione dalle strutture interrate attraverso le superfici a contatto con l'aria-ambiente, come evidenziato dall'andamento crescente nel tempo dell'US. A chiusura avvenuta, si è ottenuta una stabilizzazione dei parametri termoisometrici, attestandosi l'UR su valori costanti che si aggirano intorno al 90% e registrandosi una riduzione dei gradienti termici. In tali condizioni, prossime alla saturazione, gli scambi di vapore sono notevolmente ridotti. All'interno di questa logica di "confinamento" s'inserisce anche l'adozione d'un sistema regolamentato di visite, che limita sia il numero di persone che il tempo di permanenza all'interno (Accardo, Cacace, Rinaldi, 1986; Baldi, 1986; Martines, 1986; Nugari, Giuliani, Cacace, 1991).

Fabbriche interrate e ambienti ipogei sono difficilmente isolabili dal mezzo esterno, ovvero dal terreno, con cui essi sono a contatto e attraverso il quale l'energia termica assorbita per irraggiamento solare viene trasmessa alle strutture secondo cicli diurni e stagionali; tale emergenza termica contribuisce all'innescio di processi termodinamici (evaporazione, condensazione, assorbimento) che comportano lo scambio di quantità di acqua fra murature e ambiente.

FIGURA 4.14  
Tomba dei Rilievi a Cerveteri. Localizzazione in pianta e sezione dei termoigrometri utilizzati per l'indagine microclimatica



I termoigrometri sono stati sistemati all'esterno (stazione A), dentro la tomba presso il loculo centrale della parete destra (stazione B) e al centro dell'ambiente, rappresentativo delle condizioni microclimatiche interne (stazione C).

Fonte: Accardo, Cacace, Rinaldi (1988).

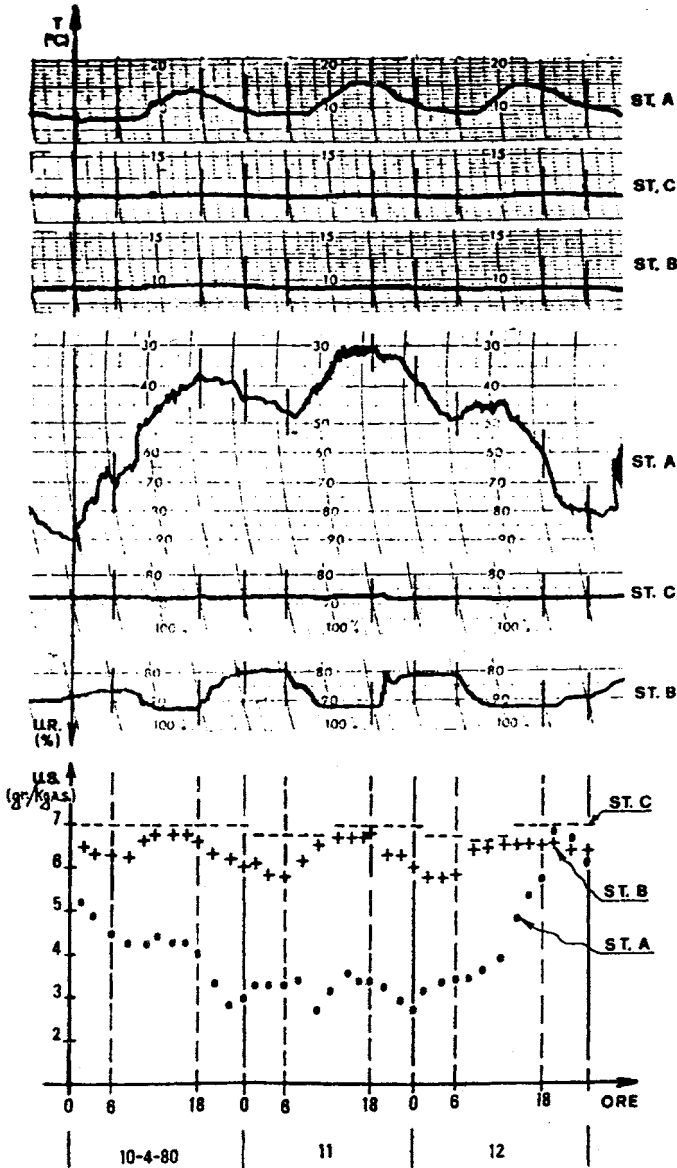
L'indagine microclimatica effettuata nella Tomba dei Rilievi nella zona della Banditaccia presso Cerveteri, condotta anche per valutare l'influenza dell'apertura della porta di ingresso, ha evidenziato che la dinamica igrometrica è governata proprio dai movimenti d'acqua che avvengono attraverso le superfici a contatto con il terreno, a loro volta in stretto rapporto con i flussi giornalieri di energia termica.

I risultati dell'indagine relativi alla stagione primaverile e rilevati mantenendo la porta parzialmente aperta evidenziano che, in corrispondenza della parete perimetrale della tomba (stazione B; FIG. 4.14), l'influenza delle condizioni esterne è denunciata dagli scambi di vapore (US), responsabili delle oscillazioni dell'umidità relativa.

Tali oscillazioni, a loro volta, si verificano con valori costanti della temperatura interna e con un periodo che segue approssimativamente il ciclo termico esterno (FIG. 4.15). A conferma del fatto che gli apporti di vapore rilevati avvengono proprio sotto la spinta di flussi termici giornalieri, si rileva che l'US esterna si mantiene su valori sempre minori rispetto all'interno. Il microclima che s'instaura all'interno della tomba è condizionato, pertanto, proprio dai flussi di energia termica e dagli scambi di vapore che ne derivano, piuttosto che dalle condizioni di apertura o chiusura della porta.

Un intervento possibile per stabilire condizioni di equilibrio potrebbe consistere nel limitare gli effetti dovuti ai cicli giornalieri ricorrendo alla disposizione di "schermi termici" realizzabili tramite l'impiego di tenso-strutture che

FIGURA 4.15  
Tomba dei Rilievi a Cerveteri. Risultati dell'indagine microclimatica



I valori puntuali dei parametri termoigrometrici rilevati nel corso di tre giorni del mese di aprile descrivono un andamento ciclico della temperatura all'esterno (stazione A), caratteristico delle escursioni giornaliere, e variabile dell'UR. Tale andamento non sembra avere influenza sul comportamento termico e igrometrico all'interno (stazione C) che, a differenza di quanto accade in prossimità della parete perimetrale (stazione B), appare piuttosto stabile.

Fonte: Accardo, Cacace, Rinaldi (1988).

proteggano dall'irraggiamento solare e riparino al tempo stesso dalle acque meteoriche (Accardo, Cacace, Rinaldi, 1987, 1988).

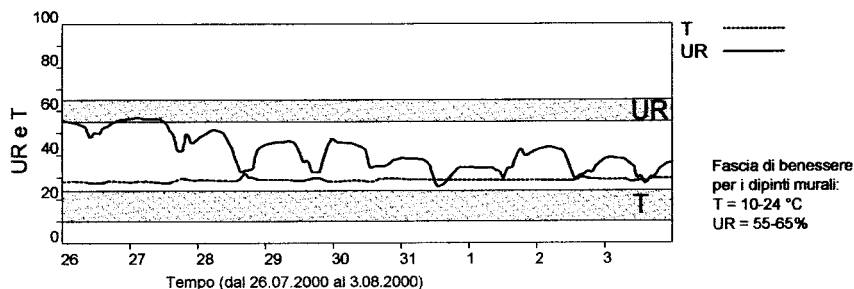
Lo studio microclimatico della Capilla Real di Granada (Cacace, Gonzales Lopez, 1992) è stato condotto per valutare gli scambi di energia termica e i movimenti d'acqua determinati dalle sollecitazioni cicliche giornaliere e stagionali fra le superfici della cappella (utilizzata un tempo come sacrestia) e l'ambiente interno e fra quest'ultimo e le opere d'arte ivi conservate, costituite, fra l'altro, da materiali molto igroscopici, come tavole lignee, stendardi, tessuti. Trattandosi di un ambiente chiuso, ma non isolato (soprattutto in considerazione del grande afflusso giornaliero di visitatori), sono stati monitorati il microclima all'interno dell'ambiente e di una vetrina contenente i tessuti e il clima esterno, utilizzando 4 sensori collegati a una centralina automatica di acquisizione dati a 8 canali, fornita di batteria tampone e di cassetto per la registrazione.

L'andamento annuale della temperatura nell'ambiente e dell'umidità relativa denota una dipendenza dalle variazioni stagionali della dinamica termoigrometrica interna alla cappella. Tuttavia, procedendo verso i mesi più caldi, in concomitanza con l'aumento delle temperature, si rileva un aumento dell' $U_S$  associato a una diminuzione dell' $U_R$ . Tale fenomeno è ben descritto dai valori puntuali giornalieri rilevati per i parametri termoigrometrici nel mese di giugno ed è dovuto all'azione esercitata dai materiali igroscopici presenti all'interno dell'ambiente (il sughero e il drappeggio di rivestimento alle pareti), che esplicano un effetto "tampone" nei confronti delle tavole dipinte sottraendo per assorbimento all'ambiente il vapore prodotto in maggiore misura proprio negli orari d'apertura al pubblico. Viceversa, all'interno della vetrina si verifica una cessione del vapore interamente a carico dei tessuti ivi conservati, che ha luogo in concomitanza di un aumento sia della temperatura sia dell'umidità relativa corrispondente alle ore di accensione dell'impianto d'illuminazione (Cacace, Gonzales Lopez, 1992).

In generale, la conservazione delle opere d'arte esige il rispetto di condizioni termoigrometriche diverse per ciascun tipo di materiale: la norma UNI 10829:1999 stabilisce al riguardo valori accettabili per gli intervalli e le escursioni giornaliere massime di  $T$  e  $U_R$  «per la conservazione in clima stabile» (FIG. 4.16); nel caso in esame, il rischio di stress termoigrometrico a cui sono esposte sia le tavole collocate nella sala sia i tessuti conservati nella vetrina, dovuto rispettivamente alla grande affluenza di visitatori e al riscaldamento prodotto dall'impianto d'illuminazione, è trascurabile solo per le prime, in quanto attenuato dall'azione passiva esercitata dal drappeggio e dal sughero che tampona i movimenti d'acqua. Un condizionamento forzato dell'ambiente appariva pertanto superfluo, potendosi provvedere a migliorare la stabilità termoigrometrica all'interno della sala con un'opportuna sistemazione del rivestimento in sughero delle pareti, in quantità proporzionale al numero delle tavole, previa rimozione di quello già in opera. Sono stati

FIGURA 4.16

Roma, Sala di "Apollo" in Castel Sant'Angelo. Verifica degli intervalli di T e UR ammissibili per i dipinti murali della sala, eseguita mediante confronto con l'andamento dei parametri termoigrometrici rilevati nel corso della campagna estiva del 2000 utilizzando due termoi-grometri elettronici collocati sugli architravi delle porte d'ingresso alla Sala della "Giustizia" e alla Sala di "Clemente VII", in posizione tale da non intralciare il percorso dei visitatori e al riparo della luce dei fari



Fonte: Lorusso (2002).

anche disposti un percorso di acclimatamento dei visitatori prima dell'ingresso al museo e un sistema regolamentato delle visite. All'interno della vetrina, invece, l'intervento di stabilizzazione termoigrometrica si è avvalso della realizzazione di un nuovo e più adatto sistema d'illuminazione. In generale, le esigenze di conservazione delle opere d'arte disposte dentro teche richiedono anche il controllo della qualità dell'aria, oltre a quello dei parametri termoigrometrici e delle radiazioni elettromagnetiche (dipendenti dalle condizioni d'illuminamento). A riguardo, è stato recentemente messo a punto un prototipo di vetrina museale dotato di un sistema di stabilizzazione dell'umidità (modulo MSU) basato sull'impiego di un materiale igroscopico e in grado inoltre di monitorare la qualità e l'aggressività dell'aria facendo ricorso a un metodo qualitativo d'analisi delle alterazioni prodotte dall'aria su provini metallici ("coupon di corrosione"), la cui applicazione è stata verificata per una vetrina presso il Museo Civico degli Eremitani a Padova (Cappelletti, Peron, Porciani, Romagnoni, 2003).

Il progetto definitivo della Capilla ha previsto inoltre il monitoraggio continuo del microclima, al fine di controllarne l'evoluzione nel tempo, utile, in generale, per verificare l'efficacia dei provvedimenti adottati e l'eventuale comparsa di situazioni a rischio. Tale monitoraggio ha verificato, ormai per più di quindici anni, l'efficacia conservativa del microclima realizzato in modo passivo all'interno dell'edificio.

Si accenna, infine, alle possibilità offerte dalla metodologia microclimatica nel campo della conservazione di alcuni elementi di finitura di particolare pregio, come le vetrate antiche composte da tessere di vetro policromo o incolore tenute insieme da una montatura in piombo e con decorazione pittorica ve-

trificata (a “grisaglia”), particolarmente vulnerabile nei confronti dell’umidità. Attualmente, l’unico metodo di conservazione è rappresentato dalla messa in opera di una controvetrata protettiva, che presenta non poche riserve soprattutto dal punto di vista conservativo. Ne sono esempi la Sainte Chapelle di Parigi, la cattedrale di Colonia e la basilica di St. Urbain a Troyes, che sono state oggetto di indagini di tipo fisico finalizzate allo studio dei processi fisici di deterioramento, alla verifica dell’efficacia delle controvetrate e alla messa a punto di appositi sensori di rilevamento della condensa non appena questa si forma sulle vetrate (*Dew Point Sensor*), da interfacciare con un sistema di attivazione delle misure preventive in grado di arrestare il fenomeno al suo primo verificarsi (Bernardi, Becherini, 2003).

#### 4.2

### Interventi contro l’umidità nelle fabbriche storiche

#### 4.2.1. Introduzione

Il problema dell’eliminazione dell’umidità negli edifici storici, uno degli aspetti più delicati nella pratica della manutenzione per gravità degli effetti e per frequenza di riscontri, può essere risolto efficacemente solo attraverso un approccio che tenga conto del coordinamento della diagnosi con le possibili fasi d’intervento. Il risanamento, infatti, non si persegue attraverso una sequenza meccanica di procedimenti, ma scaturisce da un processo unitario, in cui ogni azione dipende dagli esiti delle precedenti e condiziona le successive.

La fase diagnostica assume, come sempre, un ruolo di primaria importanza; quasi mai a un effetto corrisponde un’unica causa immediatamente individuabile e, il più delle volte, un fenomeno rappresenta la conseguenza dell’interazione di vari fattori che si verificano simultaneamente in un determinato contesto.

Purtroppo, la carenza di risorse economiche, l’esistenza di limiti temporali e, troppo spesso, una diffusa ignoranza e superficialità da parte di tecnici e committenti riducono la diagnosi a una sorta di blanda ipotesi non supportata da indagini adeguate; questi presupposti conducono a interventi non solo inefficaci, ma talvolta persino peggiorativi e apportatori di danni irreversibili.

Una corretta e approfondita fase diagnostica deve tener conto, come s’è visto, delle caratteristiche specifiche dell’edificio e del contesto.

Una volta individuate le cause delle patologie in atto bisogna capire se queste possono essere eliminate in maniera definitiva o se vanno combattute per via indiretta, mirando al contenimento dei danni e, soprattutto, tenendo sotto costante controllo l’ambiente e le sue strutture.

In presenza, ad esempio, di macchie di umidità da infiltrazione derivanti

dal cattivo stato di una copertura, basterà intervenire con una manutenzione che preveda la sostituzione o la riparazione del sistema di smaltimento delle acque meteoriche e la revisione del manto di copertura. Qualora, invece, si abbia a che fare con patologie legate all'esposizione dell'edificio, alla scarsa ventilazione e, più in generale, a condizioni microclimatiche e ambientali immodificabili, si potrà agire sulle cause del degrado con interventi che non sono di per sé risolutivi e vanno accompagnati da monitoraggi e manutenzioni continui.

Per giudicare l'efficacia d'una determinata procedura è indispensabile valutare alcuni parametri quali:

- la compatibilità della soluzione in relazione ai materiali e alla struttura;
- il grado d'invasività e d'interferenza con l'edificio, valutato anche relativamente all'equilibrio statico e alla perdita di materiale;
- il livello di reversibilità;
- i tempi di esecuzione e i costi;
- la reale efficacia rispetto alla patologia che si vuole risolvere;
- la durata nel tempo;
- le opere di manutenzione richieste una volta terminato l'intervento (eventuali consolidamenti delle murature asciugate, trattamenti protettivi per evitare il riproporsi del fenomeno ecc.).

Eseguita la lavorazione si passa all'ultima, fondamentale, fase di risanamento, ovvero al controllo dell'efficacia nel tempo e all'eventuale programmazione manutentiva, così da rendere il più duraturo possibile il risultato ottenuto, meglio se accompagnati da un monitoraggio. Una manutenzione a scadenze predefinite risulta più economica e sicuramente più efficace, dal punto di vista conservativo, rispetto a un intervento d'urgenza, che sicuramente comporta costi maggiori e un più elevato livello d'invasività.

Di seguito vengono illustrati alcuni interventi per il risanamento dell'umidità, classificati in base ai principi teorici e operativi sui quali si basano e in relazione alle patologie che si propongono di risolvere. Si tratta, ovviamente, della schematizzazione d'un fenomeno molto più complesso, che non vuole porsi come "ricettario" da applicare meccanicamente a situazioni diverse ma, piuttosto, cerca di fornire una panoramica di riferimento delle più comuni modalità operative, accompagnata, quando possibile, da alcune esemplificazioni d'interventi realizzati sui monumenti.

Così come i fenomeni di degrado da umidità non possono mai essere intesi come manifestazioni perfettamente simili, allo stesso modo non esiste un'unica metodologia d'intervento per ogni patologia. Spesso bisogna studiare le soluzioni più idonee coordinando diversi interventi e, talvolta, può risultare necessario eseguire una sperimentazione preliminare su una piccola zona dell'edificio per valutare la reale efficacia dell'intervento ipotizzato. Ogni fabbrica ha una propria storia da cui non si può prescindere ed è un caso a sé, come mostrano gli esempi a margine del paragrafo.



## 4.2.2. Tecniche di intervento

*Risanamento da umidità ascendente: metodi meccanici*

Una radicale e spesso risolutiva tipologia d'intervento si basa sullo sbarramento orizzontale alla risalita dell'acqua nel muro; l'inserimento di uno strato impermeabile nella parete può ad esempio interrompere il flusso ascendente per capillarità.

Il sistema del taglio meccanico della muratura prende spunto dal tradizionale metodo "cuci-scuci" utilizzato nell'edilizia in mattoni di Venezia affetta da risalita capillare; si realizzavano qui aperture murarie in breccia, in cui venivano inserite lamine di piombo, con una modalità che, riveduta e attualizzata tecnologicamente, è stata poi riproposta da Giovanni Massari negli anni sessanta del Novecento (Massari, Massari, 1981).

Il taglio nella muratura può essere eseguito con varie modalità, che si differenziano sia per l'attrezzatura utilizzata (macchina con lama a catena dentata, sega circolare, filo diamantato, carotatrice, disco diamantato), sia per il tipo d'impermeabilizzante inserito. La scelta dipende da vari fattori, quali le caratteristiche dei materiali della muratura, il loro stato di conservazione e le condizioni di carico esistenti.

In ogni caso, preliminarmente a qualsiasi operazione, è necessario rimuovere l'intonaco nella zona del taglio, che solitamente viene effettuato a circa 10-15 cm dal suolo e, comunque, il più vicino possibile alla base del muro. Si esegue poi il taglio orizzontale del muro per tutto lo spessore e in fasi consequenziali, ovvero per tratti consecutivi alti circa 1 cm e lunghi fra i 20 e i 200 cm; una successiva pulitura tramite aria compressa o getti di acqua serve infine a migliorare l'adesione dell'impasto che viene inserito in seguito.

Il materiale impiegato per l'impermeabilizzazione può consistere in fogli di resina, vetroresina, polietilene o polipropilene, inseriti nelle cavità e poi fissati tramite malte additivate con agenti antiritiro, oppure in profilati in PVC che vengono inseriti nell'impasto ancora fresco con cui si è precedentemente saturata la zona del taglio (Bosia, 2005).

La tecnica del taglio murario presenta diverse controindicazioni, soprattutto relative alla sicurezza statica (in particolar modo in zona sismica), in quanto determina la creazione di punti di cerniera posizionati alla base della fabbrica; tale discontinuità può innescare possibili fenomeni di scorrimento. Per ridurre i rischi strutturali è opportuno cercare di ripristinare il più possibile la continuità della muratura e la sua capacità resistente a sforzi normali e di taglio, curando soprattutto il riempimento dei giunti.

Ulteriori problemi possono essere causati dalla modifica dell'equilibrio della parete, che con il taglio viene divisa in due zone, con una parte superiore, che potrebbe asciugarsi repentinamente e indebolirsi, e una zona imbibita d'acqua.

Appare infine doveroso ricordare l'impatto altamente distruttivo di questo

tipo d'intervento sugli intonaci storici o sulle pareti decorate, caratteristica che ne sconsiglia spesso l'impiego negli edifici monumentali.

Il taglio murario è stato comunque utilizzato nella cinquecentesca cappella Serra all'interno della chiesa di Nostro Signore del Sacro Cuore (già S. Giacomo degli Spagnoli) in Roma. La cappella, a pianta rettangolare, presenta una volta a botte decorata con ottagoni sulla cui struttura s'innesta un lanternino, anch'esso a pianta ottagonale. Lungo le pareti, scandite da paraste sormontate da trabeazione, corre, per un'altezza di 1,4 m, un basamento marmoreo che, sui lati lunghi, è abbinato a un sedile, al di sopra del quale si trovano preziosi affreschi attribuiti a Pellegrino da Modena.

Le indagini effettuate avevano messo in evidenza fenomeni di degrado dovuti a umidità di risalita capillare che si manifestavano, in particolare, sui dipinti e sul basamento perimetrale.

Il risanamento è stato condotto sulla parete a sinistra della cappella, la più interessata dal fenomeno della risalita, realizzando una barriera impermeabilizzante orizzontale tramite taglio meccanico. La presenza di paraste marmoree lungo il perimetro interno ha suggerito di operare dalla parte della cappella adiacente, localizzando il taglio al di sopra del sedile.

Le perforazioni, parzialmente sovrapposte (FIG. 4.17), sono state eseguite con carotatrice diamantata, con l'aiuto d'una mascherina per l'allineamento dei fori. Successivamente le cavità sono state riempite con resina poliestere caricata con polvere di marmo, introdotta con apposite vaschette sagomate (Bonelli *et al.*, 2002).

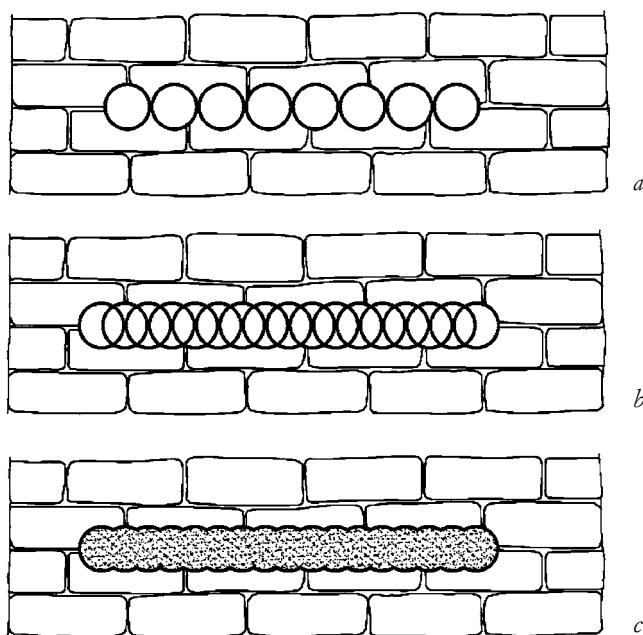
I controlli effettuati negli anni successivi per valutare la buona riuscita dell'intervento hanno messo in evidenza un deciso abbassamento del contenuto d'acqua sia all'interno che sulla superficie della parete.

La tecnica dei sifoni drenanti, detti anche "di Knapen" dal nome dell'inventore che per primo li ha sperimentati, si è diffusa tra gli anni cinquanta e sessanta del Novecento, ma attualmente è in disuso, a causa dell'ormai riconosciuta sua scarsa efficacia. Questa modalità d'intervento era finalizzata perlopiù al controllo dell'umidità da risalita e traeva spunto dall'idea di asciugare le murature bagnate aumentando l'aerazione e la circolazione d'aria al loro interno. I sifoni, costituiti da tubi a sezione cilindrica, semicilindrica o triangolare, erano in materiali porosi (terracotta o laterizio) e s'inserivano nel paramento almeno per metà spessore. I fori d'immissione, a interasse di circa 30 cm, erano posizionati lungo una linea orizzontale il più possibile vicina al terreno, mentre i sifoni erano disposti con inclinazione dal basso verso l'alto su entrambe le facce del muro, se di spessore consistente.

Una volta completato l'intervento, l'aria esterna asciutta, e quindi leggera, sarebbe dovuta entrare nel sifone e, circolando per convezione, avrebbe aiutato ad espellere l'umidità in eccesso. Nelle stagioni fredde, però, l'aria all'interno del muro potrebbe risultare più calda di quella esterna, così da richiedere la disposizione del tubo con un'inclinazione inversa, tale però da raccogliere

FIGURA 4.17

Realizzazione del taglio nella muratura mediante la realizzazione di diverse serie di fori accostati e sovrapposti



Fonte: rielaborazione da Mundula, Tubi (2006).

eventuali acque meteoriche. In estate, invece, il sifone esposto all'irraggiamento solare potrebbe essere riempito da aria calda, più "leggera" di quella esterna e, quindi, non in grado di uscire dal tubo. Con la presenza di aria esterna calda e umida sono inoltre possibili fenomeni di condensa, mentre l'eventuale contenuto di sali all'interno del muro potrebbe dare origine a fenomeni di cristallizzazione sulle pareti dei sifoni, che verrebbero così facilmente ostruite (Bosia, 2005; Mundula, Tubi, 2006).

L'inefficiacia dei sifoni "di Knapien" per il controllo dell'umidità nelle murature è emersa chiaramente con l'osservazione degli esiti di alcuni interventi. Uno di questi è stato effettuato nel 1935 presso palazzo Carpegna, sede dell'Accademia di San Luca a Roma, con la demolizione dell'intonaco interno, eroso e aggredito da muffe, sostituito da un rivestimento in cemento idrofugato. L'intervento, condotto peraltro senza l'ausilio di indagini diagnostiche, aveva avuto un primo esito positivo, ma a breve sono nuovamente apparse le patologie già osservate: l'iniziale successo derivava dall'effetto di "mascheramento" temporaneo che l'intonaco cementizio, impermeabile, aveva generato (Massari, Massari, 1981).

*Risanamento da umidità ascendente: metodi chimici*

L'introduzione di barriere chimiche, tramite la diffusione di speciali sostanze all'interno delle stesse porosità del materiale responsabili dell'assorbimento d'acqua, consente d'intercettare il flusso ascendente nella parete secondo un criterio non molto distante da quello del taglio murario.

I prodotti chimici usati, veicolati da solventi, possono avere effetto idrofobizzante, come accade con i derivati organici e inorganici del silicio di origine sintetica o con le resine siliconiche, in grado di rendere idrorepellenti le pareti dei vasi riducendo le forze di adesione muratura-acqua; è viceversa possibile generare un effetto occludente, con la saturazione dei pori, utilizzando resine poliuretatiche ed epossidiche, silicati, paraffine, gel acrilammidici e lattice siliconato.

La disposizione a parete avviene realizzando, a un'altezza di 10-20 cm dal terreno, diversi fori d'immissione a intervalli regolari (circa ogni 15 cm); s'introduce poi in essi il formulato a bassa pressione attraverso iniettori collegati a pompe oppure ricorrendo a impregnazioni a lenta diffusione, collegando gli stessi fori con tubi ai contenitori del prodotto.

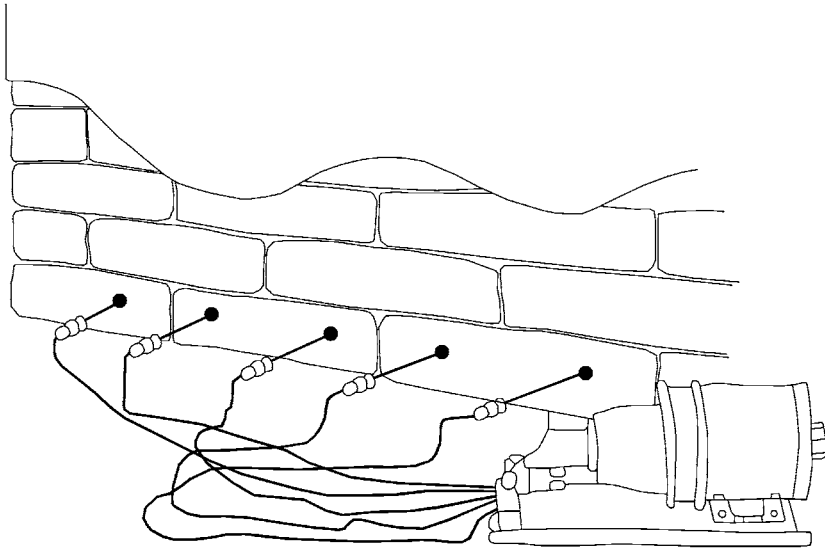
Il tipo e la quantità di sostanza da impiegare, i tempi di applicazione e l'efficacia finale dell'intervento dipendono dalle caratteristiche costitutive della struttura coinvolta, dal suo stato di conservazione e dal contenuto di umidità, nonché dalle condizioni climatiche del contesto (Tininini, 1999).

Prima dell'esecuzione di un intervento del genere è opportuno indagare approfonditamente la struttura per verificare l'eventuale presenza di lesioni nascoste, all'interno delle quali potrebbe disperdersi il formulato chimico. Tali indagini possono essere aiutate da strumenti termografici o georadar in pareti sottili (non più profonde di 30-35 cm) o con sistemi di videoendoscopia nelle murature più spesse. In presenza di affreschi, l'introduzione delle barriere chimiche può determinare il rischio della formazione di alterazioni cromatiche irreversibili.

Le barriere chimiche, per certi versi, possono essere preferite al taglio delle murature perché non interrompono la continuità strutturale della fabbrica, ma l'efficacia di entrambe le tecniche dipende spesso dalla parallela esecuzione d'interventi ausiliari, volti a migliorare l'evaporazione dell'umidità residua nella muratura (ad esempio con la disposizione d'intonaci aerati o di altri tipi di finiture traspiranti), oppure a garantire la realizzazione di opportuni sbarramenti verticali.

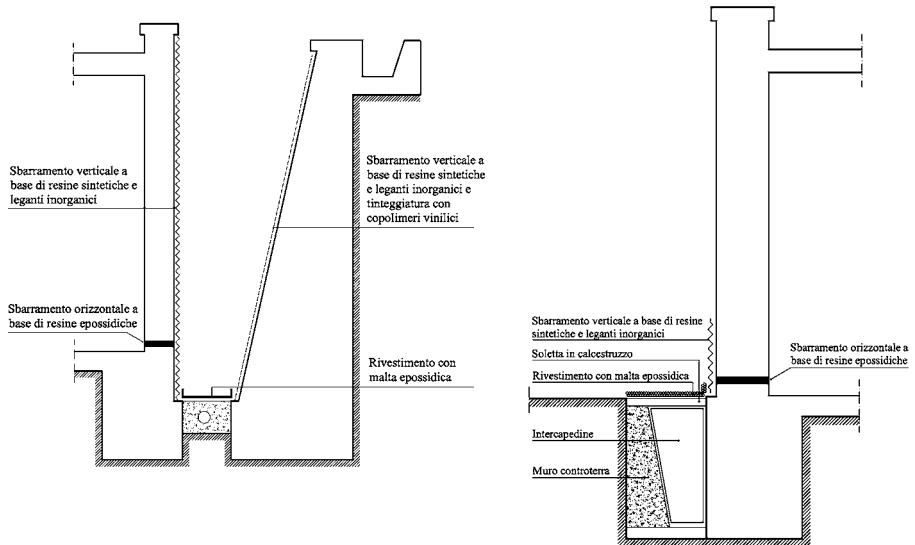
I problemi di umidità riscontrati nell'ampliamento ottocentesco di villa Giulia, in Roma, sono stati risolti grazie alla messa a punto congiunta di questo tipo di presidi. La posizione della fabbrica, sul fondo di un declivio, e l'appoggio delle fondazioni al di sopra di un terreno argilloso poco drenante avevano favorito l'insorgenza di fenomeni di risalita capillare su tutte le murature perimetrali in mattoni e tufo, nonché su un muro in tufo a ridosso del declivio di villa Borghese. Indagini preliminari condotte sulle murature aveva-

FIGURA 4.18  
Realizzazione di sbarramento orizzontale tramite iniezioni a pressione



Fonte: rielaborazione da Mundula, Tubi (2006).

FIGURA 4.19  
Dettagli esecutivi dell'intervento di risanamento dall'umidità a villa Giulia a Roma



Fonte: rielaborazione da De Vita (1998).

no consentito di stimare il contenuto di acqua all'interno, pari in media al 7% del peso complessivo.

L'intervento ha comportato la realizzazione di uno sbarramento orizzontale con iniezioni (FIG. 4.18) di formulati a base di resine epossidiche a pressione (1-4 bar); in parallelo, la costruzione di un'intercapedine lungo le pareti perimetrali ha permesso di diminuire il carico di acqua in fondazione, consentendo, in alcuni punti, di raggiungere la quota necessaria per eseguire lo sbarramento chimico. Prima di realizzare la barriera chimica è stato inoltre disposto uno sbarramento verticale impermeabile all'acqua e traspirante al vapore, per favorire l'evaporazione dell'acqua residua nelle murature. Tale sbarramento è costituito da un primo strato di composizione tixotropica a base di resine sintetiche e leganti inorganici, a effetto rasante e regolarizzante, da un secondo strato, con la stessa composizione ma più fluido, con effetto impermeabilizzante e, infine, da un intonaco di rinzaffo a base di cemento e sabbia con additivi antiritiro, avente la funzione di favorire l'adesione dello strato di finitura.

Lo sbarramento orizzontale (FIG. 4.19) è stato effettuato a circa 10 cm sopra il pavimento del primo solaio, previa demolizione dell'intonaco esistente, pulitura della superficie con spazzole e acqua e impermeabilizzazione delle pareti. Sono stati poi eseguiti i fori d'iniezione, ogni 10-20 cm, in punti fissati prima della realizzazione dello sbarramento verticale e comunque scelti in corrispondenza dei giunti di malta.

Nei fori, ripuliti dai detriti, sono stati inseriti appositi iniettori con fissaggio a espansione, collegati a un dispositivo di pompaggio flessibile con tubazioni, e attraverso di essi è stata immessa la sostanza impermeabilizzante a base di resine epossidiche in emulsione acquosa a bassa viscosità ed elevata capacità penetrante. Una volta terminate le iniezioni a pressione, dopo un certo periodo di aerazione sono stati estratti gli ugelli e stuccati i fori. L'intercapedine perimetrale è stata impermeabilizzata e coperta con una soletta in calcestruzzo armato e laterizio rivestita all'esterno con malta epossidica resistente al traffico. Al termine dei lavori, gli intonaci distrutti sono stati ripristinati e ritinteggiati con una pittura a base di copolimeri vinilici, resistente agli attacchi atmosferici e organici e piuttosto permeabile al vapore, in grado di consentire la completa asciugatura delle pareti risanate (De Vita, 1988a).

### *Risanamento da umidità ascendente: metodi elettrici*

La presenza di umidità da risalita capillare in una muratura determina la creazione di una differenza di potenziale fra il muro umido e il terreno, variabile tra i 10 e i 100 millivolt a seconda della natura di quest'ultimo. In altre parole, le molecole d'acqua, nell'aderire alla superficie idrofila, si dispongono in modo tale da formare un continuo ordinato di legami di idrogeno; tale organizzazione molecolare è molto sensibile all'influenza di campi elettrici e, quan-

do si verifica una differenza di potenziale nel sistema, tende a spostarsi verso l'elettrodo negativo.

Tale modalità consente lo spostamento anche di considerevoli quantità d'acqua: la differenza di potenziale che si genera fra una struttura muraria e il terreno determina la creazione di forze elettrosmotiche che tendono a trasportare l'acqua dal polo positivo (terreno) al polo negativo (murature in elevazione). Invertendo le polarità fra il terreno e la muratura si può naturalmente cambiare la direzione del flusso dell'acqua (Cigni, Codacci Pisanelli, 1987).

L'elettrosmosi attiva si propone di raggiungere l'obiettivo descritto tramite la creazione di un campo elettromagnetico da parte di un circuito elettrico. La tecnica prevede la creazione di due poli elettrici, il primo costituito da elettrodi fissati sulla parete eventualmente privata dell'intonaco (anodo), il secondo realizzato con elettrodi a puntazza inseriti nel terreno (catodo) e collegati in serie tra loro. I due circuiti (anodico e catodico) sono allacciati, mediante cavi, alla centralina d'alimentazione, che eroga corrente continua a impulsi a bassa tensione (Bosia, 2005; Valentini, 1999b).

L'efficacia effettiva della tecnica richiede misurazioni preliminari del campo elettrico esistente, così da stabilire la differenza di potenziale da applicare alla centralina di alimentazione, necessariamente superiore a quella che si vuole contrastare.

L'elettrosmosi passiva riduce la risalita capillare annullando la differenza di potenziale fra muro e terreno mediante la "cortocircuitazione" degli elettrodi inseriti nella parete e a terra: sul muro si realizza una serie di fori lungo una linea orizzontale in cui vengono introdotte sonde in rame connesse tra loro da un conduttore (cavo di rame); contemporaneamente, s'inseriscono barre metalliche in appositi pozzetti realizzati nel terreno. Il circuito viene chiuso collegando il filo di connessione delle sonde a parete con le prese a terra attraverso aste di rame (Bosia, 2005; Valentini, 1999b). Un sistema di questo tipo è stato disposto ad esempio nell'Oratorio Bragatin a Ceggia (VE).

Un altro intervento basato sull'azione di campi elettrici prevede l'impiego di barre polarizzate. La tecnica consiste nell'inserire, all'interno di fori di alloggiamento con inclinazione e passo predeterminati, barre in acciaio da costruzione o inox rivestite da gomma vulcanizzata o da resine epossidiche (per l'isolamento elettrico). Queste barre subiscono un processo d'induzione elettrostatica e generano un campo elettrico opposto a quello originario: la polarizzazione spontanea delle barre contrasterebbe in tal modo la risalita d'acqua (Franzoni, Sandrolini, 1999).

Un limite notevole di queste metodiche d'intervento, che si aggiunge agli inconvenienti legati all'invasività e alla difficile coesistenza con strutture murarie staticamente compromesse o molto degradate, è nella possibile interferenza generata da correnti vaganti, ad esempio favorita dalla presenza di metalli nella costruzione (catene in ferro, strutture armate ecc.); tali interferenze possono corrodere gli elettrodi e rendere inefficace il sistema.

Sono comunque necessarie analisi preventive sulle murature da risanare

per comprendere la natura del materiale e, soprattutto, le caratteristiche della conducibilità capillare (tipo di porosità) e sulla quantità di sali in essa presenti. Qualora, infatti, la struttura presenti un'alta percentuale di sali, in grado di favorire l'aggressione chimica degli elettrodi, diventano indispensabili i trattamenti per la rimozione o l'insolubilizzazione dei sali, almeno in prossimità degli elettrodi.

*Risanamento da umidità ascendente: intonaci aeranti*

La realizzazione di intonaci macroporosi, piuttosto che mirare all'intercettazione del flusso ascendente, si propone di incrementare la velocità di evaporazione dell'acqua presente nella parete (D'Orazio, 1999b). Tali intonaci sono generalmente costituiti da miscele di leganti idraulici uniti a inerti di natura calcarea o silicea, indispensabili per la resistenza meccanica, miscelati con inerti leggeri (argilla espansa, perlite, vetro estruso, sughero) che incrementano la porosità e, di conseguenza, la permeabilità al vapore del sistema. Di solito si aggiungono additivi aeranti, che creano bolle d'aria interne, o idrofobizzanti, che tentano di eliminare l'assorbimento di acqua per capillarità.

Per risultare efficace, infatti, un intonaco macroporoso deve possedere contemporaneamente tre caratteristiche: elevata permeabilità al vapore, basso coefficiente di assorbimento per capillarità, buona resistenza agli effetti dell'umidità. Deve quindi avere una rete di macro e micropori: i primi aumentano la superficie di evaporazione e possono immagazzinare i sali che si cristallizzano, gli altri, dotati di maggiore capacità di aspirazione capillare, aumentano il trasporto della massa interna d'acqua da prosciugare.

Tale tecnica, però, risulta davvero efficace solo se realizzata a regola d'arte e se abbinata ad altri interventi. Da soli, infatti, gli intonaci macroporosi non risolvono il problema della risalita capillare, mentre mascherano gli effetti prodotti dall'umidità, resistendo all'aggressione dell'acqua più a lungo dei rivestimenti tradizionali.

La stesura di un intonaco macroporoso avviene in due strati, previa la rimozione dell'intonaco esistente e la pulitura della superficie muraria da trattare. Il primo strato è costituito da un rinzaffo spesso circa 2-4 cm, contrassegnato da elevato potere capillare, accettabile resistenza meccanica e buona porosità; il secondo è il vero e proprio intonaco da risanamento, caratterizzato da uno scarso assorbimento capillare e da una buona traspirabilità al vapore. La riuscita dell'intervento è legata alla qualità dell'esecuzione tecnica dell'opera; è opportuno il costipamento della malta o la disposizione di finiture superficiali che ostacolano la diffusione del vapore.

Altro parametro importante è costituito dalle caratteristiche climatiche del sito: i climi umidi o molto piovosi ritardano l'asciugamento dell'intonaco e, di conseguenza, potrebbero non consentire l'eliminazione dell'acqua nel muro. In alcuni casi, la realizzazione di intonaci macroporosi richiede la parallela deumidificazione degli ambienti interni (D'Orazio, 1999b).



*Risanamento da umidità ascendente e condensa atmosferica*

La creazione di intercapedini orizzontali e verticali o di vespai costituisce il classico intervento tradizionale, mirato a eliminare il contatto diretto con il terreno umido da parte di pavimentazioni o murature tramite la creazione camere d'isolamento e di evaporazione. Questa soluzione risolve nel contempo i problemi legati alla condensa atmosferica, che insorgono di frequente negli ambienti umidi e poco ventilati.

L'intercapedine orizzontale consiste in uno spazio vuoto asciutto e coibente in grado di evitare la risalita dell'umidità o la formazione di condensa. La camera d'aria può essere realizzata in vari modi e, se comunicante con l'esterno attraverso aperture perimetrali, aumenta la sua efficacia grazie al maggiore ricambio di aria consentito. Il relativo solaio può essere poggiato su muretti ("sgattaiolato") oppure gettato direttamente su casseri drenanti, costituiti da blocchi prefabbricati in materiale plastico con i fianchi svuotati.

In alternativa, si può realizzare un vespaio frazionando la superficie da pavimentare e posizionando lo strato drenante, costituito da materiale inerte a granulometria decrescente verso l'alto, al di sopra di uno strato impermeabile e coibente (asfalto, bitume ecc.). L'intero pacchetto viene infine ricoperto da un massetto in calcestruzzo e dal pavimento. Quando possibile, la sistemazione di un sistema di riscaldamento a terra migliora le condizioni termoigrometriche generali e allontana ulteriormente il rischio di formazione di condensa.

La presenza di pavimentazioni storiche di pregio pregiudica ovviamente la realizzazione dei dispositivi descritti, a meno di difficoltose e rischiose operazioni di smontaggio e rimontaggio dei rivestimenti. Inoltre, tali tipi d'intervento comportano spesso variazioni di quote che alterano la configurazione spaziale e, in alcuni casi, la stessa fruizione dell'edificio storico.

La creazione di intercapedini o vespai verticali consente invece di eliminare il contatto diretto fra paramento murario esterno e terreno umido. L'intercapedine costituisce un vano vuoto in cui avviene l'evaporazione e, se ricoperta, deve essere dotata di griglie o canali di ventilazione, così da facilitare la circolazione dell'aria all'interno. Il vuoto, in particolari condizioni, può anche neutralizzare le possibili vibrazioni meccaniche provenienti dall'ambiente circostante l'edificio. Se le condizioni statiche della fabbrica lo consentono, la realizzazione dell'intercapedine comporta l'esecuzione di uno scavo fino alla base del muro e la sistemazione di strutture per il contenimento del terreno; è opportuno prevedere di tanto in tanto l'interruzione di questo scavo, in modo da evitare l'indebolimento della struttura muraria dovuto alla perdita di contrasto con il terreno. Sul fondo dell'intercapedine si realizza un canale drenante in pendenza per convogliare le acque in pozzetti di raccolta.

La costruzione alternativa di un vespaio comporta l'esecuzione dello scavo, l'impermeabilizzazione del fondo, a minima pendenza, e il posizionamento in basso di un tubo per il drenaggio, poroso e permeabile nella parte superiore, compatto e impermeabile in basso. Si riempie poi lo scavo con inerti poco

porosi a granulometria decrescente dal basso verso l'alto (ciottoli, ghiaia, sabbia), separati in strati da fogli di tessuto non tessuto. La muratura, in questo caso, va preliminarmente impermeabilizzata con guaine bituminose, feltro assorbente o la creazione di piccole camere d'aria intermedie.

La rimozione del terreno può comportare problemi statici, con cedimenti e stati fessurativi localizzati; l'atto irreversibile dello scavo può inoltre determinare, soprattutto in aree di rilevanza storica, il depauperamento e la distruzione di strati archeologici importanti (Bosia, 2005).

Le tecniche d'intervento descritte vengono spesso usate combinate fra loro. Nel chiostro di S. Chiara a Napoli, un'intercapedine verticale è stata collegata con aperture a una orizzontale, così da favorire la circolazione dell'aria e l'evaporazione dell'acqua contenuta nelle strutture.

Le condizioni specifiche dell'edificio in cui s'interviene giocano poi un ruolo determinante nella definizione esecutiva del progetto: nella chiesa di S. Pietro in Valle a Ferentillo (TR) l'idea iniziale di realizzare un'intercapedine ventilata continua lungo le pareti è stata abbandonata a causa della bassa resistenza delle fondazioni, così che al suo posto è stato sistemato un drenaggio (Tamanti, 2003b).

### *Controllo del microclima interno: climatizzazione*

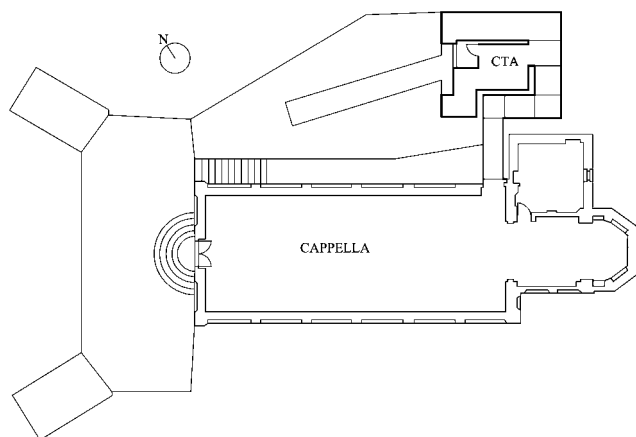
L'insufficiente isolamento termico degli ambienti e la variabilità delle condizioni termoigrometriche esistenti comportano spesso la formazione di condensa negli edifici storici. Soprattutto nei casi in cui sono disposte funzioni particolari all'interno di queste fabbriche (ad esempio espositive, di accoglienza o di visita), il tentativo di risolvere congiuntamente i problemi di gestione del *comfort* e di controllo del microclima sollecita spesso l'inserimento di impianti per la climatizzazione, che provvedono al condizionamento dell'aria riscaldandola, raffreddandola e deumidificandola, a seconda delle necessità.

Gli impianti di climatizzazione, distinguibili a seconda del fluido che utilizzano (aria, acqua o una miscela di entrambe), devono compensare i carichi sensibili (fornendo o sottraendo calore) e latenti (aumentando o diminuendo l'umidità specifica), nonché garantire un adeguato ricambio d'aria appositamente filtrata per evitare d'immettere nell'ambiente sostanze inquinanti (De Santoli, 2001).

Un impianto di climatizzazione deve controllare tutti i parametri che caratterizzano la qualità dell'aria e, quindi, temperatura, umidità relativa, velocità e purezza. Questo controllo, normalmente previsto presso le bocchette di emissione dell'aria degli apparecchi, dovrebbe essere rivolto all'intero ambiente, se caratterizzato dalla presenza di opere d'arte mobili e finiture sensibili ai condizionamenti microclimatici (come arazzi, opere in legno, stucchi ecc.), disponendo un vero e proprio monitoraggio diagnostico permanente, necessario a mantenere, per quanto possibile, i valori stabili nel tempo.

Nella cappella degli Scrovegni a Padova, durante il biennio 1995-96, è sta-

FIGURA 4.20  
Padova, cappella degli Scrovegni. Planimetria generale con inserimento del CTA



Fonte: rielaborazione da Basile (2003).

to installato un Corpo tecnologico attrezzato (CTA), una sorta di “protesi” tecnologica multifunzionale (FIG. 4.20) dotata di un impianto per l’aspirazione e di filtri per trattenere la polvere e altre particelle inquinanti, così da garantire il soddisfacimento delle condizioni di equilibrio termoigrometrico con l’ambiente (Borsella, 1998b). Preventivamente, e funzionalmente, a tale intervento si è scelto di chiudere l’ingresso in facciata in asse con la navata, principale causa di squilibri termici e di immissione di aria inquinata, ripristinando quello originario a nord, che metteva in collegamento la cappella con il palazzo adiacente demolito nel XIX secolo. Tale riapertura è stata anche determinata dalla volontà di restituire l’autentica modalità di fruizione degli affreschi di Giotto (Martinoni, 2003).

L’obiettivo era quello di eliminare gli scambi con l’ambiente esterno per limitare gli squilibri termoigrometrici e le immissioni di polveri e altre sostanze inquinanti e, al tempo stesso, di regolamentare la fruizione della cappella e, quindi, l’afflusso dei visitatori, che costituivano l’altra importante causa di turbamento delle condizioni microclimatiche.

Il CTA è una struttura in acciaio e vetro (FIG. 4.21) completamente autonoma in quanto non appoggiata al manufatto storico e fondato su una platea preesistente, posizionato a nord-est della cappella leggermente arretrato rispetto alla facciata. Si tratta di un volume alto circa 3 m suddiviso in tre ambienti (FIG. 4.22): una zona di ingresso, una di filtro, che permette l’accesso e l’uscita dalla cappella, e una di deflusso; i settori sono tutti muniti di porte automatiche interbloccate.

Il CTA è stato progettato per provvedere alla ventilazione meccanica del-

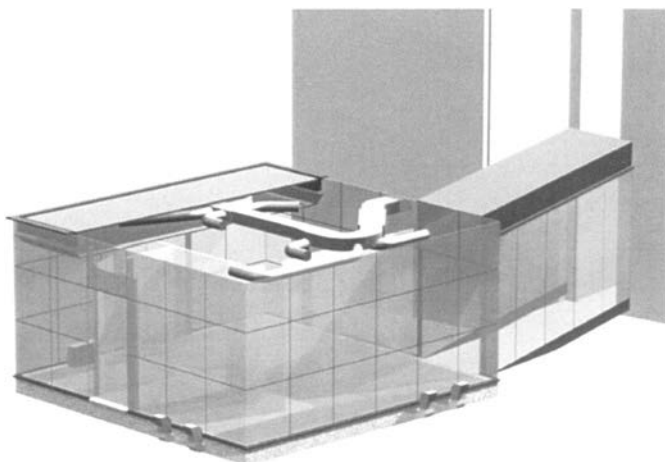
FIGURA 4.2 I  
Padova, cappella degli Scrovegni. Vedute del corpo tecnologico attrezzato



Fonte: Basile (2003).

FIGURA 4.22

Padova, cappella degli Scrovegni. Schema del corpo tecnologico attrezzato



Fonte: Basile (2003).

l'ambiente, per garantire il ricambio di aria a temperatura, umidità relativa e velocità controllate e per regolare l'afflusso dei visitatori, consentendo la permanenza contemporanea, all'interno della cappella, di non più di 25 persone ogni venti minuti. L'impianto è completamente regolamentato da un sistema di controllo digitale diretto (Gennaro, 1998; Stevan, 2003).

L'efficacia degli impianti di condizionamento è legata al loro funzionamento continuo, tale da prevedere solo limitate attenuazioni notturne o in determinati periodi dell'anno; un funzionamento adeguato dovrebbe essere pertanto garantito anche in caso d'interruzione dell'energia elettrica, dovuto a *black out* o necessario a consentire interventi manutentivi. Tale circostanza il più delle volte non è garantita ed è pertanto possibile che si determinino negli ambienti normalmente climatizzati sensibili squilibri.

#### *Risanamento da condensa: ventilazione e riscaldamento degli ambienti*

Le esigenze conservative della fabbrica storica e delle opere in essa contenute comportano difficoltà legate alle questioni ambientali, ma anche agli inevitabili problemi di invasività e reversibilità dei nuovi inserimenti; per tali ragioni in questi contesti le soluzioni di tipo "passivo" sono sempre preferibili alle climatizzazioni impiantistiche e riescono il più delle volte a contenere e risolvere i problemi della condensa. Una soluzione frequente, ad esempio, sfrutta al meglio le aperture esistenti negli edifici antichi, sulla base del clima e dei cicli stagionali, avendo cura nell'evitare gli sbalzi termici eccessivi, mentre la rego-

lamentazione del numero dei visitatori, veicoli d'immissione di vapore e di inquinanti, costituisce il presidio più efficace, se non l'unica risposta valida, alle esigenze di controllo del microclima negli ambienti ipogei.

Quando il sistema passivo di aerazione o di controllo del carico di utenza non è sufficiente a scongiurare il problema della condensa, possono comunque essere inseriti altri tipi di impianto, per la ventilazione forzata e, soprattutto, per il riscaldamento (questi ultimi costituiti da apparecchiature che agiscono solo sulla temperatura e, quindi, sul carico termico sensibile).

Nella progettazione di questi impianti è necessario garantire le condizioni di benessere dell'edificio e dei suoi occupanti, conciliando esigenze diverse e a volte addirittura opposte. Affinché risulti efficace per combattere la formazione di condensa, il riscaldamento deve essere disposto perlopiù nelle ore notturne e nelle stagioni calde, deve risultare continuo e poco elevato; il benessere delle persone, al contrario, richiede impianti più potenti, attivi con funzionamento intermittente soprattutto nelle stagioni fredde (Massari, Massari, 1981).

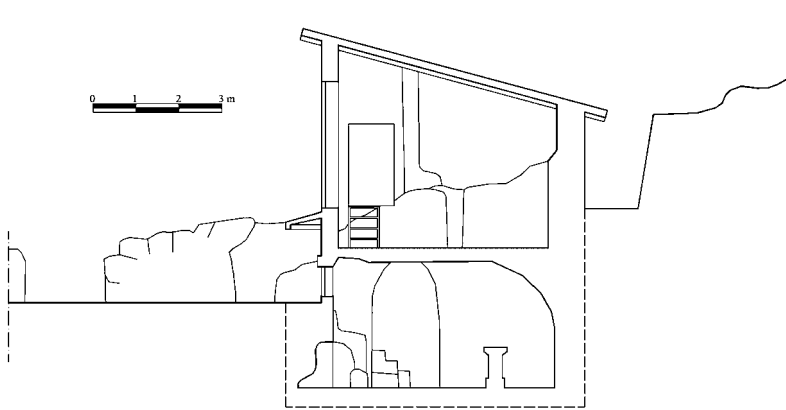
Per evitare la condensa occorre riscaldare solo quando la temperatura di superficie della muratura e dell'oggetto sia uguale o più bassa della temperatura di rugiada; di conseguenza, affinché si generi un'effettiva azione di salvaguardia dal fenomeno di condensazione, il sistema dovrebbe intervenire solo in condizioni di pericolo: quando la temperatura di superficie si trova ai limiti, ad esempio a  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  dal punto di rugiada, occorrerebbe far partire il riscaldamento con una temperatura di appena  $0,5\text{-}0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$  al di sopra del punto di rugiada.

Nei locali ipogei occorre intervenire con una stabilizzazione del microclima, accertando che le murature non siano interessate da lenti fenomeni evaporativi legati alla trasmissione dell'onda termica proveniente dall'irraggiamento in superficie. La propagazione del calore può disturbare il contenuto d'acqua delle superfici murarie ma non ha la capacità di modificare le condizioni termiche dell'intero ambiente. Quindi un sistema di riscaldamento dovrebbe essere utilizzato solo dopo aver riscontrato l'assenza di fenomeni di evaporazione dalle murature e deve garantire il raggiungimento di un valore di temperatura appena superiore al punto di rugiada. Si ricorda, infatti, che il riscaldamento dell'ambiente comporta l'abbassamento del tasso d'umidità relativa e, pertanto, l'essiccazione dell'aria circostante le pareti; tale situazione favorisce il richiamo di acqua dalle murature verso l'ambiente.

L'efficacia della soluzione del riscaldamento è strettamente legata alla presenza di un monitoraggio continuo delle caratteristiche microclimatiche dell'ambiente. Soluzioni di questo tipo sono state adottate in diversi edifici storici, associate o meno ad altri presidi contro l'umidità.

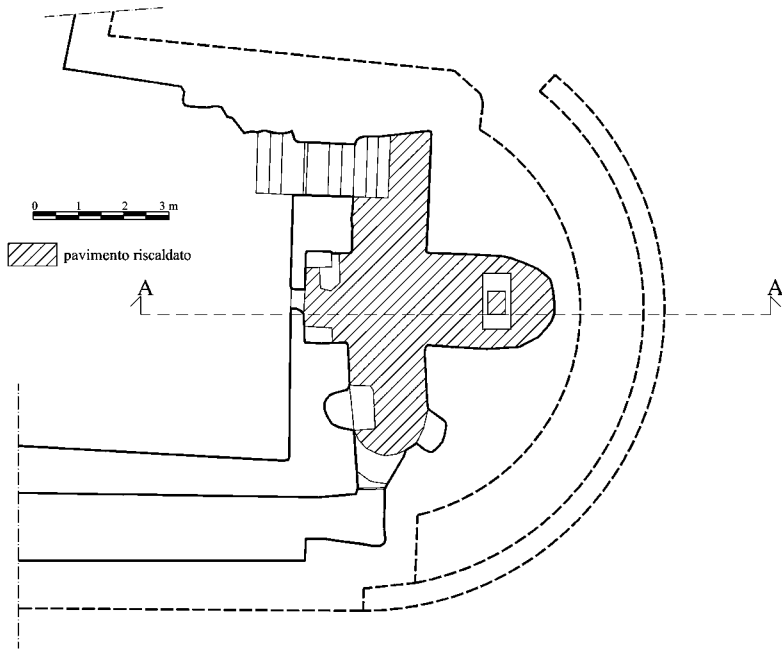
Nella cripta dell'abate Epifanio nel complesso abbaziale di S. Vincenzo al Volturno (Isernia) è conservato, in condizioni semipogee (FIG. 4.23), un im-

FIGURA 4.23  
Complesso monastico di S. Vincenzo al Volturno (Isernia), cripta dell'abate Epifanio. Sezione A-A



Fonte: rielaborazione da Massari (1988).

FIGURA 4.24  
Complesso monastico di S. Vincenzo al Volturno (Isernia), pianta della cripta con delimitazione della zona in cui è stato installato il riscaldamento a pavimento



Fonte: rielaborazione da Massari (1988).

FIGURA 4.25

Complesso monastico di S. Vincenzo al Volturno (Isernia), cripta dell'abate Epifanio. Stratigrafia del pavimento riscaldato



Fonte: rielaborazione da Massari (1988).

portante ciclo di affreschi del IX secolo. Alcune campagne di monitoraggio (Massari, 1988) hanno evidenziato la presenza di fenomeni di condensa dovuti all'ingresso di aria calda dall'esterno; questa, incontrando le masse d'aria più fredde contenute all'interno della cripta, soprattutto in prossimità del pavimento, si raffreddava velocemente, finendo con il condensarsi proprio sugli affreschi alle pareti.

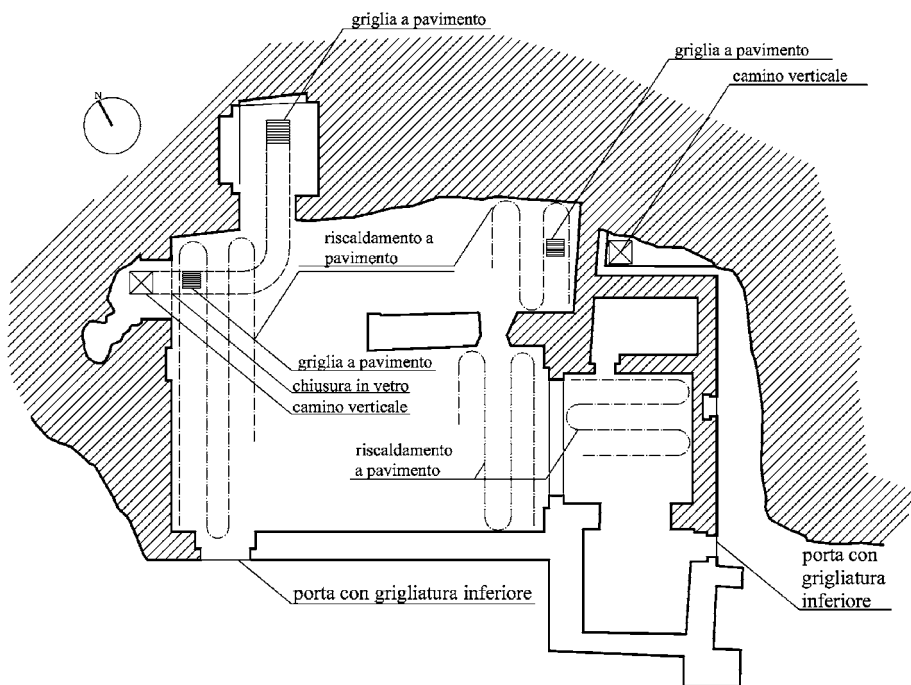
Il risanamento successivamente condotto ha in primo luogo eliminato i fenomeni d'infiltrazione e di risalita capillare ugualmente presenti nella fabbrica e si è successivamente concentrato sulla soluzione del problema della condensa, risolto con la disposizione di un impianto per il riscaldamento a pavimento (FIG. 4.24) alimentato da energia elettrica e con il controllo del numero dei visitatori all'interno della cripta.

L'impianto, in funzione dal 1985, lavora con una potenza molto bassa ed è realizzato annegando in una malta di allettamento un termofilo alimentato da un variatore elettrico di tensione (FIG. 4.25); esso è programmato per attivarsi nei periodi primaverili ed estivi, così da mantenere l'aria in movimento, evitando in tal modo che essa si raffreddi fino alla saturazione. In queste stagioni, infatti, possono verificarsi fenomeni di stratificazione dell'aria presente nella cripta: l'aria in ingresso, a temperature più elevate, va a posizionarsi in corrispondenza del soffitto, mentre quella presente nella cripta, più fredda, ristagna in prossimità del pavimento, dove può raggiungere condizione di saturazione e condensare. Per evitare temperature pavimentali troppo elevate è stato annegato nell'allettamento un termostato con sensore (Massari, 1988).

La chiesa romanica di S. Maria delle Grotte presso Rocchetta al Volturno (Isernia) è internamente rivestita da affreschi risalenti al XII e al XIV secolo.



FIGURA 4.26  
Rocchetta al Volturno (Isernia), S. Maria delle Grotte. Indicazione degli interventi per il controllo del microclima interno



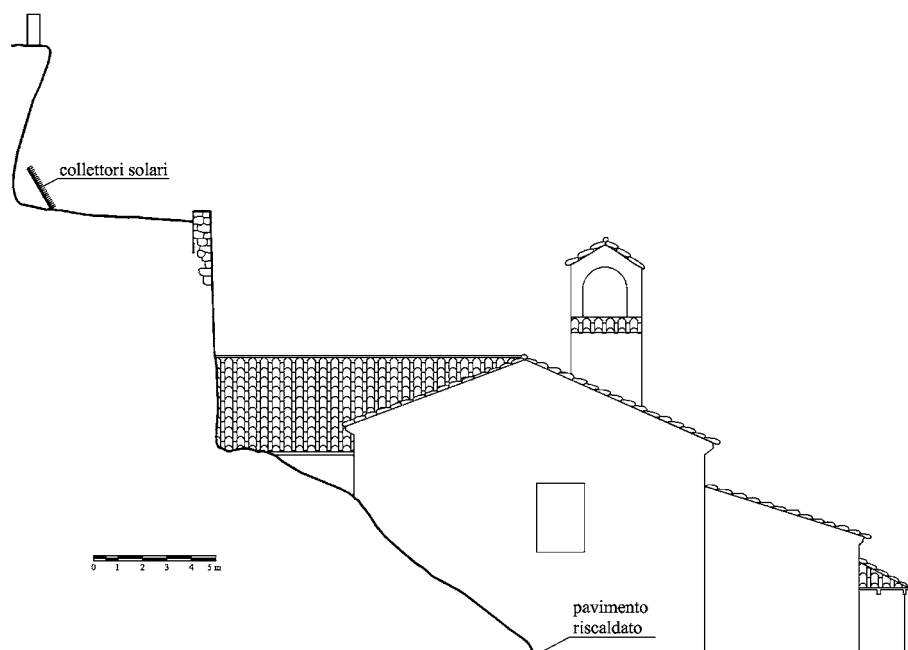
Fonte: rielaborazione da Massari (1988).

Una delle pareti affrescate è stata ricavata nella roccia e risente notevolmente di problemi d'infiltrazione e condensazione. Le condizioni microclimatiche interne, in particolare, determinavano una stratificazione dell'aria favorita anche dalla forte insolazione cui è sottoposta la copertura e dalla scarsa ventilazione della fabbrica (la chiesa rimane quasi sempre chiusa).

La regolamentazione del ricambio d'aria attraverso la creazione di camini di richiamo e di prese d'aria sul tetto e la disposizione di un riscaldamento con serpentine a terra (FIG. 4.26), alimentato da collettori solari (FIG. 4.27) che sfruttano l'esposizione dell'edificio, hanno risolto i problemi di condensa in maniera coerente e poco invasiva (Massari, 1988).

Anche lo studio, già descritto nel paragrafo precedente, sul microclima interno della Tomba dei Rilievi a Cerveteri ha messo in luce come l'intervento ottimale di risanamento sia costituito dalla sistemazione di un'adeguata rete di smaltimento delle acque e di un sistema di schermi termici in grado di limita-

FIGURA 4.27  
Rocchetta al Volturno (Isernia), S. Maria delle Grotte. Posizionamento dei collettori solari nascosti alla vista del visitatore



Fonte: rielaborazione da Massari (1988).

re l'irraggiamento del terreno e di proteggerlo dall'acqua piovana. (Accardo, Cacace, Rinaldi, 1987, 1988).

*Risanamento da umidità da igroscopicità: trasformazione dei sali*

La presenza di efflorescenze, ovvero di sali cristallizzati sulla superficie muraria a seguito dell'evaporazione dell'acqua interna alla parete, tende a favorire l'assorbimento di acqua dall'esterno: i sali, infatti, accelerano i fenomeni di risalita e richiamano lo stesso vapore acqueo contenuto nell'atmosfera. L'estrazione dei sali tramite impacchi, pure utile e necessaria, non risolve nella maggior parte dei casi il problema dell'umidità nelle murature.

In alternativa, si può procedere alla trasformazione dei sali igroscopici, solubili in acqua, in cristalli non igroscopici e insolubili; il processo richiede l'applicazione di formulati chimici diluiti in preparati liquidi, i quali imbibiscono la superficie e fanno precipitare i sali in soluzione acquosa. Si tratta di un intervento preparatorio che comporta ulteriori trattamenti dell'umidità, ad

esempio di tipo elettrosmotico o con barriere chimiche, che potrebbero essere altrimenti ostacolati o vanificati dalla presenza dei sali solubili.

#### 4.2.3. Una panoramica esemplificativa

Di seguito si illustrano due esempi di risanamento dall'umidità che chiariscono come la classificazione delle modalità d'intervento in meccanica corrispondenza con le patologie riscontrate appaia riduttiva e poco realistica. Le esperienze condotte sul campo presentano infatti una realtà molto più variegata e complessa, che associa patologie e trattamenti diversi e che, soprattutto, necessita della specifica comprensione della natura storico-costruttiva della fabbrica.

I due esempi mostrano nel contempo le fasi dell'intervento di risanamento, fondato sullo studio accurato dell'edificio e della sua storia; le indagini conoscitive preliminari effettuate sul manufatto, per quanto possibile non distruttive e poco invasive, rivestono un ruolo determinante nella scelta delle operazioni da condursi e i risultati finali dovranno possibilmente essere sottoposti a un monitoraggio costante.

#### *S. Pietro in Valle a Ferentillo*

La chiesa dell'abbazia di S. Pietro in Valle a Ferentillo (in provincia di Terni) si presenta oggi con una pianta a nave unica coperta a capriate che termina con transetto triabsidato, a sinistra del quale si trova un campanile di forma pressoché quadrata. All'interno della chiesa si trova, tra l'altro, un ciclo pittorico particolarmente importante, per la lunga serie di scene tratte dal Vecchio e dal Nuovo Testamento che si svolgono sulle pareti.

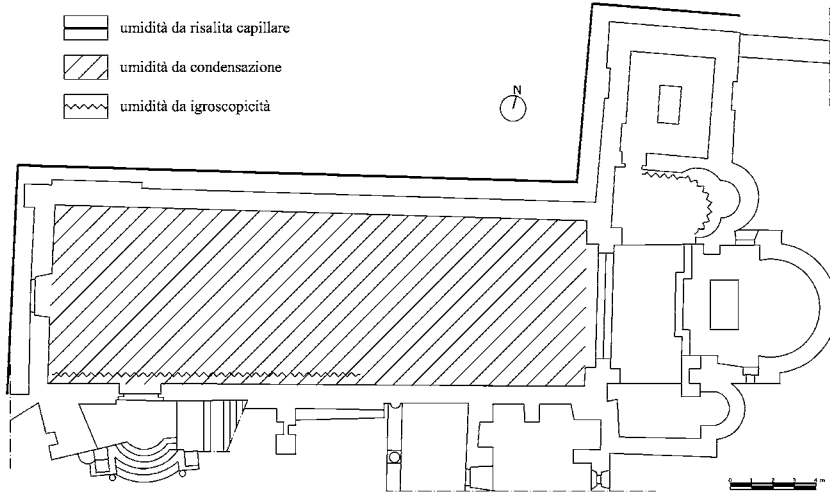
L'intervento di risanamento, condotto nel biennio 1984-86, s'inquadra nell'ambito di un progetto di studio e di restauro dell'edificio promosso dalla Soprintendenza per i Beni ambientali, architettonici, artistici e storici dell'Umbria, che affronta diverse questioni, come il consolidamento statico delle strutture, il risanamento dalle patologie di umidità, l'analisi, la comprensione e la conservazione del ciclo pittorico (Massari, 2003).

La soluzione dei problemi dovuti all'umidità ha richiesto, in particolare, la stretta correlazione tra fasi diagnostica e operativa, l'immediata verifica dei risultati ottenuti, il monitoraggio costante per il controllo degli esiti nel tempo.

A seguito di indagini igrometriche e igrotermiche sono state evidenziate le seguenti patologie da umidità (FIG. 4.28):

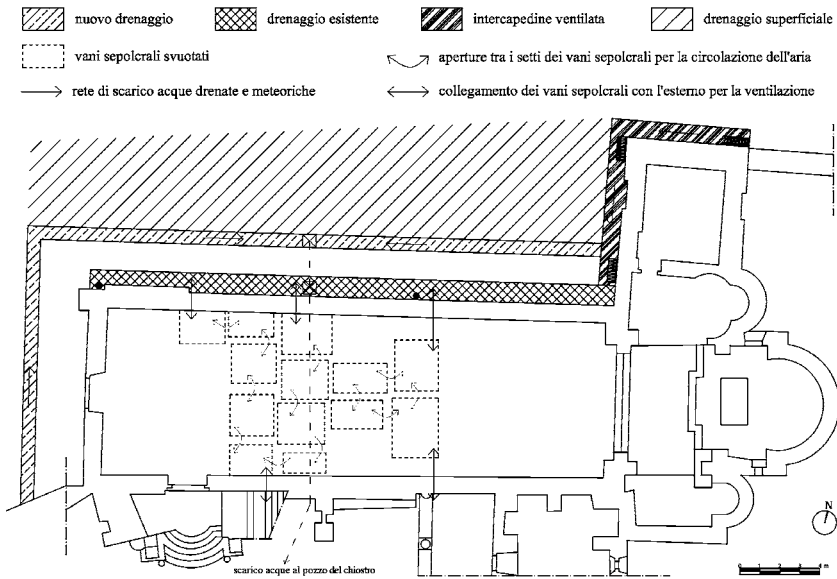
- risalita capillare sul fronte principale e sul lato sinistro della chiesa che interessava superfici dipinte in facciata (dove gli affreschi si estendono fino a 60-70 cm dal pavimento). Tale risalita non era imputabile alla presenza di falda freatica, come si evinceva dall'irregolarità del fronte umido (le fondazioni, fra l'altro, hanno una ridotta profondità e sono state costruite con pietrame poco assorbente). La causa andava invece cercata nella conformazione del ter-

FIGURA 4.28  
S. Pietro in Valle a Ferentillo. Planimetria con indicazione delle principali tipologie di umidità



Fonte: rielaborazione da Massari (2003).

FIGURA 4.29  
S. Pietro in Valle a Ferentillo. Schema degli interventi per il risanamento dalle patologie da umidità



Fonte: rielaborazione da Massari (2003).

reno, che faceva sì che i due elevati ecclesiali fossero direttamente investiti dalle acque piovane a nord e dall'acqua di ristagno in facciata. Il fenomeno era amplificato dal cattivo sistema di smaltimento delle acque piovane, dotato soltanto di pluviali a scarico libero. A peggiorare ulteriormente la situazione vi era stato un tentativo fallito di drenaggio, effettuato con un riempimento in pietrame di un'intercapedine troppo poco profonda e priva di scarico, operazione questa che aveva finito per favorire l'accumulo e il ristagno dell'acqua in fondazione;

- umidità da condensazione per inerzia termica particolarmente accentuata nei mesi primaverili ed estivi, dovuta alla scarsa ventilazione interna e alle escursioni termoisometriche, perlopiù concentrata sul pavimento della chiesa;
- umidità da igroscopicità. Nell'abside sinistra e nella prima metà del lato destro della chiesa si riscontravano elevate concentrazioni di nitrati igroscopici, determinate dalla presenza di sepolture al di sotto del pavimento e dall'uso passato della chiesa come ricovero per animali.

Gli interventi programmati (FIG. 4.29) si ponevano l'obiettivo di eliminare quanto più possibile la risalita capillare, di ridurre l'inerzia termica delle strutture pavimentali e di regolare le condizioni microclimatiche, limitando le forti escursioni termiche e la stasi dell'aria interna.

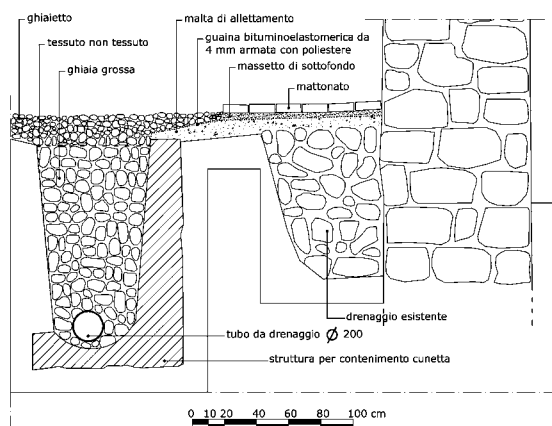
La risalita capillare era alimentata, come già detto, da acque piovane disperse provenienti da monte e dagli scarichi liberi della copertura. L'idea iniziale di sistemare un'intercapedine ventilata intorno ai lati investiti dall'umidità ascendente è stata scartata per una serie di considerazioni circa la scarsa profondità delle fondazioni e la sismicità della zona. Si è quindi optato per la realizzazione di un drenaggio parallelo ai lati della chiesa, sufficientemente distaccato così da non creare problemi di stabilità (FIG. 4.30). Tale drenaggio doveva estendersi, oltre che al lato sinistro e alla facciata, anche al campanile, ma in fase esecutiva il ritrovamento di reperti archeologici e la verifica della maggiore profondità delle fondazioni di quest'ultimo hanno richiesto alcune varianti.

Il drenaggio è stato realizzato sul fianco sinistro e sulla facciata, così da allontanare ulteriormente l'acqua dalle strutture murarie, mentre sul campanile è stata creata un'intercapedine aerata. Inoltre, la zona a monte del fronte laterale, oggetto di una estesa campagna di scavi, è stata drenata superficialmente.

Parallelamente è stata creata una rete fognaria orizzontale per smaltire l'acqua raccolta; a essa sono stati collegati anche i pluviali, che prima scaricavano liberamente. Si è inoltre deciso, in fase esecutiva, di mantenere il vecchio drenaggio, reso comunque inattivo.

L'altro intervento, finalizzato a prosciugare le strutture e a diminuire l'inerzia termica del pavimento e condotto all'inizio dei lavori, è consistito nello svuotamento delle tombe che, una volta liberate, sono state collegate fra loro, attraverso la creazione di aperture nei setti di separazione, e con l'esterno, tramite passaggi che comunicano con i fianchi sinistro e destro della chiesa. È

FIGURA 4.30  
S. Pietro in Valle a Ferentillo. Sezione in corrispondenza del lato nord della chiesa



Si nota l'intercapedine esistente riempita di pietrame, poco profonda e priva di scarico affiancata dal drenaggio di nuova realizzazione.

Fonte: rielaborazione da Massari (2003).

stata poi effettuata una revisione del manto di copertura, impermeabilizzato e isolato tramite pannelli di vetro cellulare, allo scopo di limitare le escursioni termoisometriche e, conseguentemente, il fenomeno della condensa.

Fra gli interventi di risanamento era prevista la disposizione di un impianto di riscaldamento radiante alimentato da una batteria di collettori solari, da realizzare solo sulle porzioni di pavimentazione più recenti e facilmente rimovibili, per impedire gli effetti di condensa a terra. A seguito dei buoni risultati ottenuti con i provvedimenti disposti, evidenziati da una campagna di monitoraggio microclimatico eseguita nell'estate del 1992, si è temporaneamente accantonata la soluzione dell'impianto a tubi radianti per favorire piuttosto la regolarizzazione del ricambio d'aria all'interno della chiesa.

Il problema, però, era quello di ottenere condizioni termoisometriche che evitassero al tempo stesso l'insorgere dei fenomeni di condensa e la cristallizzazione dei sali.

L'umidità da igroscopicità, infatti, era difficilmente contrastabile, sia per la quantità di nitrati presenti nei campioni murari analizzati, sia per la diffusione in profondità dei sali, che ne rendeva praticamente impossibile l'estrazione. L'unica strada percorribile consisteva così nel mantenere l'umidità relativa al di sopra della soglia di cristallizzazione, soluzione che, però, avrebbe portato facilmente alla formazione di condensa.

Nel 1996 sono stati presi i seguenti provvedimenti per consentire il rimescolamento dell'aria all'interno della chiesa:

- in alcune finestre (la prima della parete destra, l'ultima della parete sinistra e

quella del transetto), scelte in modo da migliorare il più possibile la circolazione dell'aria, i vetri fissi sono stati sostituiti con infissi a "vasistas", schermati all'esterno da un cristallo protettivo per evitare le infiltrazioni di acqua piovana;

- nell'abside centrale sono stati riaperti due passaggi murati verso l'esterno, in entrambi sono state inserite finestre con vetri stratificati dotati d'inferriata esterna e di ante in legno interne, completamente apribili nel passaggio di sinistra, con apertura a "vasistas" della parte superiore a destra;
- nelle ante della porta che permette l'accesso al chiostro, sul fronte destro della chiesa, sono state aperte due finestrelle con chiusura a ghigliottina.

Si sono poi studiati gli effetti che gli interventi descritti hanno determinato sul microclima, tramite due campagne di monitoraggio condotte nei mesi di giugno e novembre 1996 a cura dell'ICR; queste hanno evidenziato la bassa probabilità dei fenomeni condensativi e, nel contempo, la sussistente possibilità d'innescare episodi di igroscopicità in presenza di sali solubili. È da sottolineare, in merito a quest'ultimo fenomeno, che nel corso della seconda campagna la situazione sembrava migliorata, in quanto le escursioni giornaliere di umidità relativa restavano contenute entro valori superiori alla soglia di cristallizzazione dei sali.

Una spiegazione del fenomeno può derivare dal fatto che le campagne di monitoraggio, condotte subito dopo la conclusione degli interventi descritti, hanno illustrato un microclima interno ancora non assestato a seguito della corretta regolazione delle aperture, che era in realtà in grado di garantire una minore variazione dell'umidità relativa.

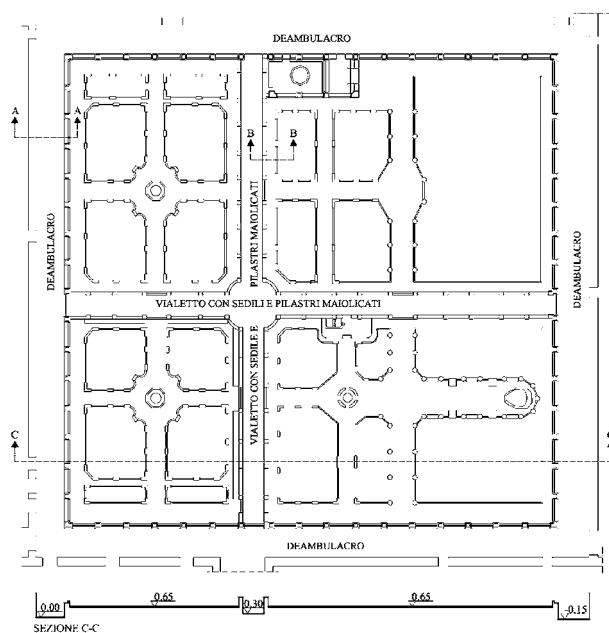
Sarebbe consigliabile, quindi, la realizzazione di un monitoraggio continuo delle caratteristiche microclimatiche, abbinata allo studio delle diverse combinazioni delle aperture. In ogni caso, le zone affette da efflorescenze devono essere controllate e periodicamente restaurate (Massari, 1990, 2003; Tamanti, 2003a); in effetti, misurazioni condotte da parte dell'ICR nel giugno-novembre 2007 hanno confermato il buon comportamento dell'ambiente.

### *Chiostro di S. Chiara a Napoli*

Nell'intervento condotto nel chiostro di S. Chiara si è affrontato un problema poco comune e poco trattato in precedenza: il restauro delle maioliche danneggiate a causa dell'umidità. Il chiostro, di origine medievale, appare oggi il prodotto delle trasformazioni intraprese alla metà del Settecento su progetto dell'architetto Domenico Vaccaio. Fondamentale è stato l'apporto dei due "riggiolari" napoletani, Donato e Giuseppe Massa, che, tra il 1739 e il 1742, abbellirono il giardino centrale con mattonelle decorate con paesaggi, trionfi, scene mitologiche, festoni di foglie, fiori e frutta, per una superficie totale di circa 1.000 mq.

Tale giardino, di forma pressoché quadrata e circondato lungo tutto il perimetro da un deambulatorio affrescato alle pareti, è attraversato da due vialetti ortogonali, a loro volta delimitati da pilastri e sedili maiolicati (FIG. 4.31).

FIGURA 4.31  
Napoli, chiostro di S. Chiara. Pianta e sezione C-C



Fonte: rielaborazione da Massari (2003).

Il giardino interno si trova a un livello più alto (di circa 70 cm) rispetto al deambulatorio e ai due vialetti, e tale posizione facilita la penetrazione di acqua nelle murature rivestite dalle maioliche, attivando un assorbimento capillare sia dal basso che dai lati.

Il giardino centrale raccoglieva poi, oltre alla pioggia diretta, l'acqua delle terrazze che coprono il deambulatorio, convogliata da canali e doccioni, e l'acqua delle coperture a falde, ricondotta alle medesime terrazze attraverso appositi discendenti.

I precedenti tentativi di allontanare le acque disperse modificando i livelli del terreno, per correggere le pendenze ed evitare il ristagno, erano risultati controproducenti, perché avevano finito per addossare ancora più terra sulle superfici maiolicate, nascondendo parzialmente la fascia basamentale.

Il degrado generalizzato che interessava pertanto tutte le superfici maiolicate si manifestava soprattutto con la formazione di vegetazione fra i giunti della mattonelle e con il distacco dello smalto dal biscotto.

A conclusione di uno studio portato avanti nel 1988, il Ministero per i Beni Culturali e Ambientali, con il coordinamento della Fondazione Napoli, ha avviato un intervento di restauro del chiostro. La necessità di operare con-



testualmente per deumidificare e consolidare le murature e garantire la conservazione, il consolidamento e il restauro delle superfici maiolicate richiedeva un'azione multidisciplinare congiunta da parte di diverse competenze professionali, resa più delicata dalla mancanza di un'esperienza consolidata nel restauro conservativo di maioliche decorate. L'intervento è stato localizzato inizialmente, in via sperimentale, su una piccola zona del chiostro e a ogni operazione condotta sono stati associati un monitoraggio costante e il controllo dei risultati ottenuti (Massari, 1998).

Si è visto innanzitutto che lo smontaggio delle maioliche, fissate con una malta cementizia molto resistente, avrebbe comportato danni irreversibili ai rivestimenti e sarebbe stata piuttosto inutile ai fini conservativi. Inizialmente, sulla base dell'esperienza maturata sulle superfici intonacate o affrescate, si era ipotizzato che la causa del distacco dello smalto dal biscotto fosse la presenza di sali solubili trasportati dall'acqua. Solo in seguito, con un'analisi più approfondita delle maioliche, è emerso che sotto le smalto proliferavano alghe verdi e blu, che si erano infiltrate attraverso le microlesioni presenti negli elementi e si erano sviluppate grazie alla presenza di umidità e di luce.

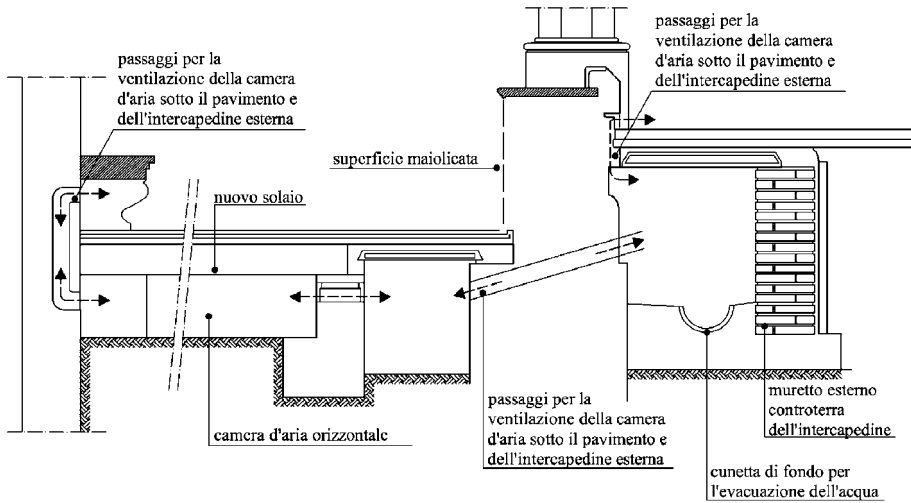
È stato inoltre verificato che, per ridurre il contenuto di umidità nelle murature, sarebbe stato opportuno procedere a un allontanamento delle acque dal terreno e al miglioramento dell'efficienza della rete fognaria. Per allontanare la terra bagnata dalle strutture e per aumentare la ventilazione delle fondazioni, il pavimento del deambulatorio è stato ricostruito su camera d'aria ventilata e, contemporaneamente, per evitare l'apporto laterale di umidità e favorire l'evaporazione dell'acqua e il trasporto dei sali lontano dalle maioliche, è stata realizzata un'intercapedine verticale. Camera d'aria orizzontale e verticale comunicano fra loro tramite fori; il collegamento con l'esterno è al tempo stesso garantito da griglie posizionate sotto i sedili aderenti alla parete più esterna del deambulatorio e per mezzo di una fessura continua alta 2 cm posta sul retro della superficie maiolicata. Le strutture cementizie di sostegno della pavimentazione nel deambulatorio sono state distaccate dalle murature preesistenti grazie alla sistemazione di fodere in mattoni eventualmente rimovibili (FIG. 4.32).

Un ulteriore sbarramento alla risalita capillare è stato ottenuto costruendo sottofondazioni in mattoni per i pilastri e le sedute in muratura dei vialetti centrali; questi ultimi appoggiavano in diretto contatto con il terreno. Alla base delle sottofondazione è stata inserita una lastra di marmo spessa 3 cm, con la funzione di strato impermeabile (FIG. 4.33). Un'intercapedine verticale, come quella del deambulatorio, è stata realizzata anche nei vialetti centrali.

L'adeguamento della rete fognaria ha comportato la posa in opera di grate collocate in corrispondenza dei doccioni, montate più in basso rispetto al piano di calpestio e nascoste con un riporto di pietra frantumata simile alla pavimentazione dei percorsi esterni al deambulatorio.

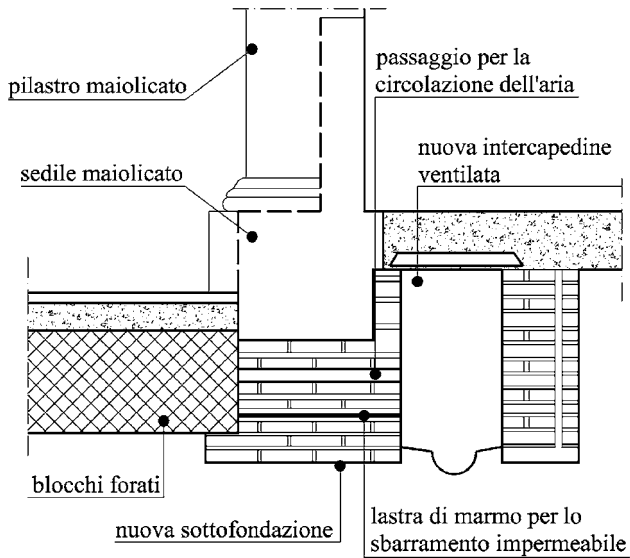
Per eliminare i ruscamenti sulle maioliche dalle lastre e dai capitelli lapidei sono state applicate protezioni con lastre di piombo oppure, quando tale

FIGURA 4.32  
Napoli, chiostro di S. Chiara. Sezione A-A, in cui si evidenziano le intercapedini verticale e orizzontale



Fonte: rielaborazione da Massari (1998).

FIGURA 4.33  
Napoli, chiostro di S. Chiara. Sezione B-B: particolare dell'impermeabilizzazione con lastre di marmo



Fonte: rielaborazione da Massari (1998).

soluzione si mostrava esteticamente inadeguata, da trattamenti a base di silicone (da rinnovare circa ogni 3-4 anni), in particolare sui muretti del deambulatorio.

Sono stati infine affrontati il consolidamento e il restauro delle superfici maiolicate in due fasi successive. Nella prima, propedeutica all'intervento sulle strutture, sono stati eliminati i sali e le incrostazioni, nonché consolidati gli smalti pericolanti. È stata poi applicata una protezione per evitare sia il danneggiamento delle maioliche durante i lavori, sia che l'evaporazione dell'acqua durante l'asciugatura attraversi tali superfici; il flusso d'aria è stato comunque pilotato verso l'intercapedine. Nella seconda fase, successiva ai lavori sulle strutture e al completo prosciugamento di questi elementi costruttivi, è stata completata la pulitura delle maioliche, fissando le parti distaccate dal supporto e consolidando i giunti di malta (Massari, 1998).



# Tecnologie per i problemi strutturali

di *Adalgisa Donatelli e Alessia Placidi*

## 5.1

### Diagnostica strutturale

#### 5.1.1. Introduzione

La diagnostica strutturale applicata al restauro architettonico rappresenta una modalità di approfondimento delle conoscenze relative ai materiali, alle tecniche, alle vicende costruttive e agli eventuali dissesti strutturali presenti nella fabbrica.

Le procedure d'indagine e i metodi di analisi strutturale possono contribuire alla comprensione e alla valutazione quantitativa prima di progettare interventi volti alla conservazione e alla messa in sicurezza degli stati di danno presenti in un edificio storico, a volte non totalmente identificabili con le sole analisi visive. In tal senso, l'insieme delle indagini si pone come parte integrante del progetto di restauro strutturale e al medesimo progettista dovrebbero essere affidate la redazione del piano diagnostico e la progettazione di un intervento che tenga conto, fra l'altro, delle indagini stesse (Binda *et al.*, 2001).

Una costruzione antica presenta il più delle volte un organismo strutturale costituito da materiali e tecniche costruttive disomogenee, raramente riconducibili a un unico tipo murario, per via delle modifiche subite nel corso dei secoli. Per tale ragione, risulta determinante il ruolo affidato alla comprensione storico-architettonica della fabbrica: la stessa lettura strutturale tramite lo studio del quadro fessurativo e deformativo deve saper riconoscere, assieme alle evidenze patologiche, i fenomeni fisiologici legati alle trasformazioni. Le analisi strumentali finalizzate a valutare le caratteristiche meccaniche delle murature, se condotte dopo lo studio documentario e le indagini dirette sulla fabbrica, forniscono dati quantitativi sufficientemente affidabili, anche se circoscritti alla zona esaminata (Gallo Curcio, 1992). Solo il vaglio e il confronto dei risultati strumentali con quelli dell'analisi storico-critica potrebbero consentire di estendere i dati sperimentali localmente desunti ad aree omogenee più ampie e di ragionare su come valutare le caratteristiche meccaniche da associare a tutte le murature, accettando margini cautelativi ma pur sempre aderenti alla storia dell'edificio. Nel cosiddetto Palazzo di Bonifacio VIII ad

Anagni, ad esempio, l'impossibilità di eseguire un campionamento esteso a tutte le murature, per via del loro numero e del loro valore storico e architettonico, ha imposto di ricavare valori medi, cautelativi, delle caratteristiche meccaniche delle murature a partire dai dati sperimentali puntualmente confrontati con le fasi costruttive della fabbrica (Carbonara, 1989).

Le stesse procedure d'indagine utilizzate per progettare interventi di restauro statico possono essere applicate per controllarne l'efficacia. Un protocollo di manutenzione programmata dovrebbe poi comprendere la redazione di un piano d'indagini diagnostiche in grado di prevenire interventi futuri e di monitorare il comportamento strutturale dell'edificio. Lo stesso piano può infine costituire un utile ausilio per prevedere il comportamento degli edifici in caso di sisma o di altri eventi eccezionali.

I dissesti riconducibili a cedimenti fondali o gli interventi che incrementano l'entità dei carichi sulle fondazioni richiedono di indagare sulle caratteristiche geotecniche del sottosuolo, sulla geometria e le caratteristiche meccaniche delle fondazioni. In primo luogo è opportuno, «per quanto possibile, individuare le modifiche intervenute nel tempo per cause naturali o antropiche, come ad esempio scavi, costruzioni adiacenti, variazioni nel regime delle falde, dissesti idrogeologici» (*Linee guida*, 2006, p. 33). Per definire i profili stratigrafici del terreno di fondazione si ricorre a sondaggi subverticali a carotaggio continuo associati a prelievo di “campioni indisturbati”, che consentono di descrivere dal punto di vista litologico gli strati del sottosuolo. Prove di laboratorio condotte sui campioni prelevati permettono di definire quantitativamente le caratteristiche fisiche e meccaniche dei terreni. L'identificazione degli strati e la definizione dei loro parametri meccanici sono agevolate dalla conduzione di prove penetrometriche, che integrano i risultati e riducono il numero dei sondaggi necessari. Presso la Rocca Sanvitale di Fontanellato (edificio a pianta quadrata con corte interna e quattro corpi ai lati, di origine duecentesca e profondamente trasformato nei secoli xv e xvi) sono state condotte prove *in situ* (un sondaggio e una prova penetrometrica statica) e in laboratorio (edometriche e triassiali) per la caratterizzazione meccanico-geometrica del terreno e delle fondazioni, una campagna di indagini sperimentali sulle strutture in elevazione, cui ha fatto seguito l'impiego di un sistema di monitoraggio per il controllo del quadro fessurativo riscontrato sia su muri e colonne che su volte e solai lignei. Lo studio geognostico, in particolare, ha permesso di evidenziare la buona attitudine del terreno ad assolvere la funzione portante della fabbrica, anche in presenza di acqua nel fossato che corre intorno all'intero edificio (Giani *et al.*, 2000).

Si ricorda poi che le indagini geognostiche condotte nel sottosuolo della Torre di Pisa hanno evidenziato che i materiali sono a sud mediamente più ricchi di limo e argilla e lo strato di sabbie superiori si assottiglia da nord verso sud; questa variazione degli strati litologici ha così dato origine all'inclinazione della torre (Viggiani, 2005).

Le indagini piezometriche consentono lo studio del regime idrico sotterra-

neo, delle sue variazioni stagionali e il monitoraggio degli interventi antropici, soprattutto legati a emungimenti e drenaggi.

La raccolta dei dati relativi a geometria, consistenza e quota di appoggio fondale muove innanzitutto dal reperimento delle notizie disponibili sulla configurazione originaria delle strutture fondali e su eventuali trasformazioni passate, nonché sulla possibile presenza di strati archeologici. L'ispezione diretta, in genere preceduta dal puntellamento delle strutture e spesso veicolata da un controllo archeologico, si serve di scavi eseguiti in aderenza all'edificio e può fornire indicazioni relative alla tipologia costruttiva, alle dimensioni, nonché all'eventuale presenza di cedimenti non denunciati da dissesti in elevazione.

La campagna di scavi archeologici condotta presso il complesso (ex monastero e chiesa) della Ss.ma Annunziata in Tredozio (Forlì-Cesena) ha consentito di verificare l'esistenza di ambienti sotterranei, in particolare un cospicuo numero di sepolture all'interno della chiesa, e di accertare la geometria e la consistenza delle fondazioni dei muri (Romeo, 2006).

Per strutture fondali molto profonde, a volte si ricorre a sondaggi subverticali a carotaggio continuo, associati a prelievi di "campioni indisturbati", che vengono normalmente sottoposti a test di laboratorio per definire i parametri fisici e meccanici, con modalità analoghe alle murature in elevazione.

La valutazione della qualità muraria delle strutture in elevato avviene in primo luogo (e, naturalmente, in assenza di rivestimenti) attraverso un rilievo visivo che, una volta individuati i tipi di apparecchi presenti nella fabbrica, evidenzia per ognuno di essi le dimensioni degli aggregati di base e dei giunti di malta, il tipo di posa in opera, l'efficacia degli ingranamenti fra le parti murarie (nei rari casi in cui sia possibile osservare la sezione muraria), la natura e lo stato di conservazione di malte e componenti lapidee o laterizie. Maggiore è il grado di approfondimento di queste analisi, minori e meno invasive risulteranno le tecniche diagnostiche successive, ad esempio utili per conoscere il nucleo dei muri esaminati o i parametri meccanici di deformabilità e resistenza strutturale.

Le strutture del castello di Avio (Trento) sono interessate dalla presenza di lesioni passanti (soprattutto presso le angolate), fuori piombo e deformazioni (accentuate nella facciata meridionale), nonché da crolli (un'intera torre ha ceduto nel XIX secolo); le indagini strumentali sono state progettate sulla base dei dati forniti dalla ricerca storica, dal rilievo geometrico, da un'analisi stratigrafica delle murature e da un rilievo del quadro fessurativo. L'insieme dei dati scaturiti dalla realizzazione di prove soniche, martinetti piatti, georadar, prove di laboratorio per la caratterizzazione chimica e mineralogico-petrografica, nonché dal monitoraggio statico ha aiutato a identificare le fasi costruttive e a "mappare" le lesioni e le discontinuità da costruzione o trasformazione (Binda *et al.*, 2005). Queste procedure sono state estese anche a centri storici colpiti da sismi, come ad esempio a Montesanto di Sellano e a Roccanolfi di Preci (Umbria) dopo il terremoto umbro-marchigiano del 1997 (Binda, Baronio, Palma, Penazzi, 2000; Binda *et al.*, 2001, 2004).

La valutazione dello stato tensionale della muratura può essere effettuata in cantiere tramite l'impiego di martinetti piatti singoli, mentre le caratteristiche di resistenza a rottura e deformabilità richiedono prove con martinetti piatti doppi. Entrambe le indagini comportano la realizzazione di tagli orizzontali nel muro al cui interno inserire martinetti sottili in acciaio collegati con un circuito oleodinamico per la messa in pressione del sistema (FIGG. 5.1-5.4). Queste prove consentono di avere risultati sufficientemente attendibili se applicate su murature in pietra a tessitura regolare o in mattoni con giunti di malta sottili, come nella torre campanaria del Duomo di Monza (Binda, Tiraboschi, 2000), o del cosiddetto Tempio di Romolo nel Foro romano (Blasi, Rossi, 1988). Su apparecchi con giunti di malta di notevole spessore il taglio viene collocato immediatamente al di sotto del corso di mattoni, per evitare eccessivi spostamenti superiori, come si è fatto nel S. Vitale a Ravenna e nella Chiesa Rossa a Milano, mentre nelle murature in pietra a tessitura irregolare l'esecuzione di tagli orizzontali è consentita dall'impiego di seghe a disco, utilizzate ad esempio nella cattedrale di Noto (Binda, Tiraboschi, 2000).

La determinazione della resistenza e del modulo a taglio può essere ottenuta con prove di laboratorio, che prevedono una compressione diagonale su pannelli quadrati o sollecitazioni di compressione e taglio su pannelli rettangolari di altezza maggiore rispetto alla larghezza. Queste tecniche vengono applicate nell'ambito di attività sperimentali su modelli, a volte in scala, di murature reali appositamente realizzati, per studiare le loro caratteristiche meccaniche (Molina *et al.*, 2001) o l'efficacia di possibili interventi (Rocco, Sorace, Terenzi, 1999). Solo in casi eccezionali queste procedure, molto distruttive, vengono applicate *in situ*. Un progetto di ricerca antisismica è stato promosso in Umbria, dopo il terremoto del 1997, su 15 pannelli ricavati da 7 edifici localizzati nei comuni di Foligno e Sellano (PG), per studiare l'efficacia di tecniche di rinforzo, quali le iniezioni con miscele a base di calce e l'applicazione di nastri in fibra di carbonio o di vetro. I pannelli sono stati tagliati con la tecnica del filo diamantato e isolati dalla rimanente parte della muratura (Borri, Corradi, Vignoli, 2000).

In generale, i dati desunti dalle prove tensionali (martinetti piatti, prove di compressione e taglio) sono poi impiegati nelle simulazioni numeriche, così da rendere i risultati di calcolo più aderenti alla situazione reale. Per misurare la resistenza alle sollecitazioni di taglio fra gli elementi lapidei o laterizi e i giunti di malta è possibile eseguire il cosiddetto *shove test* ("prova di taglio"), che comporta la rimozione di un elemento murario e della malta presso uno dei due giunti verticali aderenti, il posizionamento nella cavità così ottenuta di un martinetto idraulico collegato a un circuito oleodinamico e l'applicazione di sollecitazioni a taglio controllate (Giacchetti, Bufarini, D'Aria, 2005).

Per rilevare la costituzione del nucleo interno, lo stato generale di conservazione della struttura, la presenza di vuoti o cavità e di eventuali anomalie nella tessitura si può procedere eseguendo piccoli scassi in profondità, funzionali al rilievo della sezione muraria, oppure tramite l'effettuazione di carotaggi



FIGURA 5.1  
Roma, caserma Ferdinando di Savoia. Pianta del primo piano con indicazione delle prove eseguite con martinetti piatti

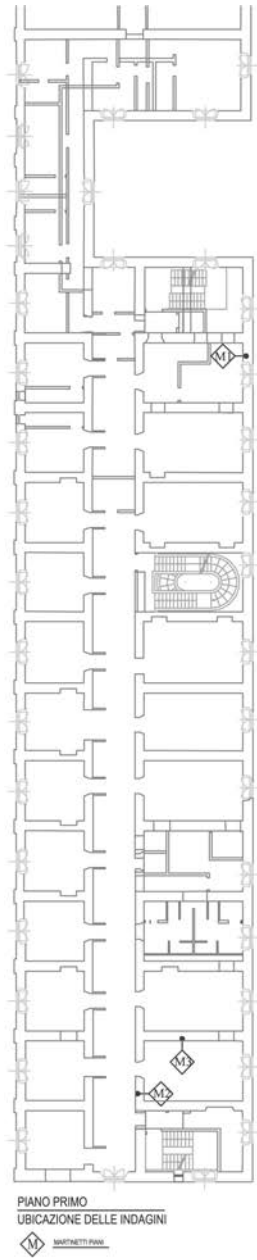


FIGURA 5.2

Roma, caserma Ferdinando di Savoia. Messa in opera di martinetti piatti singoli per la misura dello stato tensionale esistente nella muratura



Foto BCD Progetti srl – Roma.

FIGURA 5.3

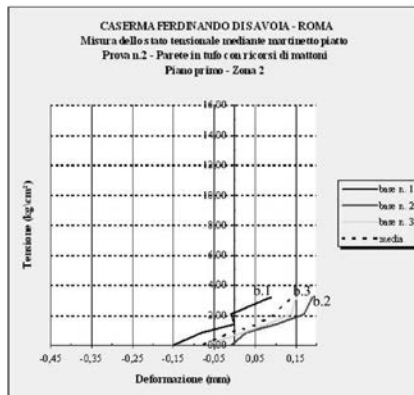
Roma, caserma Ferdinando di Savoia. Esecuzione della prova con martinetti piatti doppi per la determinazione della resistenza a compressione della muratura



Foto BCD Progetti srl – Roma.

FIGURA 5.4

Roma, caserma Ferdinando di Savoia. Diagramma riportante i risultati ottenuti dalla prova con martinetto piatto singolo



Elaborato grafico BCD Progetti srl – Roma.

finalizzati allo studio della stratigrafia delle carote prelevate o alla conduzione di esami videoendoscopici. Questi ultimi, realizzabili anche sfruttando cavità preesistenti nelle pareti, si basano sull'impiego di sonde collegate a macchine fotografiche o a telecamere in grado di visualizzare le strutture interne. Nel piano di indagini svolte tra il 1998 e il 1999 sul Ponte Nomentano sull'Aniene a Roma (edificato nel II secolo a.C., ricostruito nel 549 d.C., ampliato nei secoli XII e XV, danneggiato nella parte centrale nel 1849 e nuovamente riparato nel 1856) sono stati eseguiti diversi sondaggi endoscopici che, insieme a un congruo numero di prove di laboratorio su campioni di malta, il prelievo di microcarote e la caratterizzazione dei materiali di rivestimento (cortina laterizia, blocchi squadrati di pietra Gabina e travertino), prove sclerometriche sugli elementi lapidei e penetrometriche per la caratterizzazione delle malte, hanno consentito d'individuare i diversi materiali costituenti le strutture del ponte nelle varie fasi costruttive e d'impiegare i dati sperimentali in un modello tridimensionale su cui verificare la capacità portante e gli stati tensionale e deformativo. I rilievi endoscopici sono stati puntualmente documentati su schede tecniche e fotografiche (Ferrini, 2000).

L'analisi endoscopica condotta nel coronamento di palazzo Belimbau in piazza dell'Annunziata a Genova si è servita di 5 fori derivati dalla rimozione di reintegrazioni cementizie; essa ha consentito di comprenderne il sistema costruttivo, costituito da mensole verticali di ardesia ammorsate nel muro perimetrale, che sorreggono una doppia fila di lastre orizzontali. Questo sistema, tipico nell'architettura genovese a partire dal XVI secolo, presentava alcune specificità, come la variazione dell'interasse fra le mensole, il numero delle lastre orizzontali, la presenza o meno di elementi metallici d'ancoraggio, la presenza di mattoni "a coltello" con funzione di distanziatori fra le lastre (Musso, 2005).

Il livello di compattezza e le caratteristiche di omogeneità della muratura, influenzati dalla presenza di vuoti e dalle caratteristiche dei materiali costitutivi, possono essere valutati attraverso l'applicazione di prove soniche. Questa tecnica consente la misura del tempo di propagazione di onde elastiche longitudinali attraverso lo spessore noto di una parete; l'acquisizione di questa variabile permette poi di calcolare la velocità di transizione nel mezzo analizzato e, indirettamente, di caratterizzare materiale e struttura interni al muro. L'esperienza ha mostrato che questa procedura deve essere impiegata associata ad altri tipi d'indagine, come prove tensionali e ispezioni dirette, perché la sola determinazione della velocità sonica, non accompagnata dall'indagine viva dei tipi murari e dallo studio delle fasi costruttive, non consente di cogliere pienamente le caratteristiche del muro trattato. Nella cattedrale di S. Maria Assunta a Reggio Emilia e nel campanile di S. Zeno a Verona tale tecnica ha consentito di precisare i modelli tridimensionali agli elementi finiti realizzati per studiare la risposta sismica delle fabbriche (Casarin *et al.*, 2007). Il complesso monumentale a Toscolano Maderno (Brescia), presso il lago di Garda, è costituito dalle chiese di S. Andrea (costruita nel XII secolo su preesistenze

romane e trasformata nel corso dei secoli xv e xvi) e dell'Immacolata; entrambe le fabbriche sono state danneggiate dal terremoto che nel 2004 ha colpito la Lombardia orientale, e sono state oggetto di una campagna d'indagini rivolta alla comprensione dei tipi e delle cause dei dissesti. Le prove soniche hanno registrato sulla muratura principale di S. Andrea valori di velocità piuttosto bassi, sintomo di una scarsa compattezza interna, a fronte di valori tensionali più elevati, desunti da prove con martinetti piatti effettuate sul paramento esterno. L'ispezione diretta ha poi mostrato che l'apparecchio murario è costituito da due paramenti in blocchi di pietra squadrati separati da un nucleo inconsistente e con numerosi vuoti all'interno (Binda *et al.*, 2007). Le indagini soniche sono soprattutto utilizzate per controllare le caratteristiche della muratura trattata con iniezioni di miscele leganti: l'incremento della velocità di propagazione dell'onda elastica riscontrato confrontando i risultati prima e dopo il consolidamento indica una buona diffusione interna della miscela. Un controllo di questo tipo è stato fatto nella cattedrale di Noto, per scegliere le miscele da iniettare nelle murature (Binda, Saisi, Tiraboschi, 2000).

La prova di carico fa ormai parte della consueta procedura di collaudo dei nuovi solai o di strutture orizzontali consolidate o rinforzate per far fronte a nuove esigenze di carico; essa è anche utilizzata per verificare l'efficacia di solai in legno e di volte presenti in edifici storici. Il sistema più ricorrente di prova consiste nel posizionare serbatoi in pvc, detti "vasconi", sul piano di calpestio e nel riempirli progressivamente di acqua fino a raggiungere il carico prestabilito. Questi serbatoi sono in genere dotati di una cordicella collegata al tappo di chiusura, che consente all'operatore di scaricarli rapidamente all'insorgere di fessure durante la prova. Nelle strutture decorate all'intradosso (volte affrescate o solai lignei dipinti), per evitare eventuali infiltrazioni di acqua, si utilizzano sacchi di cemento, sabbia o altro materiale pesante. La misura delle deformazioni corrispondenti ai diversi incrementi di carico fornisce chiare indicazioni sulla resistenza offerta dalle strutture (Colombo, 2002).

I solai e le coperture di edifici storici solitamente sono realizzati in legno; la comprensione della loro puntuale costituzione e dello stato di conservazione può richiedere una mirata campagna investigativa, basata sull'osservazione diretta e sull'impiego di tecniche d'indagine strumentale realizzabili *in situ* e in laboratorio. Le analisi della copertura e del controsoffitto lignei tardo ottocenteschi del "Salone delle Feste", in villa Demidoff a Firenze (Tampone, 2002a), sono state svolte «con una metodologia visuale e strumentale» (Machioni, 2002, p. 150) comprensiva di identificazione della specie legnosa (abete bianco), misurazioni di umidità con metodo elettrico, classificazione visiva delle membrature principali, identificazione e stima dei danni di tipo meccanico e della profondità di degrado con metodi strumentali (indagini penetrometriche con il "Resistograph"), stima delle sezioni resistenti residue. In un palazzo del centro storico di Napoli è stato condotto uno studio sperimentale in laboratorio, con prove di compressione, trazione e taglio, su piccoli campioni

lignei, sani e danneggiati, estratti da travi in legno di castagno del 1700-1800 (Giubileo, Calderoni, Mazzolani, De Matteis, 2006). Ogni tipo di procedura può essere distinta sulla base delle proprietà misurate: la durezza superficiale, ad esempio, può essere misurata con il cosiddetto “metodo Turrini e Piazza” o con lo strumento “Pilodyn”, entrambi in grado di fornire valori convenzionali di calcolo delle principali proprietà meccaniche, come la valutazione della resistenza alla trapanatura o le misurazioni su “carotine”. La stima delle caratteristiche statiche dei legni può derivare da prove di tipo dinamico, basate sul principio che le proprietà dinamiche sono controllate dagli stessi meccanismi che caratterizzano il comportamento meccanico statico del materiale: esse misurano la velocità di propagazione di onde meccaniche (soniche e ultrasoniche) in direzione parallela alle fibre (Macchioni, Mannucci, 2002b).

Le travi principali dei solai lignei dei palazzi di Las Águilas e di via Viejos a Siviglia, del XVII-XVIII secolo, sono state ad esempio danneggiate da attacchi di differenti specie di xilofagi; esse sono state analizzate *in situ* attraverso l'applicazione di prove ultrasoniche (300 test) e di prove statiche a flessione. Sono state poi studiate opportune correlazioni fra le misure di velocità sonica e la diminuzione di densità rilevata sulle parti danneggiate. Sono state infine proposte, sulla base dei risultati sperimentali, diverse soluzioni di consolidamento, calibrate sulla capacità portante e sullo stato di conservazione del legno (Linán, Hita, Cózar, 2001).

Le tecniche di monitoraggio strutturale, basate sulla misura delle deformazioni murarie nel tempo, vengono applicate quando una struttura antica appare interessata da quadri fessurativi importanti, di cui è opportuno verificare l'eventuale progressione. Questo controllo avviene attraverso l'applicazione di sensori (come fessurimetri, inclinometri, misuratori di umidità, termometri, livellometri, sismometri e accelerometri) su punti opportunamente individuati e collegati, tramite un sistema di cavi, a una centralina di acquisizione dati posta all'interno dell'edificio. Sul Duomo di Pavia, dal 1989, anno in cui crollò la Torre civica, è stato installato un «minuzioso monitoraggio in linea» (Macchi, 1993, p. 88), in attesa di elaborare i rilievi e le indagini diagnostiche su cui progettare l'eventuale consolidamento; la basilica di S. Carlo al Corso a Roma, interessata da numerose lesioni distribuite lungo le murature della cupola, del tamburo e sulla sommità degli archi di sostegno del tamburo stesso, nel 1992 è stata sottoposta al restauro degli affreschi e al controllo statico. Il monitoraggio ha utilizzato deformometri, per descrivere la deformazione delle lesioni, estensimetri, per misurare allungamenti e allargamenti fessurativi, e pendoli dritti, per controllare le inclinazioni; una livellazione geometrica di precisione ha infine consentito la misura degli spostamenti verticali delle fondazioni. Dopo un anno, tale monitoraggio ha assicurato una buona stabilità della fabbrica (Giussani, Vassena, 1993). Il monitoraggio perde di significato se effettuato per meno di 12 mesi, in quanto l'interpretazione dei dati non è in grado in questo modo di escludere l'influenza dei “fisiologici” spostamenti ciclici stagionali.

L'applicazione di prove dinamiche *in situ* presenta come fine principale il controllo della risposta strutturale alle vibrazioni ambientali (dovute ad azioni sismiche o al vento) o indotte. Queste ultime possono essere prodotte da sistemi di martellamento locale o da "vibroline", misurabili con una rete di accelerometri installati in parti significative della struttura (Binda *et al.*, 2001). Sul timpano superiore della facciata della basilica di S. Marco, ad esempio, nel periodo febbraio-luglio 1990, è stata eseguita una campagna di misure di vibrazioni ambientali attraverso un sistema di monitoraggio computerizzato in grado di registrare tutti gli eventi che superavano le soglie prefissate (Bonarrigo, 1993). Un'applicazione di test dinamici, indotti da un martello strumentato, ha riguardato le colonne del chiostro della cattedrale di Girona in Spagna (XI-XII secolo): l'installazione di accelerometri a circa metà altezza di ogni colonna ha consentito di eseguire 48 prove (2 per colonna), riprodotte poi in laboratorio su modelli. Si è cercato in tal modo di stimare la portanza delle strutture lapidee attraverso "l'identificazione dinamica", misurando le frequenze naturali in relazione al carico verticale (Llorens, Mata, Araiza, Roca, 2001).

Il quadro delle tecniche di indagine brevemente illustrato per componente strutturale e per tipo di controllo (terreno e fondazioni, strutture in elevato, orizzontamenti, monitoraggi statici e dinamici) appare spesso sistematizzato sulla base di criteri diversi, come il livello di perturbazione introdotto o la distinzione fra metodiche che indagano le condizioni strutturali in atto e sistemi investigativi idonei al confronto fra situazione precedente e successiva all'intervento (Binda *et al.*, 2001; Mariani, 2006b, 2006c). Al di là delle classificazioni, come già detto, un piano di indagini strutturali non può prescindere da un percorso preliminare di conoscenza della fabbrica, onde evitare un impiego eccessivo e casuale delle strumentazioni. Nell'utilizzare una tecnica occorre stimare, almeno qualitativamente, la natura dei risultati attesi e, ammessa l'attendibilità dei dati strumentali, occorrerebbe sempre garantire una documentazione efficace e accessibile ad approfondimenti futuri.

### 5.1.2. Lettura complessiva dell'organismo edilizio

Lo studio del comportamento strutturale è finalizzato a conoscere le capacità portanti della fabbrica storica nei confronti dei carichi gravitazionali e delle sollecitazioni orizzontali, di natura statica o derivanti da sismi, e dà luogo a valutazioni di natura qualitativa e quantitativa. La "lettura strutturale" (Gallo Curcio, 2007) delle fabbriche nasce dal rilievo, in pianta e negli alzati, del quadro fessurativo, di quello deformativo e degli interventi pregressi riconosciuti o desunti dalle fonti scritte; in tal modo, si descrivono gli eventuali stati di danno osservati e i plausibili schemi di meccanismo cinematico che possono interessare l'organismo nella sua globalità. L'identificazione delle lesioni e degli spostamenti consente di comprendere le forme di dissesto strutturale e,

con esse, le sue possibili cause, orientando così la scelta e la collocazione delle successive indagini strumentali (FIGG. 5.5-5.7; Alva, 1983; Mezzadri, 1983).

Il rilievo strutturale di un edificio nasce dall'osservazione diretta della fabbrica e da una prima, sintetica, indicazione delle componenti strutturali, della loro effettiva capacità portante, della presenza di finiture originali o di pregio, di precedenti interventi consolidativi (come cordoli in cemento armato, solette di calcestruzzo su solai e volte, iniezioni, catene metalliche ecc.) e, infine, dello stato dei dissesti. A questa prima indagine conoscitiva fa seguito il rilievo delle discontinuità costruttive (derivanti ad esempio da cantonali inglobati nei muri, scarsa ammorsatura fra apparecchi murari, sopraelevazioni, tamponature o aperture di vani – soprattutto se non allineati verticalmente –, canne fumarie), che possono introdurre “vulnerabilità specifiche” nel comportamento della costruzione (Marino, 2007), delle patologie di degrado (come marcescenza delle travi lignee, dilavamento dei giunti murari, disgregazione delle componenti lapidee ecc.) e delle condizioni degli elementi protettivi, come manti di copertura e sistemi di smaltimento delle acque.

La descrizione dei dissesti strutturali (lesioni, fratture, lacune negli apparecchi murari, sfilamento delle travi dalle sedi di appoggio, rottura di elementi portanti lignei o metallici, crolli ecc.) e, insieme, degli stati deformativi (perdita di verticalità, deformazione delle strutture ad arco, sconnessione fra gli elementi portanti di capriate, traslazioni di masse murarie ecc.), accompagnata da un'opportuna documentazione fotografica, deve essere elaborata graficamente per consentire una visione sinottica dei dati (Jurina, 1989; Doglioni, Mazzotti, 2007). I cinematismi in atto o dovuti a eventi eccezionali, come i sismi, possono infine essere descritti tramite schemi semplificati e sintetiche descrizioni. In definitiva, il rilievo strutturale diventa la base per la stesura del progetto diagnostico e per l'individuazione preliminare degli interventi necessari a garantire la sicurezza e, nel contempo, la conservazione degli edifici storici (Giuffrè, 1993).

La basilica di S. Gaudenzo a Novara, costituita da un impianto su cui s'innesta la cupola ottocentesca di Alessandro Antonelli, è stata oggetto di un complesso monitoraggio strutturale, opportunamente definito dopo aver approfondito la ricerca storica, la conoscenza geometrica e materica delle strutture, un accurato rilievo del quadro fessurativo. Durante la fase di rilievo delle fessure, in particolare, sono state messe in luce lesioni subverticali nelle pareti della cupola, testimonianza dello sprofondamento dei pilastri di sostegno rispetto alle altre murature della basilica, aperture «orizzontali ai piedi di fulcri più esterni del primo tamburo della cupola» (Zonca, Germanino, 2000, p. 85), fessure subverticali in corrispondenza di piattabande ai vari livelli, già documentate in epoca ottocentesca, e recenti lesioni apparse nella muratura e nei fulcri della “gran tazza” (lo sviluppo interno della cupola è raggiunto grazie alla sovrapposizione di una serie di tazze cupoliformi, di dimensioni più piccole salendo in altezza). Il Duomo di Parma è stato recentemente oggetto di uno studio congiunto di natura storico-artistica e tecnico-costruttiva e di una

FIGURA 5.5  
Bugnara (Sulmona, L'Aquila), chiesa di S. Nicola. Fasi costruttive

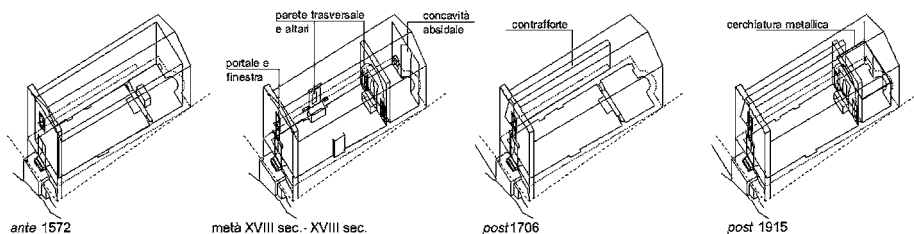
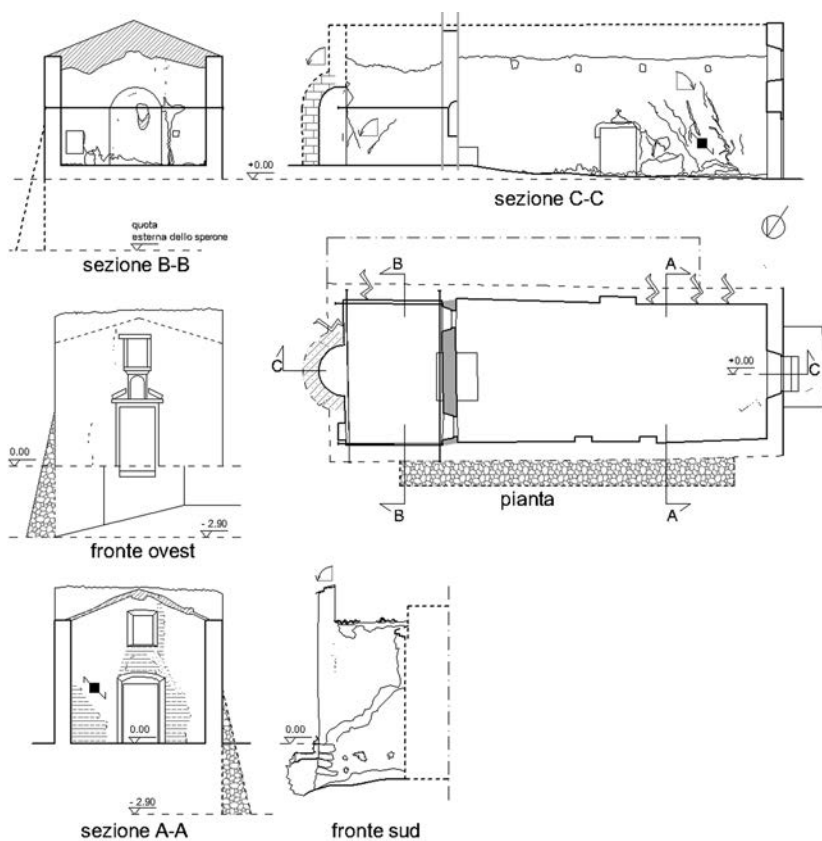



























FIGURA 5.6  
Bugnara (Sulmona, L'Aquila), chiesa di S. Nicola. Lettura strutturale



Si osservano lesioni inclinate e un conseguente distacco di una porzione muraria, dovuti ad azioni sismiche complanari. Presso l'architrave del portale d'ingresso si nota la formazione di un "arco di scarico" per effetto di un sovraccarico. La concavità absidale e la facciata tendono a ribaltare verso l'esterno, come evidenziato dai profondi distacchi dalle pareti d'ambito.



FIGURA 5.7  
Legende per la lettura strutturale

LEGENDA QUADRO FESSURATIVO	LEGENDA QUADRO SPOSTAMENTI	LEGENDA INTERVENTI EFFETTUATI
 LESIONE PROFONDA	 ROTAZIONE NEL PIANO - attorno all'asse ortogonale al piano considerato	 TRASFORMAZIONI PLANIMETRICHE (aggiunta di corpo)
 LESIONE SUPERFICIALE	 ROTAZIONE FUORI PIANO - attorno all'asse orizzontale	 TRASFORMAZIONI IN ELEVATO (es.: facciata e/o abside realizzati in fase successiva al nucleo originario)
 LESIONE RISARCITA	 ROTAZIONE attorno all'asse verticale	 SOPRAELEVAZIONI
 SPANCIAMENTO	 ROTAZIONE ANGOLARE FUORI PIANO secondo direzione non coincidente con gli assi principali	 AMPLIAMENTI DELLA MURATURA
 FUORIPOMBO	 SCHIACCIAMENTO	 CONTRAFFORTI
 TESSITURA MURARIA ALLENTATA	 TRASLAZIONE	 CATENE E TIRANTI METALLICI
 ESPULSIONE DI MATERIALE	 CEDIMENTO DEL TERRENO	 CORDOLI
 RIGONFIAMENTI	 PUNTO O LINEA DI CERNIERA	
 CROLLO	 PREVALENTE MECCANISMO DI ROTTURA NEL PIANO DEL PANNELLO MURARIO	

mirata diagnostica; esso ha evidenziato la presenza di cedimenti differenziati dei piloni che sostengono la cupola derivanti da variazioni della falda (Blasi, Coisson, 2006).

### 5.1.3. Indagini di approfondimento per la diagnostica strutturale

#### *Indagini sui terreni e sulle fondazioni*

La comprensione delle caratteristiche geotecniche di un terreno si avvale, in primo luogo, dello studio degli aspetti geologici generali propri dell'area analizzata, attraverso il reperimento di informazioni bibliografiche e cartografiche esistenti, nonché dei dati sperimentali già acquisiti, relativi all'assetto geologico-stratigrafico più vicino possibile all'edificio indagato.

Le carte geologiche, in genere, evidenziano i principali strati litologici presenti nel territorio indagato ed evidenziano (anche con eventuali allegati) la presenza di depositi vulcanici e alluvionali, lo spessore dei terreni di riporto, i dissesti e i vuoti individuati. A questi dati vanno aggiunte le informazioni relative alla morfologia del sito (in pianura o su pendio), alle possibili alterazioni dovute a cause naturali o antropiche, alla presenza di complessi idrogeologici.

Solo il completamento di questa ricerca preliminare consente di ragionare

sull'eventuale necessità di condurre indagini dirette e di scegliere le prove più adatte per riconoscere i tipi litologici e le relative caratteristiche meccaniche.

Alle prove geotecniche vengono solitamente abbinare, soprattutto in mancanza di dati specifici derivanti dalle ricerche bibliografiche e archivistiche, le indagini sulle fondazioni, eseguibili mediante la realizzazione di scavi e rilievi diretti, con sondaggi geotecnici subverticali (in grado di determinare il piano di posa e la profondità delle strutture) e con carotaggi (necessari per prelevare campioni da esaminare in laboratorio).

Nel giugno del 2005 l'Accademia di Francia (Ministère de la Culture – Ambassade de France en Italie) ha promosso una campagna di indagini geognostiche presso villa Medici a Roma, all'interno di un progetto più ampio di restauro dell'edificio. Il piano diagnostico (eseguito dalla società SPC srl di Roma) voleva accertare la consistenza e l'andamento delle fondazioni del locale che ospitava la centrale elettrica e determinare la natura litologica del terreno, prevedendo per questo la realizzazione di due sondaggi a carotaggio continuo (uno dei quali inclinato) e di tre carotaggi in fondazione (due dei quali inclinati). Sui campioni litologici prelevati (FIG. 5.8) sono state quindi eseguite in laboratorio quattro prove di compressione a espansione laterale libera (per ricavare il valore della resistenza al taglio non drenata "Cu"), due prove di taglio diretto (per ricavare i valori dell'angolo di attrito " $\phi$ " e della coesione "C"), la caratterizzazione fisica con l'ausilio dell'analisi granulometrica (per la misura del peso specifico nelle fasi naturale, saturo, secco, dell'indice dei vuoti, del grado di saturazione e dei limiti di consistenza) e la prova edometrica (per valutare l'andamento nel tempo dei cedimenti in fondazione; Rocchi, 2001).

Dalla cartografia geologica del centro storico di Roma (Ventriglia, 2002) si è visto che l'edificio è collocato al limite di un settore ricoperto dai depositi vulcanici ascrivibili alla formazione delle "piroclastiti di ricaduta". La carta dei depositi vulcanici indicava uno spessore dei depositi variabile da pochi decimetri (presso la facciata su piazza di Spagna) a 10 m (verso piazza di Siena), dati confermati dalle successive perforazioni. Lungo il versante che da piazza del Popolo si dirige verso piazza Barberini lo strato vulcanico copre un banco superficiale di argille e limi sabbiosi di terrazzo marino, intercettato dalle perforazioni. La sequenza stratigrafica del sito è chiusa dalle argille marine grigio-azzurre, sovraconsolidate, che costituiscono il *bedrock* di tutta l'area romana. L'edificio si trova sulla sommità di un pendio, esattamente al margine sud-occidentale del *plateau* vulcanico che occupa gran parte del settore orientale di Roma; a nord-est il sito è pianeggiante, a 60 metri s.l.m., mentre a partire da villa Medici (posizionata a circa 46 metri s.l.m.) il terreno degrada rapidamente verso piazza di Spagna (23 metri s.l.m.), a sud-ovest.

Le fonti bibliografiche, puntualmente confermate dalle indagini eseguite, indicano spessori dei terreni antropici che, seguendo l'originario profilo morfologico, aumentano gradualmente da 2-5 metri (presso i giardini di villa Medici) a 15 metri (muraglione che sostiene viale Trinità dei Monti all'altezza di

FIGURA 5.8  
Roma, villa Medici. Cassetta catalogatrice relativa al sondaggio n. 5, eseguito fino a 2 m di profondità



Foto SPC srl – Roma.

FIGURA 5.9  
Roma, villa Medici. Sonda a corona diamantata (diametro esterno 160 mm) utilizzata per carotaggi nel terreno

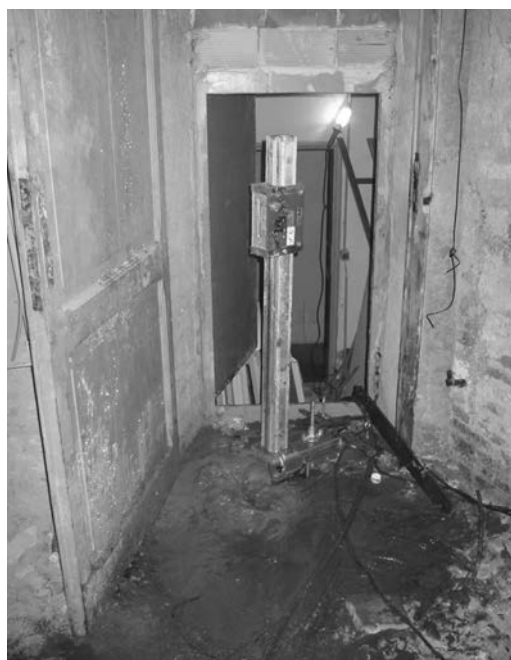


Foto SPC srl – Roma.

piazza di Spagna); esse indicano poi la presenza di una cisterna sotterranea e non fanno riferimento a eventuali dissesti. La carta idrogeologica segnala la presenza del livello idrico sottostante l'edificio a circa 25 metri s.l.m. e di due altri corsi acquiferi, rispettivamente all'interno dei materiali vulcanici (circa 35 metri s.l.m.) e nelle ghiaie di base (circa 15 metri s.l.m., in pressione). Considerata l'esautività dei dati, non sono state effettuate indagini piezometriche (a tubo aperto, per terreni a elevata permeabilità, o tipo "Casagrande", per terreni a bassa permeabilità) né prove di permeabilità (tipo "Lefranc" o "Lugeon"; Rocchi, 2001).

I sondaggi nel terreno sono stati eseguiti fino a una profondità massima di 10 m (cfr. FIG. 5.9). In alcune zone è stata effettuata la misurazione del valore della coesione non drenata unicamente per mezzo del penetrometro tascabile (*pocket penetrometer*), senza eseguire, dato il discreto quadro conoscitivo fornito dalle indagini indirette, prove penetrometriche più complesse (rivolte alla misura di un indice di resistenza del terreno) come quelle statiche o dinamiche o le cosiddette "SPT", normalmente le più frequenti (Rocchi, 2001).

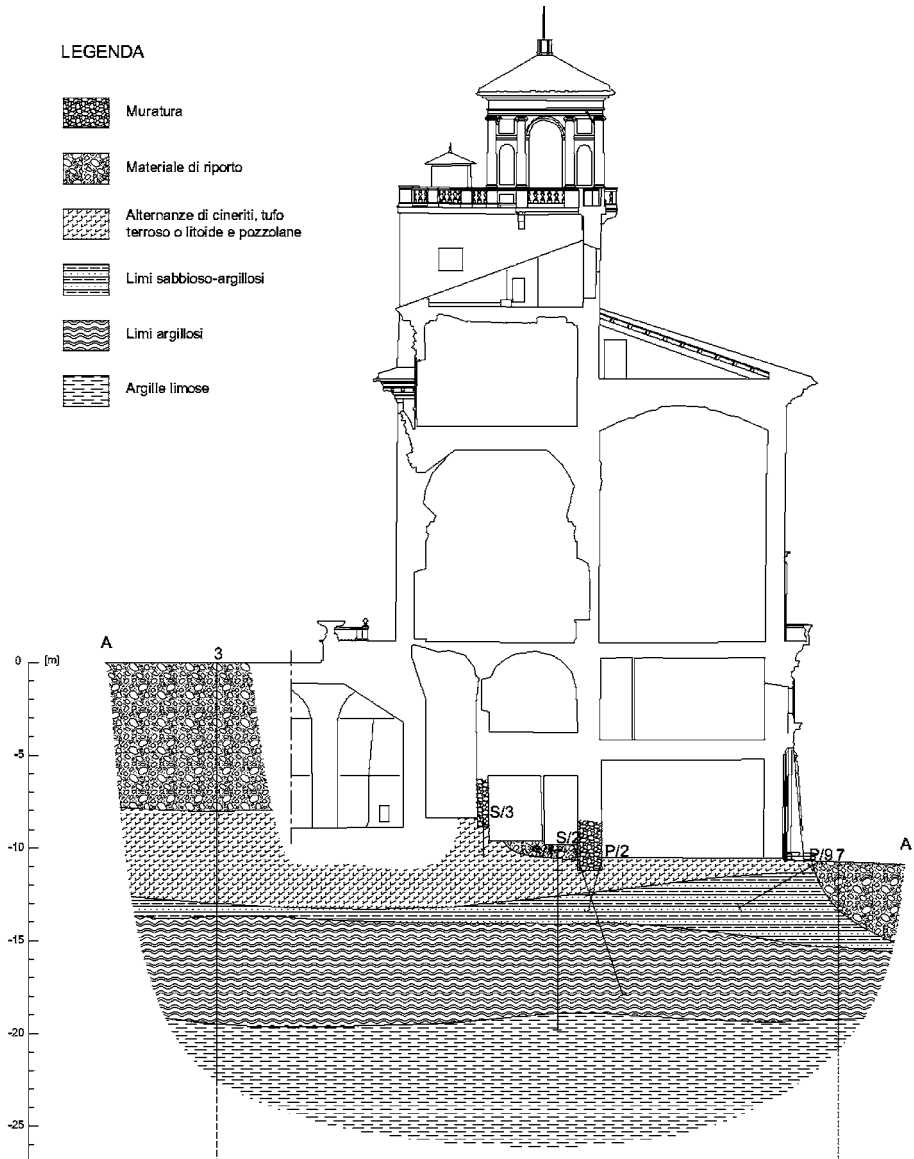
Grazie ai sondaggi è stato possibile ricostruire tre sezioni stratigrafiche che mostrano la presenza di terreni alluvionali limoso-sabbiosi-argillosi su cui poggiano depositi vulcanici (tufi terrosi a luoghi semilitoidi, pozzolane e cineriti fortemente addensate; FIG. 5.10). Le strutture di fondazione di Villa Medici sono appoggiate a quote diverse, dislivellate fino a un massimo di 2,3 metri, e ammorsate al pendio naturale. Gli spessori dei terreni di riporto presso la fabbrica sono modesti, diversamente da quanto avviene dalla parte dei giardini e lungo viale Trinità dei Monti.

Prove di laboratorio a compressione e fonti bibliografiche hanno indicato valori di resistenza dei depositi piroclastici sui quali appoggiano le fondazioni variabili da 500 kPa (nei tufi terrosi più profondi) a 1.000 kPa (nelle cineriti grigie più superficiali). Ulteriori analisi hanno evidenziato il buon livello di attrito e di coesione dei sedimenti alluvionali limoso-sabbiosi-argillosi rinvenuti al di sotto dei depositi vulcanici, caratterizzati da qualità meccaniche nel complesso discrete.

I risultati complessivi sembrano sufficienti a delineare il quadro geotecnico dell'area indagata, per cui non sono state eseguite procedure più specifiche come le prove dilatometriche, pressiometriche, finalizzate ad analizzare le deformabilità del terreno, o le prove scissometriche (*vane test*) per la determinazione della coesione.

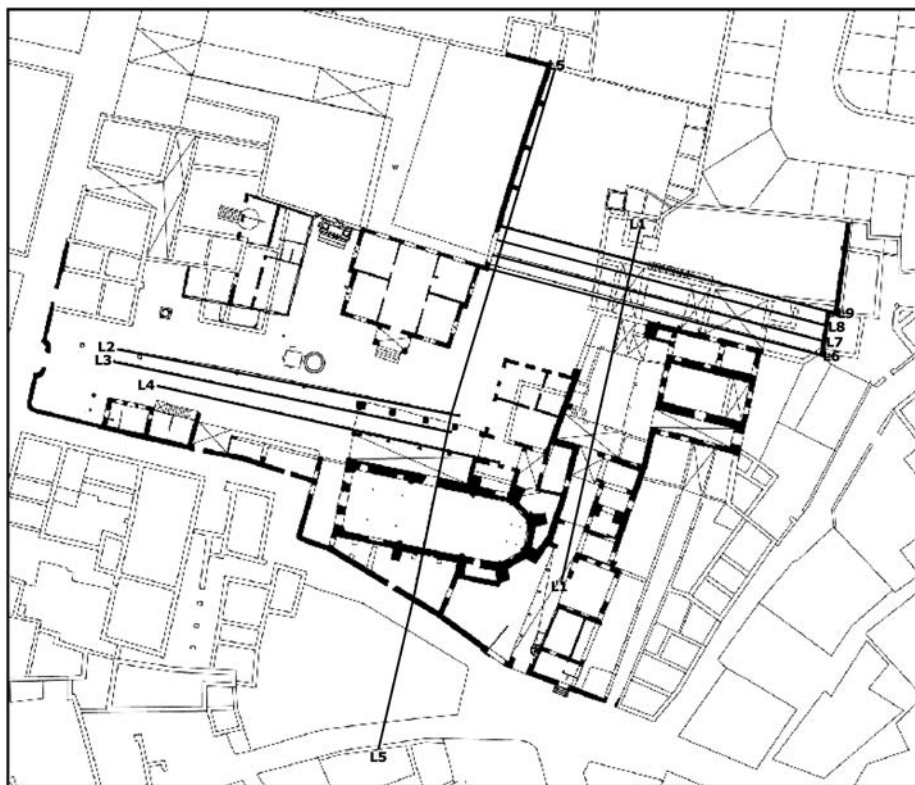
Se le tecniche d'indagine descritte non possono essere eseguite a causa di condizioni del terreno sfavorevoli o per la possibile presenza di strati archeologici, si può ricorrere alle prove soniche, in genere impiegate sugli elevati, o a indagini radar (sistema GPR). Queste ultime permettono di indagare sulla struttura e sulla composizione del sottosuolo (rilevando cavità, variazioni stratigrafiche tra litotipi, preesistenze, strati archeologici, spessore delle fondazioni) attraverso l'analisi delle riflessioni di onde elettromagnetiche trasmesse ad alta frequenza (FIGG. 5.11-5.13; Bussi, 1996).

FIGURA 5.10  
Roma, villa Medici. Sezione stratigrafica rappresentativa delle indagini geognostiche condotte



Elaborato grafico SPC srl – Roma.

FIGURA 5.11  
Nicosia (Cipro), chiesa e convento degli Armeni. Planimetria con indicazione dei tracciati delle linee geoelettriche



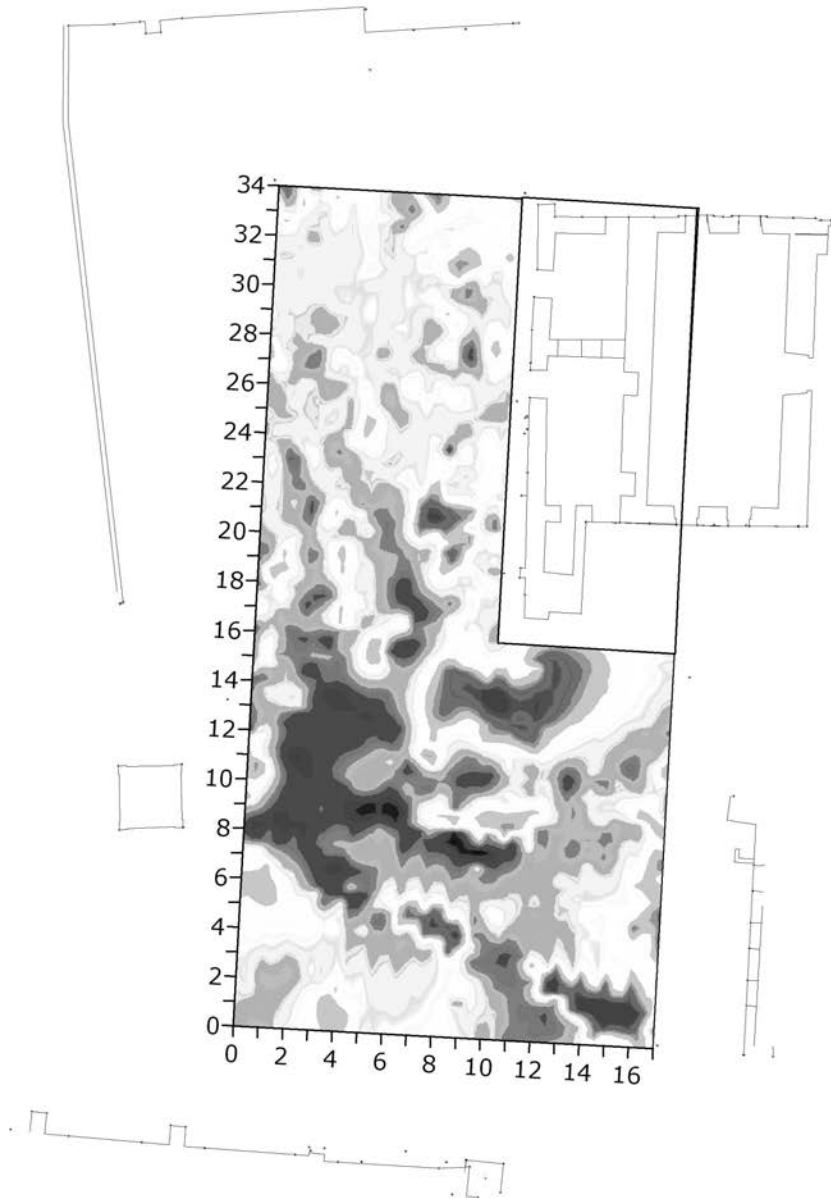
Elaborato grafico BCD srl – Roma.

*Indagini sulle strutture in elevazione:  
il caso della chiesa di S. Biagio a Montepulciano*

La chiesa di S. Biagio a Montepulciano, realizzata su progetto di Antonio da Sangallo il Vecchio tra il 1518 e il 1552, è collocata poco al di fuori delle mura urbane; essa presenta un impianto a croce greca, caratterizzato a sud da una tribuna absidale semicircolare e a nord da un'ampia facciata con due campanili a struttura indipendente inseriti tra i bracci (quello occidentale incompiuto). I paramenti esterni e interni sono in conci squadrati di travertino a ricorsi orizzontali.

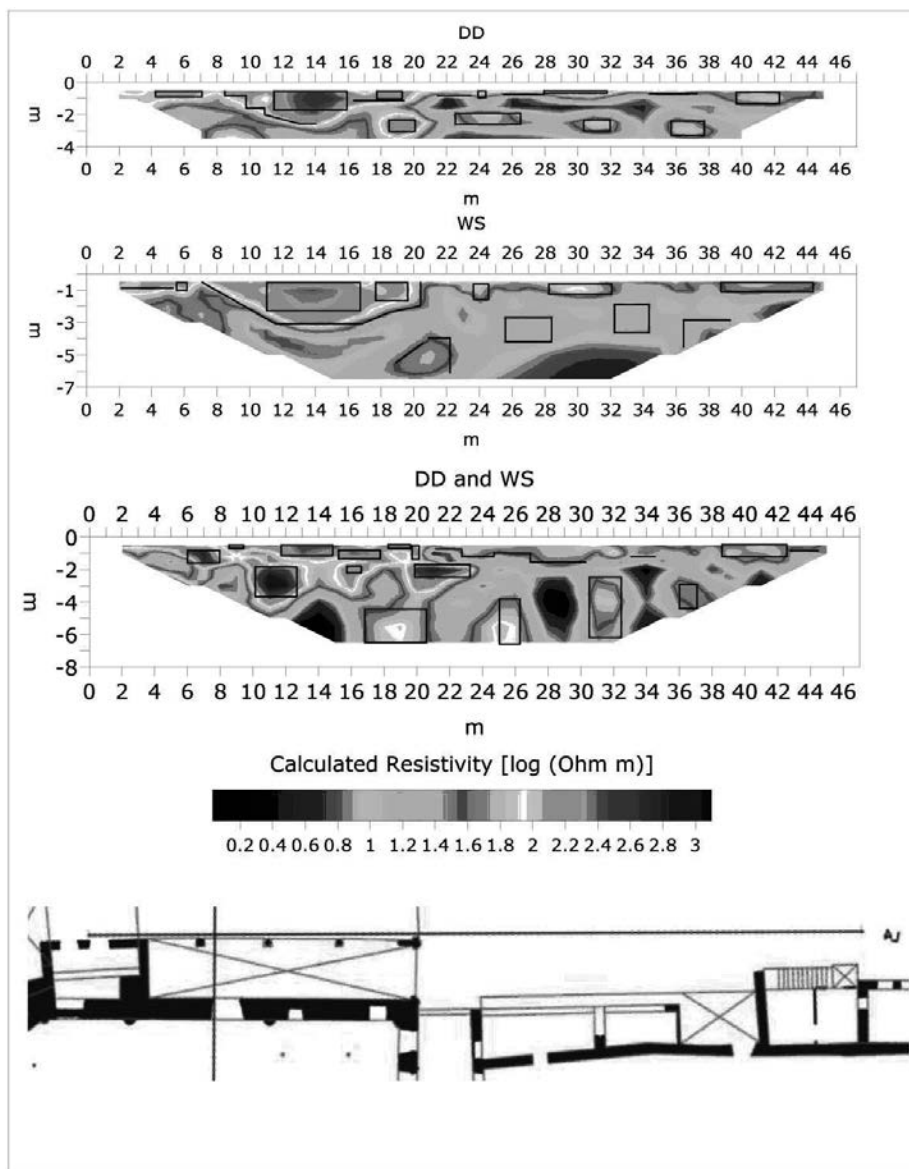
L'edificio presenta numerose lesioni ad andamento subverticale e distacchi di materiali lungo due dei pilastri interni (a sud-est e nord-ovest) che sorreggono gli archi d'imposta della cupola centrale (FIG. 5.14). La Soprintendenza

FIGURA 5.12  
Nicosia (Cipro), chiesa e convento degli Armeni. Mappa “gradiometrica” ottenuta attraverso la sovrapposizione delle linee geoelettriche lungo le due direzioni



Elaborazione BCD Progetti srl – Roma.

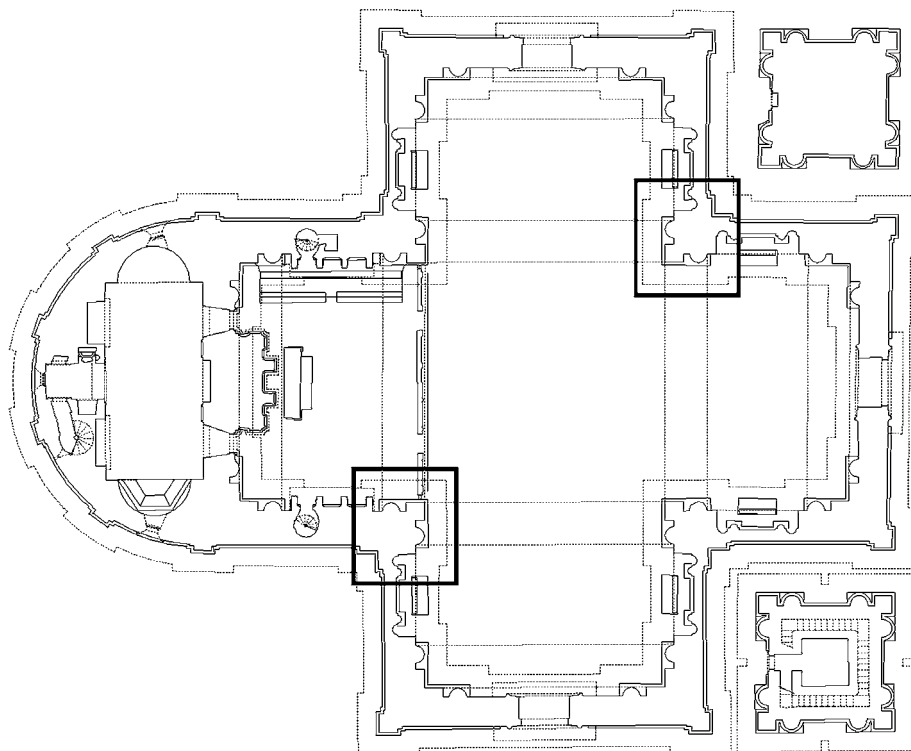
FIGURA 5.13  
Nicosia (Cipro), chiesa e convento degli Armeni. Diagramma che illustra la composizione verticale del terreno relativa alla linea geoelettrica numero 4



Elaborazione BCD Progetti srl – Roma.



FIGURA 5.14  
Montepulciano (Siena), chiesa di S. Biagio. Pianta con indicazione dei pilastri su cui sono stati condotti carotaggi, indagini videoendoscopiche e prove soniche



Elaborato grafico SPC srl – Roma.

per i Beni Architettonici e per il Paesaggio di Siena e Grosseto ha pertanto avviato, a partire dal 2005, uno studio approfondito della fabbrica, che comprende la redazione del rilievo architettonico, l'analisi delle vicende costruttive, l'elaborazione di un dettagliato quadro fessurativo e lo svolgimento di una prima analisi numerica, così da ottenere un dato di riferimento in merito allo stato tensionale dei pilastri. La realizzazione di quattro carotaggi nei pilastri fessurati ha fornito ulteriori elementi relativi alla composizione e ad alcune caratteristiche tecniche dei materiali costitutivi (Binda *et al.*, 2001), ulteriormente arricchiti da prove fisiche e da osservazioni al microscopio in luce trasmessa su sezioni sottili (NORMAL *Raccomandazioni* 10:1982, 14:1983) realizzate sui campioni ricavati dalle carote. In tal modo si sono acquisite informazioni sulla composizione mineralogico-petrografica degli impasti delle malte e dei materiali lapidei naturali. Le analisi numeriche hanno chiarito la sofferenza a compressione dello strato corticale dei pilastri in assenza di collaborazione fra

nucleo interno e paramenti: la portanza strutturale verrebbe infatti interamente affidata al travertino posizionato all'esterno, con chiari problemi d'inadeguatezza della sezione resistente ai carichi agenti.

Gli studi storici sulla fabbrica ricordano che la chiesa, costruita per onorare la Madonna di S. Biagio a seguito di un evento miracoloso riportato dalla tradizione popolare, fu sottoposta alla valutazione degli organi competenti dell'epoca (gli "Otto di Pratica") al fine di ottenere i permessi necessari per l'avvio dei lavori (Giorgi, 1999; Cozzi, 1992). Dagli atti relativi a questa istruttoria si comprende la preoccupazione di evitare che la chiesa, posizionata al di sotto della fortezza, divenisse un ricovero per eventuali nemici: la struttura doveva pertanto risultare facilmente demolibile in caso di necessità, requisito perseguibile con la costruzione di una struttura portante puntuale, limitata ai pilastri di sostegno delle volte, opportunamente tamponata con una muratura meno resistente. Già a partire dal primo decennio del Novecento sono documentati cedimenti nei pilastri interni, nell'intradosso degli arconi sovrastanti, nell'architrave del portale di ingresso; a essi si aggiungono problemi d'infiltrazione dal basso e dall'alto, dovuti all'assenza di un sistema di smaltimento delle acque meteoriche adeguato. Nel 1987 sono stati eseguiti alcuni saggi per indagare le caratteristiche del terreno, le fondazioni e il livello di falda in corrispondenza della parte umida, soprattutto presso il presbiterio. Questa campagna di indagini idrogeologiche e geologico-tecniche, come si legge sulla relazione finale, evidenzia che il tempio poggia su fondazioni a sacco molto superficiali, a soli 80 cm dal piano di campagna, larghe quanto gli elevati. Le lesioni sui pilastri sembrano però dovute a fenomeni di schiacciamento e non a cedimenti in fondazione.

Sulla base di questo quadro informativo, si è deciso di approfondire lo studio dei dissesti dei due pilastri interni tramite un monitoraggio strumentale condotto dall'aprile 2005 al maggio 2007; la realizzazione di ulteriori indagini, videoendoscopiche, soniche e di compressione a rottura sulle carote di estrazione (eseguite dalla società spc srl di Roma), hanno poi aiutato a dimensionare l'intervento di consolidamento sui pilastri; questo appariva infatti indispensabile per aumentare la resistenza a compressione e migliorare la collaborazione tra paramenti e nucleo delle strutture, così da ridistribuire il carico verticale con maggiore omogeneità, evitando le cerchiature esterne o gli interventi parziali, limitati a garantire la sola adesione del travertino distaccato. L'esecuzione di quattordici videoendoscopie lungo due lati ispezionabili dei due pilastri e su tre livelli diversi (3, 5, 7 m) ha consentito di ricostruire l'esatta geometria e la composizione muraria, nonché di evidenziare presenza di cavità o lesioni interne; queste sono state eseguite con una sonda di diametro 6 mm, lunga 5 m e inserita all'interno di fori orizzontali realizzati con una carotatrice elettrica a rotazione con punta diamantata (diametro 60-80 mm) e lunghezze variabili tra i 103 e i 156 cm. Il posizionamento dei fori è avvenuto lungo i margini dei conci, in zone che non compromettessero la percezione unitaria della superficie architettonica. Una microtelecamera dotata di un servomecca-

nismo per la rotazione sino a  $150^\circ$  e un sistema di illuminazione a fibre ottiche sono stati sistemati all'estremità della sonda in modo da ispezionare e riprendere l'interno delle cavità (FIG. 5.15). Le videoendoscopie hanno evidenziato la presenza di una tecnica costruttiva piuttosto uniforme, analoga a quella visibile presso il tratto incompiuto del pilastro angolare del campanile occidentale. Il paramento esterno, profondo dai 10 ai 25 cm, è costituito da blocchi di travertino locale abbastanza compatto e privo di grandi cavità, il nucleo presenta un conglomerato di malta di calce, laterizi rossi e bozze lapidee (calcarì e arenarie) di diverse dimensioni, con poche cavità interne.

Sei indagini soniche, quattro sui pilastri e due sulle pareti del transetto, hanno poi aiutato a stimare il livello di omogeneità del materiale, da confrontare con i risultati ottenuti dopo l'intervento di consolidamento. Le misure sono state effettuate con la cosiddetta tecnica "per trasparenza" (Binda *et al.*, 2001), posizionando un trasmettitore di tipo piezoelettrico su una parete e il ricevitore sul lato opposto (FIG. 5.16).

Sui due lati corrispondenti della zona indagata è stato costruito un reticolo quadrato ( $80 \times 80$  cm) definito da sedici punti equidistanti indicati con adesivi rimovibili; in ogni punto del reticolo è stata effettuata la misurazione, emettendo da una parte un segnale con un martello strumentato e registrandolo dall'altra con il trasmettitore corrispondente. La misura è stata campionata in tempo reale attraverso un computer portatile collegato ai sensori, predisposto per acquisire i segnali sotto forma di onde; ogni misura è stata desunta da sedici battute, che hanno fornito il tempo di emissione del segnale, e di corrispondenti sedici ricezioni, che hanno fornito la velocità di propagazione. È stato poi eseguito il trattamento dei dati attraverso il calcolo del rapporto percentuale fra la deviazione standard " $\sigma$ " e la velocità media di propagazione " $V_m$ ", elaborando un indice che esprime l'uniformità della velocità attraverso l'elemento strutturale; tale indice è stato confrontato con un valore di riferimento, compreso tra il 7 e il 10%, così da valutare il grado di uniformità della parte indagata. In generale, valori alti di  $\sigma/V_m$  indicano la possibile presenza di lesioni e sono comunque tipici di una muratura disomogenea. Le indagini condotte in S. Biagio attraverso l'intero spessore del pilastro hanno fornito un valore medio di propagazione dell'onda dell'ordine di 1.1000/s, indicativo di una muratura discretamente conservata.

L'impiego delle prove soniche a fianco dei saggi videoendoscopici ha consentito di elaborare parametri numerici utili a verificare i futuri risultati del consolidamento, mentre l'uso della termografia non avrebbe in questo caso offerto particolari indicazioni soprattutto sul nucleo, dato lo spessore significativo (in media pari a 15 cm) del rivestimento esterno (la termografia può offrire indicazioni, grazie a un buon riscaldamento della superficie architettonica, fino a 10-20 cm di profondità al massimo; Romeo, 1999).

La tecnica d'indagine radar, ad esempio il sistema GPR (Binda *et al.*, 2001), consente di ottenere informazioni sulle parti non visibili del terreno e della fabbrica in modo assolutamente non invasivo; essa è basata sulla tra-

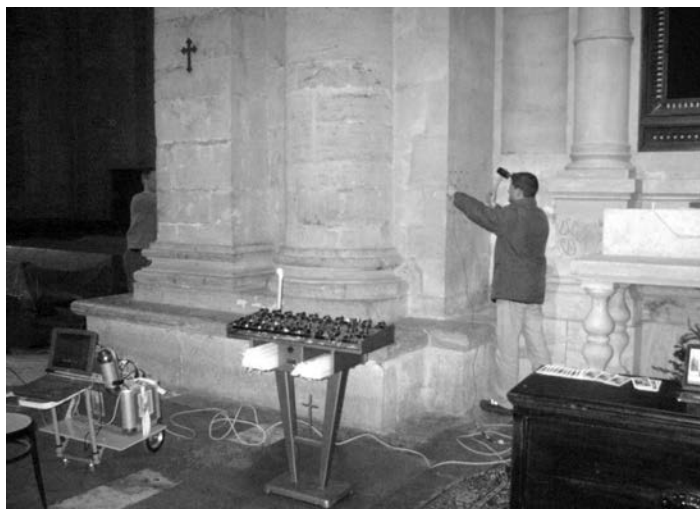
FIGURA 5.15  
Montepulciano (Siena), chiesa di S. Biagio. Esecuzione di un'indagine videoendoscopica  
(test n. 9, quota 3,47 m)



L'operatore in piedi mantiene il più possibile orizzontale la sonda d'ispezione, mentre l'altro controlla l'esatta registrazione dei videogrammi.

Foto SPC srl – Roma.

FIGURA 5.16  
Montepulciano (Siena), chiesa di S. Biagio. Esecuzione di una prova sonica “per trasparenza”



I punti di emissione e ricezione sono posizionati in due facce opposte del pilastro.

Foto SPC srl – Roma.

smissione e sulla ricezione di onde elettromagnetiche che vengono elaborate graficamente in profili paralleli, in scala di grigi o a colori, strettamente correlati alla disposizione e alla forma degli elementi nascosti. Questa procedura è particolarmente efficace per evidenziare la presenza di parti metalliche o in legno interne alla muratura, come ad esempio le barre metalliche suborizzontali, inserite all'interno di alcuni rocchi delle colonne del tempio "C" di Selinunte, rinvenute da una campagna di test GPR (48 profili lungo la direzione longitudinale delle colonne, 47 trasversali, 14 sui capitelli e 40 sull'architrave) completata nel giugno 2000 (Fabbrocino, Manfredi, Giangreco, 2001).

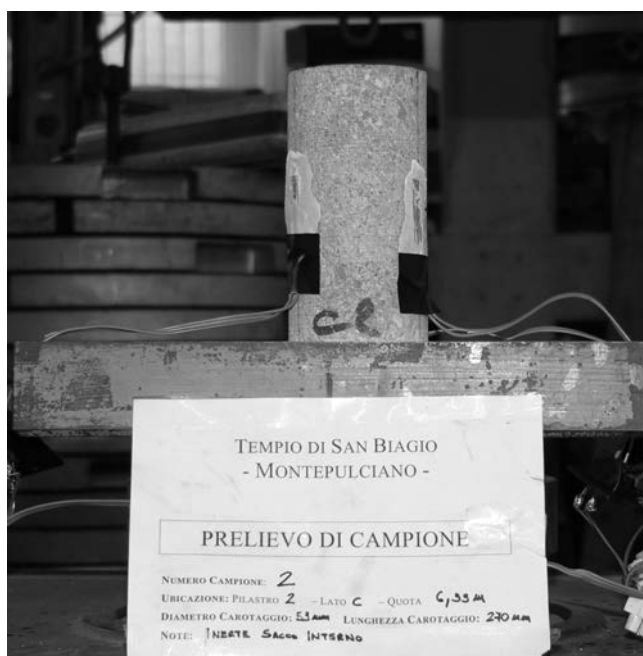
Anche l'efficacia di questa metodica dipende dalla profondità di penetrazione: l'impiego di antenne a frequenze più basse, a minore risoluzione, consente di raggiungere distanze maggiori. In genere, si possono investigare con questa tecnica murature spesse fino a 50 cm, per cui, ancora una volta, i pilastri di S. Biagio sarebbero stati indagati solo per una parte del nucleo.

Materiali, paramenti e nuclei dei pilastri sono stati infine soggetti a prove per la determinazione di peso specifico, resistenza a compressione e modulo elastico: sono state eseguite sei prove di compressione su cinque campioni cilindrici, due prelevati con le carote delle videoendoscopie dal nucleo e tre dal travertino esterno. Sono state inoltre misurate le deformazioni durante le fasi delle prove a compressione assiale, predisponendo su ogni provino tre ponti estensimetrici, disposti a 120°, direttamente incollati sulla superficie esterna (FIG. 5.17). I valori forniti da queste prove hanno evidenziato che il travertino del paramento esterno possiede un peso specifico corrispondente a quello del travertino "montemerano" (2.300 kg/mc circa), mentre la sua tensione di rottura è più bassa (compresa fra 37 e 41 N/mm<sup>2</sup>), probabilmente per la presenza di cavità interne. I valori del modulo elastico sono tutti compresi tra 40.000 e 45.000 N/mm<sup>2</sup>. Meno esaustive appaiono le informazioni ottenute sul nucleo, costituito da elementi eterogenei: i valori delle caratteristiche meccaniche ottenuti testando due provini sono risultati difforni fra loro. In particolare, i valori del modulo elastico, compresi tra 13.180 e 29.780 N/mm<sup>2</sup>, sono molto inferiori rispetto a quelli relativi al paramento esterno: si conferma così l'ipotesi che i carichi trasmessi ai pilastri migrino verso la zona più rigida, che viene così sovraccaricata.

Ragioni di fattibilità hanno sconsigliato l'opportunità di eseguire prove con martinetti piatti (Binda, Tiraboschi, 2000): il paramento dei pilastri di S. Biagio presenta giunti di malta sottilissimi, grazie alla configurazione tronco-piramidale dei conci di travertino (osservata con le videoendoscopie), e il taglio orizzontale avrebbe danneggiato la muratura; le condizioni compromesse dei paramenti, poi, avrebbe al più consentito un'unica prova, di per sé poco significativa.

La proposta finale di consolidamento ha disposto l'inserimento nei pilastri di barre in fibra aramidica (diametro 7,5 mm), in parte passanti e in parte autoancorate, disposte nelle perforazioni, pretese e rese infine solidali con

FIGURA 5.17  
Montepulciano (Siena), chiesa di S. Biagio. Prova a compressione assiale di un campione del nucleo interno



Si osservano gli estensimetri applicati sulla superficie esterna per misurare le deformazioni.

Foto SPC srl – Roma.

l'impiego di resine epossidiche. Per testare le resine e definire la lunghezza minima di ancoraggio necessaria alle barre sono state effettuate quattro prove di sfilamento a rottura su elementi di fibra aramidica con due diversi tipi di resina, una fluida e l'altra superfluida, e con due diverse lunghezze di ancoraggio, pari a 15 e a 20 cm. Le indagini sono state realizzate presso il campanile occidentale con l'impiego di un martinetto cavo di spinta collegato con due trasduttori, uno di pressione e l'altro di spostamento; il sistema era poi connesso a un computer portatile in grado di acquisire i dati in tempo reale. Le prove sono state condotte sino al limite massimo di resistenza dei materiali, verificando il tipo di rottura del sistema barra-ancoraggio-martinetto. Sono state analizzate le rotture per scorrimento della barra rispetto all'ancoraggio in resina, per scorrimento dell'ancoraggio in resina rispetto alle pareti del foro, per espulsione del cono di pietra e si è valutato lo sfilamento del sistema a cuneo utilizzato per il pretensionamento della barra. L'ancoraggio eseguito per una lunghezza di 15 cm con una miscela fluida ha offerto il risultato migliore;

la resina superfluida ha invece dato origine a un'eccessiva dispersione all'interno dei vuoti e alla conseguente fuoriuscita di materiale attraverso le fessure del paramento esterno.

La campagna investigativa di verifica dei consolidamenti condotti fra settembre e ottobre 2007 ha utilizzato procedure analoghe nelle stesse zone già indagate. Quattro nuove videoendoscopie hanno evidenziato tracce di resina utilizzata per la connessione delle barre e tre indagini soniche hanno mostrato decisi incrementi della velocità di propagazione delle onde soniche nonché la diminuzione dei coefficienti  $\sigma/V_m$ , confermando nel complesso la buona riuscita dell'intervento.

*Indagini sulle strutture di orizzontamento. La prova di carico sulla volta della Grande Aula dei Mercati di Traiano in Roma*

La diagnostica sulle strutture orizzontali preesistenti, solai o volte, viene condotta per valutarne l'efficienza e la sicurezza, mediante sistemi di carico facilmente rimovibili nel caso si formino fessurazioni durante la prova. La prova di carico è di più facile conduzione su strutture, come i solai, che consentono di valutare le deformazioni in campo elastico lineare, mentre sulle volte in muratura, caratterizzate da un comportamento fragile, essa può segnalare soprattutto le condizioni di rottura e appare per questo di più delicata applicazione (Bussi, 1996).

La Grande Aula dei Mercati di Traiano (cfr. FIG. 5.20), situata a ridosso del colle Quirinale, è costituita da un ambiente di forma rettangolare allungata coperto da una volta in concrezione ripartita in sei crociere; queste sono impostate su mensole in travertino su pilastri rivestiti in mattoni. Lungo le pareti longitudinali dell'aula sono disposti alcuni ambienti pressoché quadrati distribuiti su due livelli, delimitati in alto da archi trasversali d'imposta della volta centrale. Quest'ultima presenta un profilo intradossale a botte a tutto sesto e un intradosso piano, con uno spessore in chiave originario pari a circa 90 cm, progressivamente ridotto nel tempo con la formazione di ampie lacune, parzialmente integrate dagli ultimi restauri. La volta è realizzata in *opus caementicium*, con *caementa* di tufo e malta di calce e pozzolana, ed è rivestita in *opus testaceum* subito al di sopra delle imposte di travertino; l'estradosso è coperto da un massetto, originariamente in cocciopesto, alto circa 30 cm.

La Soprintendenza comunale ai Beni culturali, Settore restauri, di Roma ha di recente promosso significativi interventi per il consolidamento della volta sulla Grande Aula, realizzati in parte per ricostituire e uniformare la sezione resistente della volta (tramite iniezioni di miscele leganti e l'integrazione puntuale della superficie intradossale) e in parte per migliorarne il comportamento della struttura sotto sisma (con l'introduzione di catene metalliche trasversali, progettate per assorbire la spinta della volta stessa e, insieme, l'azione sismica, nonché la posa in opera di elementi resistenti in acciaio, in grado di collegare l'aula con gli ambienti laterali).

FIGURA 5.18

Roma, Grande Aula dei Mercati di Traiano. Riempimento con acqua dei “vasconi” in PVC impiegati durante la prova di carico



Foto SPC srl – Roma.

FIGURA 5.19

Roma, Grande Aula dei Mercati di Traiano. Lettura a carico massimo applicato sulla volta durante la prova



Le misure di abbassamento sono state eseguite con l'ausilio di uno strumento ottico “Livello Zeiss” con lamina pianparallela e stadia invariabile da 3,00 m e di 11 basi disposte all'estradosso.

Foto SPC srl – Roma.



La verifica finale dell'efficacia del consolidamento ha richiesto una prova di carico finalizzata a simulare il comportamento della volta sotto il carico accidentale di progetto, pari a 400 daN/mq. Tale prova è stata effettuata dalla società SPC srl di Roma nel maggio 2007.

È stata quindi scelta una zona larga quanto uno degli ambienti laterali, sottoposta a carico tramite la disposizione di due serbatoi deformabili ad acqua (grandi 6 × 3 m e 4 × 3 m e sollevabili fino a un massimo di 0,75 m; FIG. 5.18).

Il carico è stato applicato in modo graduale e crescente sino a un'altezza massima del serbatoio pari a 45 cm, misurata lungo il bordo sud e corrispondente al valore medio di 400 daN/mq. Il piano d'appoggio non era perfettamente orizzontale, in quanto i due bordi laterali di ogni gommone erano sfalsati di circa 10 cm, pertanto il carico prodotto ha assunto una distribuzione trapezoidale, con un minimo di 350 daN/mq e un massimo di 450 daN/mq. Durante la fase di carico sono state eseguite letture degli abbassamenti a intervalli regolari. Il carico massimo è stato raggiunto dopo sei ore e mezzo ed è stato mantenuto per circa 50 minuti, sino alla completa stabilizzazione delle deformazioni (FIG. 5.19). Si è proceduto quindi alla rimozione progressiva della sollecitazione effettuando soste a intervalli regolari. Dopo circa un'ora è stata completata l'operazione di scarico di tutta la struttura, mentre le letture sono proseguite per circa 30 minuti, sino alla completa stabilizzazione delle deformazioni.

L'analisi dei valori registrati ha evidenziato che le misure appaiono congruenti con lo schema di carico applicato e che l'abbassamento massimo raggiunto, pari a 0,87 mm, corrisponde a 1/12.218 della luce della volta, pari a 10,6 m. Inoltre, durante l'esecuzione della prova non sono stati rilevati fenomeni fessurativi o dissesti evidenti sulla struttura.

### *Indagini sulle strutture in legno*

Lo studio del comportamento strutturale dei legni in opera non può prescindere dalla preliminare individuazione della configurazione e del dimensionamento dell'elemento resistente, consentita dal rilievo geometrico (esteso alla forma delle sezioni, alle decorazioni, alle lavorazioni superficiali particolari, alla ferramenta di collegamento), dalla valutazione diretta della specie legnosa e dei difetti visibili (nodi, cipollature e canastri, fibature deviate, fenditure da ritiro dritte o elicoidali), dallo studio storico del manufatto (Tamponi, 1996; Aveta, Monaco, 2007). Segue il rilievo del degrado strutturale, attento all'individuazione di eventuali traslazioni (scorrimento sugli appoggi e abbassamenti), rotazioni (perdita di planarità e rotazioni rigide), deformazioni (svergolamenti, depressioni, inflessioni, contrazioni, dilatazioni, elongazioni, arcature, falciature, imbarcamenti, schiacciamenti, rifollamenti, corrugamenti), fessurazioni (a ramo unico, passanti, diffuse), rotture (fibrose, nette), nonché delle degradazioni biotiche (funghi e insetti). Tutte queste

patologie costituiscono alterazioni superficiali, ma possono spesso determinare la diminuzione delle sezioni resistenti (Tampone, 2002b). Queste informazioni devono essere raccolte in tabelle riepilogative e carte tematiche (Lauriola, Macchioni, Mannucci, 2002), con l'ausilio di segni convenzionali in grado di fornire un quadro conoscitivo sinottico e sintetico su cui ragionare per la pianificazione di eventuali indagini strumentali e di interventi di consolidamento.

La datazione dei legni può essere determinata attraverso l'analisi dendrocronologica (Tampone, 1996; Romagnoli, Nocetti, Scarlatto, 2005; Bernabei, 2005), impiegata, ad esempio, per individuare il periodo di taglio delle travi di un solaio, "a regolo per convento" di circa 100 mq, posto a coprire due vani a piano terra in un palazzo seicentesco di Ancona, in via Pizzecolli 21 (Munafò, Tassi, Zizzari, 2005). L'indagine ha esaminato gli anelli legnosi visibili sulle sezioni di carote cilindriche, in buona parte integre nonostante la durezza e gli attacchi fungini, prelevate da tre travi; due di queste sono state in tal modo datate intorno alla fine del 1200, la terza fra il 1340 e il 1400; devono pertanto essere state recuperate da fabbriche più antiche per essere utilizzate nel palazzo barocco.

Sulle stesse travi sono state indagate le proprietà resistografiche, in primo luogo misurandone l'umidità, dato che il contenuto di acqua, oltre a favorire l'attacco biocida, influenza la resistenza del materiale (Aveta, Monaco, 2007). I valori di umidità, riscontrati con un igrometro elettrico, sono risultati elevati (superiori al 18%), soprattutto in prossimità degli appoggi, e hanno in tal modo spiegato la gravità dell'attacco da parte dei funghi xilofagi, tale da dimezzare in alcuni punti la sezione dei legni.

L'impiego dell'igrometro, costituito da un misuratore di resistenza elettrica collegato a due elettrodi, a loro volta infissi nell'elemento, implica la realizzazione di forature a profondità diverse e per tale ragione non è adatto alle superfici decorate. In questi casi si utilizzano misuratori "a radiofrequenza" (del tipo "a capacità" o "a dissipazione"), che determinano indirettamente il contenuto di umidità in funzione delle capacità dielettriche del materiale. Ulteriori informazioni sull'umidità di equilibrio che un legno può raggiungere nell'ambiente in cui è posizionato possono essere ottenute dai diagrammi dell'umidità relativa e della temperatura dell'aria tracciati da termoigrometri o da sonde termoigrometriche (Aveta, Monaco, 2007).

Le caratteristiche meccaniche del legname in opera dipendono, oltre che dalla specie legnosa, dalla qualità meccanica degli elementi, in larga misura dovuta alla presenza di particolari difetti. Ad esempio i nodi, punti di raccordo dei rami con il fusto, alterano localmente il normale andamento della fibratura, pertanto la loro diffusione può compromettere l'efficienza del materiale; la deviazione eccessiva della fibratura rispetto alla direzione longitudinale, le fessure da ritiro passanti, le cipollature (separazioni tra due anelli di accrescimento contiguo o all'interno di uno stesso anello), i cretti da gelo, da vento, da fulmine, le lesioni dovute all'attacco biotico, soprattutto degli xilofa-

gi, influenzano invece la classificazione dei legni eseguita con il metodo cosiddetto “secondo Giordano”, che fornisce su due tabelle rispettivamente i criteri di classificazione a vista e le caratteristiche di resistenza sotto forma di tensioni ammissibili e di valore medio del modulo elastico. In tal modo si possono classificare empiricamente i legni con capacità portante alta, normale, bassa (Macchioni, Mannucci, 2002a; Mannucci, Togni, 2002). Le nuove regole di calcolo, basate sul metodo degli stati limite, riportate nell’Eurocodice 5, elaborano un sistema di classificazione specifico per ogni specie legnosa, oggi esistente soltanto per alcuni tipi di legno (UNI-ENV 1-2:1995).

Le indagini a vista non sempre sono sufficienti a classificare una struttura lignea, anche per l’impossibilità di osservare integralmente gli elementi, ad esempio le superfici estradossali delle travi di un solaio oppure le facce decorate, dipinte o rivestite. Per tale ragione si ricorre a tecniche strumentali, perlopiù ancora sperimentali, che misurano valori locali, rappresentativi dell’area prossima al punto di misura, o globali, riferibili all’intero elemento indagato. In assenza di decorazioni superficiali, i valori di resistenza possono essere misurati *in situ* con l’uso del cacciavite, infisso nella superficie del legno al fine di saggiare la resistenza offerta alla penetrazione (i legni degradati si lasciano penetrare più facilmente), o mediante l’estrazione di un chiodo o di una vite, inseriti nell’elemento e successivamente estratti per misurare la forza di contrasto del legno (i legni degradati oppongono meno resistenza all’estrazione). Queste procedure sono state messe a punto prevedendo la misurazione della forza di estrazione tramite celle di carico dinamometriche collegate a indicatori numerici (Aveta, Monaco, 2007). Altri metodi per la stima delle proprietà meccaniche sono basati sulla resistenza alla trapanatura (con trapani strumentati, come il “Resistograph” e il “Densitomat”, dotati di due motori elettrici che attuano il movimento rotatorio e di avanzamento, per valutare la resistenza offerta dal legno alla penetrazione di una punta larga circa 3 mm, o come il “Decay Detting Drill 200”, che registra graficamente la velocità di avanzamento della punta nel legno a pressione costante), ma manca ancora l’esatta correlazione fra i valori misurati e i parametri di resistenza consueti (Macchioni, Mannucci, 2002b; Aveta, Monaco, 2007).

Il modulo di elasticità può essere determinato misurando la durezza superficiale con prove dette “d’impronta”, solitamente in laboratorio. La UNI ISO 3350 definisce il “metodo Janka”, che utilizza una procedura simile al “metodo Brinell”; sono basati sulla misura l’uno della forza necessaria per far penetrare una sfera d’acciaio e l’altro del diametro dell’impronta della sfera sottoposta a un carico prefissato crescente. Più recentemente si è definito il cosiddetto “metodo Turrini e Piazza”, simile alle procedure applicate con strumenti tipo il “Pilodyn”, o il penetrometro “Wood Pecker”. Tutte queste prove sono molto influenzate dalle condizioni superficiali della zona lignea indagata (Macchioni, Mannucci, 2002b; Aveta, Monaco, 2007).

La maggioranza delle misure globali è di tipo dinamico e si basa in parte sulla velocità di propagazione di onde meccaniche (soniche e ultrasoniche) in direzione parallela alla fibratura, in parte su metodi vibratorii che misurano le frequenze fondamentali di vibrazione (longitudinale e trasversale, libere o indotte) degli elementi lignei, ipotizzando specifiche condizioni di vincolo a cui essi sono sottoposti (Macchioni, Mannucci, 2002b). Nel primo caso vengono impiegate apparecchiature come il martello elettronico “metrigrard” o il “sylvatest”; per entrambe le procedure è prevista la realizzazione di due forature, rispettivamente per infiggere due viti sui lati opposti della superficie indagata o per alloggiare due punte che emettono e ricevono onde (Aveta, Monaco, 2007).

Per valutare il modulo elastico di una trave si possono anche effettuare prove statiche *in situ*, così da misurare le deformazioni dell'elemento sottoposto a un carico noto; il risultato delle prove è però in parte compromesso dalle incertezze relative alle effettive condizioni di vincolo e alle condizioni della sezione resistente della trave.

Il prelievo di campioni di forma cilindrica (“carotine”), per effettuare prove di laboratorio per analisi meccaniche, fisiche e chimiche sul materiale sano e degradato, viene eseguito con speciali apparecchiature, come la cosiddetta “trivella di Pressler” (Macchioni, Mannucci, 2002b). Accompagnano spesso i prelievi e le tecniche che comportano forature nel legno le prove endoscopiche, che sfruttano i varchi aperti e utilizzano apparecchiature di precisione, costituite da lenti e prismi o strumentazioni a fibre ottiche o ancora dotate di microtelecamera (Aveta, Monaco, 2007).

La diagnostica sul legname in opera viene impiegata, nella maggior parte dei casi, con metodiche che prevedono l'associazione di più procedure, così da poter confrontare e valutare criticamente i risultati. L'esame delle capriate nella copertura ottocentesca del Teatro Sociale di Trento è stato condotto attraverso un *check up* completo che, dopo un accurato rilievo geometrico, ha comportato prove igrometriche, indagini con il Pylodin, con la macchina d'impronta, misure con il Resistograph, prove dinamiche, prove ultrasoniche con il Sylvatest, prove di flessione sui singoli elementi, nonché valutazioni numeriche verificate con i risultati della diagnostica; è stata anche effettuata una simulazione di carico ultimo su una capriata smontata e rimontata in laboratorio. Il lavoro, di carattere sperimentale, ha consentito di acquisire una conoscenza completa della struttura, nonché di mettere a punto metodiche investigative soprattutto attente alla correlazione fra riscontri diretti e analisi numerica (Brentari, Piazza, 2004).

#### *Indagini sulle componenti metalliche: verifica del tensionamento di catene*

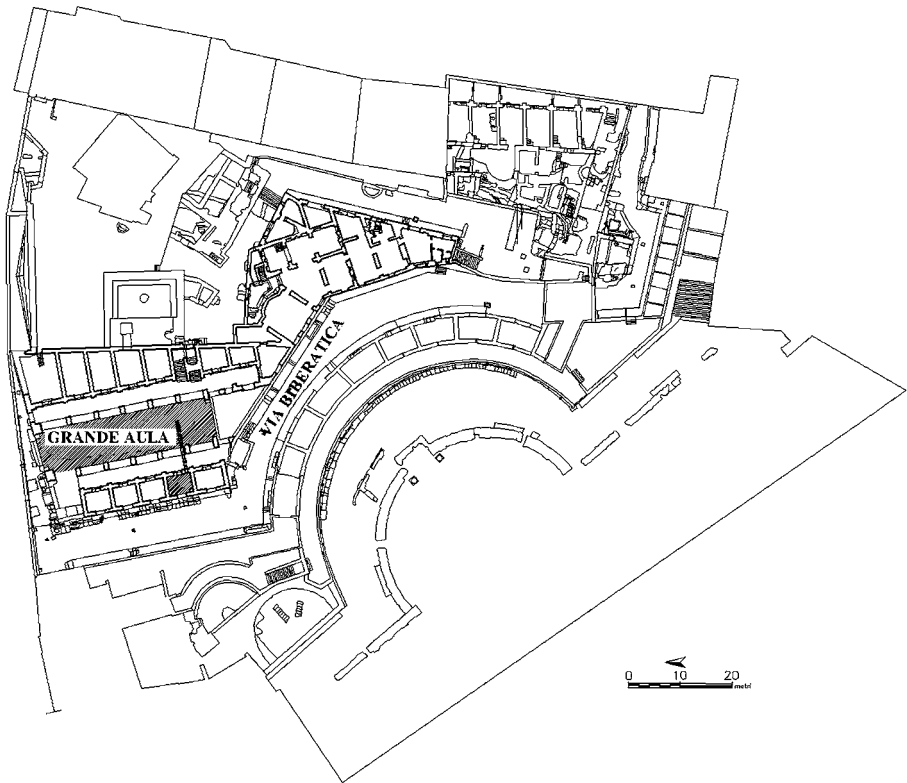
Lo stato tensionale di un tirante metallico può essere determinato con prove dinamiche quando l'elemento è in vista (ad esempio nelle catene alle reni di archi o volte). La prova viene eseguita imprimendo al tirante un impulso, soli-

tamente generato con un'apposita massa, e misurando le sollecitazioni attraverso un accelerometro monoassiale posizionato sulla mezzeria e a sua volta collegato a una centralina elettronica d'acquisizione dati (Rocchi, 2001).

I valori rappresentativi della fase vibratoria devono poi essere opportunamente elaborati e tradotti in termini di frequenze di vibrazione. Una volta individuate le frequenze proprie del tirante si risale alla determinazione dello sforzo totale che la catena impegna nei confronti delle sollecitazioni esterne. Noti lo sforzo totale e le caratteristiche geometriche, si risale alla tensione unitaria (Giuriani, Plizzari, Bassini, 1995).

Quando il tirante metallico è inserito all'interno di muri o nel terreno, come accade con le catene inserite nella parete di fondo di alcuni ambienti prospicienti la via Biberatica, presso i Mercati di Traiano a Roma, l'operazione

FIGURA 5.20  
Roma, Grande Aula dei Mercati di Traiano. Pianta al livello di via Biberatica con l'indicazione della sala e la posizione di una barra in acciaio parzialmente alloggiata nel terreno, in corrispondenza della *taberna* campita



Elaborato grafico SPC srl – Roma.

FIGURA 5.21

Roma, Mercati di Traiano. Particolare del martinetto e del flessimetro centesimale impiegati nella prova a sfilamento eseguita su una barra metallica alloggiata in una *taberna*



Foto SPC srl – Roma.

di verifica diviene più complessa. Nel corso dei recenti lavori promossi dalla Soprintendenza comunale ai Beni culturali, Settore restauri di Roma per il consolidamento e il miglioramento sismico della Grande Aula, nella parete di fondo della seconda *taberna* (FIG. 5.20) è stato inserito un tirante, costituito da una barra di acciaio FeB44k di sezione circolare piena (con un diametro di 22 mm). La catena è stata alloggiata all'interno di una perforazione lunga circa 10 m (diametro 80 mm) eseguita nel sistema muratura-terreno retrostante e ancorata con iniezioni di malta idraulica.

La misurazione (eseguita dalla società SPC srl di Roma, nell'ottobre del 2006) doveva verificare che la forza di aderenza del sistema di ancoraggio fosse in grado di sostenere un carico di trazione pari a 50 KN (5 tonnellate) ed è stata effettuata come una prova di sfilamento per trazione centrata (*pull-out test*), in cui la direzione di applicazione del carico si trova in asse con la barra metallica. L'applicazione della forza di trazione al tirante è stata realizzata con un sistema oleodinamico costituito da un martinetto cavo, un manometro, un tubo ad alta pressione e una centralina di pompaggio completa di valvola a spillo. Le misure degli spostamenti sono state eseguite mediante un flessimetro centesimale di tipo analogico, reso solidale a un punto fisso, il quale è stato posizionato con l'asse di misura nella direzione della barra in modo da rilevarne il movimento di sfilamento (FIG. 5.21).

TABELLA 5.1

Scheda riassuntiva dei valori della pressione esercitata dal sistema oleodinamico (in bar), della forza di trazione corrispondente applicata dal martinetto (in KN) e dei valori di spostamento rilevati dal flessimetro (in mm), nella prova di sfilamento eseguita su una barra metallica alloggiata in una *taberna* dei Mercati di Traiano

II ciclo		
Pressione (bar)	Forza (KN)	Spostamento (mm)
4	1,4	0,000
12	4,1	0,040
23	7,9	0,330
35	12,0	0,610
47	16,1	0,960
52	17,8	1,175
58	19,9	1,365
64	21,9	1,685
69	23,6	1,960
76	26,0	2,350
82	28,1	2,745
88	30,1	3,055
80	27,4	3,025
76	26,0	3,020
69	23,6	2,985
64	21,9	2,915
58	19,9	2,805
52	17,8	2,645
47	16,1	2,515
40	13,7	2,235
35	12,0	2,025
23	7,9	1,485
12	4,1	0,665
6	2,1	0,225
4	1,4	0,125

Elaborazione SPC srl - Roma.

La prova di aderenza è stata effettuata con tre cicli di carico distinti, caratterizzati dall'applicazione di una forza massima di trazione via via crescente. Ogni ciclo ha contemplato una prima fase, in cui il carico è stato incrementato in maniera graduale fino al raggiungimento di un valore di picco, e una seconda fase di scarico, in cui si è valutata l'entità delle deformazioni permanenti provocate (TAB. 5.1).

I primi due cicli di carico, caratterizzati da valori massimi della forza di trazione rispettivamente pari a 10 e 30 KN, hanno determinato una risposta del sistema di ancoraggio di tipo elastico e un comportamento forza-spostamento relativo non del tutto lineare, probabilmente per l'assenza di un perfetto allineamento fra il sistema per la messa in trazione e la barra metallica. Durante l'esecuzione del terzo ciclo di carico si è verificata la rottura dell'ancoraggio per sfilamento della barra in corrispondenza del raggiungimento di

una forza massima dell'ordine di 35 KN. Una successiva messa in trazione della barra ha messo in evidenza come il sistema sia caratterizzato, comunque, da un carico residuo di sfilamento pari a 20 KN.

*Calcoli e verifiche: analisi tradizionali e modelli agli elementi finiti*

Il “percorso della conoscenza” storico-architettonica di un monumento (*Linee guida*, 2006), acquisito con i metodi e gli strumenti conoscitivi in uso nel restauro, rappresenta un presupposto fondamentale sia ai fini di un'attendibile valutazione della sicurezza strutturale, sia per la scelta di criteri di intervento volti a garantirne la conservazione. Ma appare necessario un ulteriore approfondimento che, partendo dal quadro delle conoscenze storiche e architettoniche dell'edificio, sia in grado di tradurre quantitativamente il livello di sicurezza attuale, di definire conseguentemente priorità di intervento e, attraverso analisi strutturali progressivamente più affinate, di dimensionare gli eventuali presidi richiesti.

D'altra parte non si può ragionare sul funzionamento strutturale di fabbriche storiche prescindendo dalle leggi della meccanica e da analisi che quantizzino le risorse che un organismo complesso, qual è quello murario, è in grado di offrire, soprattutto sotto sisma. Viceversa, il grado di attendibilità dei modelli numerici adottati per interpretare quantitativamente il funzionamento strutturale degli edifici in muratura è tanto più aderente alla realtà quanto più approfondito risulta il livello di conoscenza raggiunto.

I controlli numerici tradizionali, basati su schemi semplici isostatici e sul comportamento dei materiali elastico-lineare, hanno lo scopo, in primo luogo, di verificare ulteriormente le ipotesi qualitative formulate sul funzionamento delle strutture. La portanza di un solaio, di un arco o di un setto in muratura viene quantificata attraverso procedure che, partendo da un'analisi dei carichi presenti sull'elemento (peso proprio, carico permanente e accidentale) e dalla conoscenza delle caratteristiche geometriche e meccaniche dei materiali costitutivi, verificano staticamente gli elementi in termini di tensioni e deformazioni attraverso l'adozione di schemi di calcolo diversi, scelti in base al tipo di struttura considerata (ad esempio: la trave appoggiata per l'orditura portante di un solaio in legno, l'arco a tre cerniere per gli archi e le volte, la capriata per le incavallature in legno o metallo). Si tratta di analisi di singoli componenti strutturali – la trave, l'arco, il muro – grazie alle quali è possibile confrontare le tensioni e le deformazioni calcolate con le grandezze caratteristiche o quelle ammissibili (a seconda del metodo di verifica adottato) dei materiali, fornite dalla normativa o ricavate da indagini e prove diagnostiche preventivamente eseguite.

Il comportamento sotto sisma di edifici storici può essere controllato quantitativamente attraverso diversi metodi (l'analisi statica equivalente, che simula l'azione sismica sotto forma di una sollecitazione statica orizzontale; l'analisi dinamica modale, utile per definire l'importanza dei singoli modi di



vibrare), a seconda del modello che si utilizza per descrivere la struttura e il suo comportamento sismico. Il recente quadro normativo in materia di rischio sismico del patrimonio culturale prende in considerazione, per la stima della sicurezza sismica di monumenti, tre livelli di valutazione – “LV<sub>1</sub>”, “LV<sub>2</sub>”, “LV<sub>3</sub>”. Questi corrispondono ad analisi progressivamente più approfondite che partono da stime semplificate, orientate a determinare semplicemente le priorità d'intervento fra monumenti vicini caratterizzati da un tipologia architettonico-costruttiva simile; metodologie più specifiche studiano poi i meccanismi locali di collasso su singole parti della costruzione (denominate “macroelementi”) per arrivare infine a un livello di maggior dettaglio, che considera la sicurezza sismica della fabbrica nel suo complesso (*Linee guida*, 2006). Il ricorso, dunque, a un modello globale agli elementi finiti non appare sempre indispensabile e, in alcuni casi, è sostituibile con analisi locali estese a tutti i sistemi strutturali dell'edificio; esso non dovrebbe comunque prescindere dai metodi semplificati, che hanno il pregio di evidenziare comportamenti particolari della fabbrica a seguito di sismi, come avviene ad esempio con lo spostamento autonomo di porzioni omogenee dal punto di vista architettonico. Il fenomeno è stato soprattutto osservato nelle chiese ad aula unica, dove facciata, abside, arco trionfale tendono ad avere sotto sisma un comportamento disgiunto dal resto della fabbrica (Doglioni, Moretti, Petrini, 1994; Lagomarsino *et al.*, 1998; Guccione, Nappi, Recchia, 1999; Cifani, Lemme, Podestà, 2005).

Il calcolo automatico permette, con la discretizzazione tramite il metodo degli elementi finiti, la risoluzione numerica del comportamento delle strutture, in campo elastico lineare o, in modo più complesso, non lineare. La descrizione numerica dell'organismo murario si avvale, solitamente, di elementi finiti tridimensionali in grado di approssimare meglio il comportamento reale delle murature, permettendo la discretizzazione di elementi strutturali di notevole spessore, non riconducibili a schemi piani. Il comportamento strutturale della basilica di S. Pietro a Roma e, in particolare, della cupola (Cerone, Croci, 2006) e della facciata (Macchi, 2001), ad esempio, è stato studiato mediante modelli matematici che hanno schematizzato la fabbrica con elementi tridimensionali di tipo *brick*, definiti geometricamente mediante sei-otto nodi, la cui matrice di rigidezza associa tre gradi di libertà per ciascun nodo, relativi alle traslazioni nelle tre direzioni di un sistema globale di riferimento cartesiano. L'elemento *brick* presenta proprietà meccaniche isotrope e tiene conto anche di spostamenti incompatibili.

La simulazione del comportamento meccanico nel campo elastico lineare richiede, per ogni sistema strutturale omogeneo definito nel modello, la determinazione dei parametri caratteristici dei materiali, ovvero: il peso di volume, il modulo elastico longitudinale e il modulo elastico tangenziale. Questi parametri vengono definiti, sulla base dello studio degli apparecchi murari osservati, facendo riferimento a valori numerici tipici reperiti in letteratura o a dati forniti da una campagna diagnostica.

Metodi di analisi più sofisticati, come ad esempio le modellazioni dinamiche in campo non lineare, consentono di analizzare in modo più realistico il livello di sicurezza degli edifici storici. Il Monastero di Jerónimo a Lisbona, resistito al terremoto del 1755 e danneggiato, invece, in una colonna della navata centrale dopo la scossa del 1756, è stato studiato con diversi modelli di analisi, via via più raffinati; esso sembra raggiungere, considerando soltanto le strutture verticali e non le volte, valori di tensioni compatibili con le caratteristiche dei materiali in opera (Lourenço, Mourão, 2001).

#### 5.1.4. Monitoraggio statico e dinamico

*Il controllo del quadro fessurativo su due pilastri del Colosseo a Roma e la verifica del consolidamento della chiesa di S. Maria de Elexondo a Zeanuri (Paesi Baschi)*

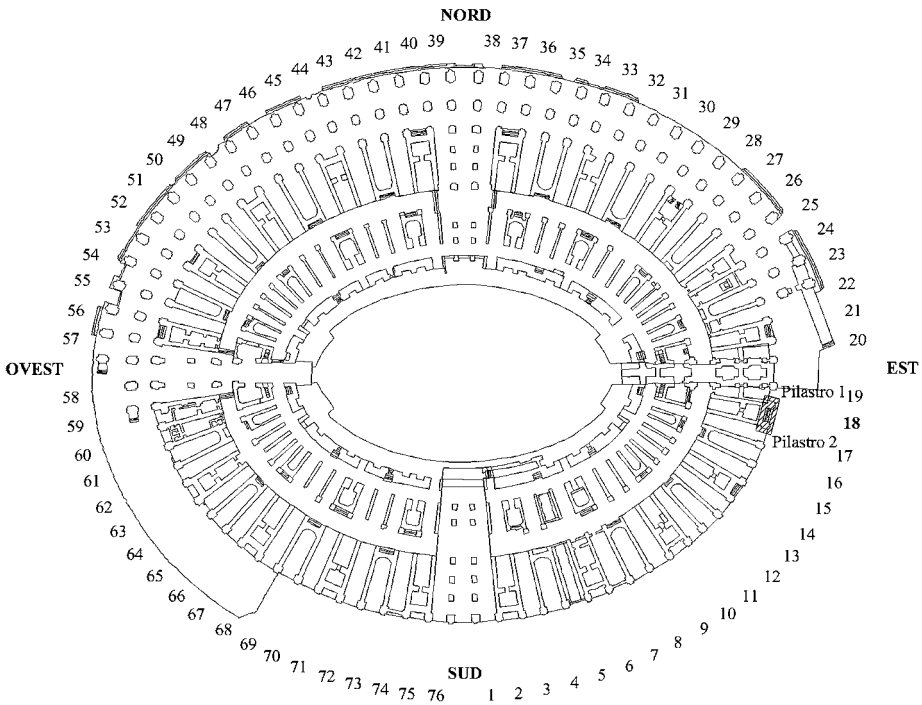
Il controllo del quadro fessurativo osservato su una costruzione in muratura, sia esso di tipo statico o dinamico, viene realizzato attraverso un sistema costituito da sensori posizionati nei punti rappresentativi della struttura monitorata e collegati a una centralina elettronica di acquisizione dati che consente, in tempo reale, di registrare le deformazioni o gli spostamenti avvenuti. L'acquisizione dei dati solitamente avviene grazie a un dispositivo elettronico che, in base alla programmazione impartita, registra i dati nella propria memoria. Il trasferimento dei dati può essere effettuato anche per via telematica, impiegando un modem collegato al sistema di rilevamento.

Un monitoraggio strutturale, insieme statico e dinamico, è tuttora installato su due pilastri in conci di travertino, posizionati presso il secondo ordine del fornice n. 18, disposto nella zona est del Colosseo (FIGG. 5.22-5.23). Questi pilastri presentano lesioni a prevalente andamento verticale distribuite lungo i blocchi lapidei, peraltro interessati da mancanze di materiale soprattutto dovute alla rimozione delle grappe metalliche effettuata nel XVII secolo.

Per controllare l'eventuale evoluzione del quadro fessurativo, la Soprintendenza archeologica di Roma ha avviato, nell'agosto del 2006, un'attività di monitoraggio (realizzata dalla società SPC s.r.l. di Roma); sono stati sinora esaminati i dati raccolti nei primi dodici mesi.

Il sistema di controllo statico è costituito da sette trasduttori di spostamento posti a cavallo delle lesioni più significative (FIG. 5.24), da un trasduttore di spostamento a filo disposto in direzione verticale sulla parete sud del pilastro n. 1 (FIG. 5.25), in modo da poter individuare possibili fenomeni di schiacciamento, e da due sensori di temperatura per il controllo dei parametri climatici (uno posizionato alla base dei pilastri monitorati, per rilevare le variazioni della temperatura esterna, l'altro in prossimità della centralina collocata negli ambienti ipogei, per le variazioni della temperatura interna; FIG. 5.26). Esso ha consentito di verificare l'evoluzione nel tempo delle lesioni e, contemporaneamente, di determinare la possibile correlazione con eventi esterni

FIGURA 5.22  
Roma, Colosseo. Pianta con indicazione dei pilastri controllati da un monitoraggio statico e dinamico



Elaborato grafico SPC srl - Roma.

(temperatura, particolari eventi metereologici ecc.). Il sistema ha registrato i dati fisici provenienti dagli strumenti, con una cadenza di quattro acquisizioni al giorno, attraverso un modem GSM a essi collegato tramite dei cavi multipolari schermati.

Il monitoraggio dinamico, realizzato con una centralina digitale predisposta per l'acquisizione dei dati (FIG. 5.27), un trasduttore triassiale di velocità d'oscillazione (velocimetro) a essa collegato e posto alla base dei pilastri, per la rilevazione delle velocità indotte nelle tre direzioni principali (FIG. 5.28), e un microfono per la misura delle onde di sovrappressione aerea ha avuto il compito di controllare la velocità di spostamento di un punto rappresentativo della struttura, volendosi controllare i possibili effetti delle vibrazioni indotte dal traffico veicolare o da eventuali sismi.

Il sistema di controllo dinamico è stato articolato in due fasi distinte: la prima, durata circa tre mesi, ha recepito le vibrazioni con continuità e registrato esclusivamente il valore di picco delle onde di sovrappressione aerea e

FIGURA 5.23  
Roma, Colosseo. Vista interna del pilastro 1 (fornice 18)



Foto SPC srl – Roma.

delle onde sismiche; essa è servita fondamentale a tarare gli strumenti di misura e ottenere così una configurazione ottimale del sistema di registrazione; la seconda è stata finalizzata all'acquisizione delle forme d'onda complete, delle vibrazioni e delle sovrappressioni aeree, quando superavano determinate soglie minime.

Le misure rilevate dai trasduttori di spostamento, confrontate con l'andamento delle temperature, che mostravano una variazione ciclica legata al natu-

FIGURA 5.24  
Roma, Colosseo. Trasduttore di spostamento posizionato a cavallo di una lesione



Foto SPC srl – Roma.

---

FIGURA 5.25  
Roma, Colosseo. Trasduttore a filo per rilevare gli spostamenti verticali



Foto SPC srl – Roma.

---

FIGURA 5.26  
Roma, Colosseo. Sensore di temperatura esterno

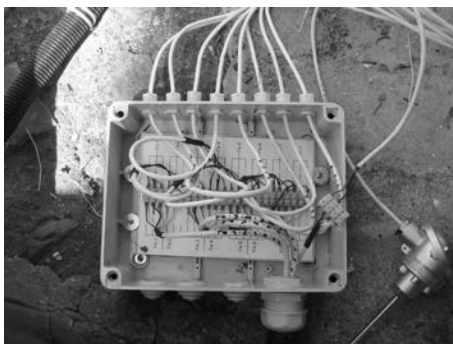


Foto SPC srl – Roma.

---

FIGURA 5.27  
Roma, Colosseo. Centralina sismica con trasduttore di sovrappressione aerea

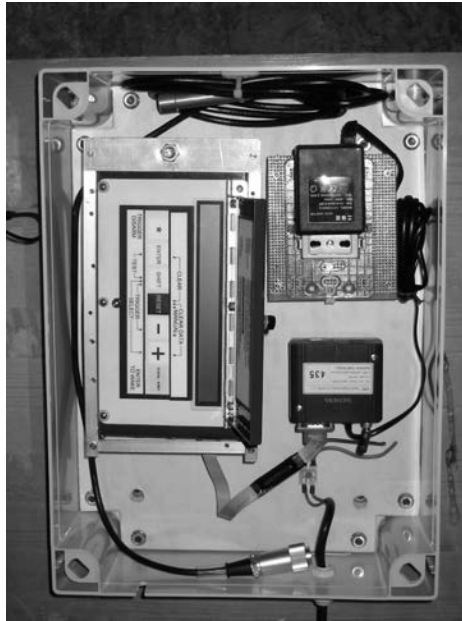


Foto spc srl – Roma.

FIGURA 5.28  
Roma, Colosseo. Velocimetro triassiale



Foto spc srl – Roma.

rale succedersi delle stagioni, hanno evidenziato la presenza di valori residui di deformazioni modeste (la maggior parte degli strumenti restituisce un andamento pseudociclico), compresi tra un minimo di  $-0,17$  mm e un massimo di  $-0,03$  mm. Le deformazioni residue misurate, inoltre, sono risultate tutte caratteristiche di lesioni che, anche se in misura decisamente esigua, tendono a chiudersi al diminuire delle temperature e non risultano così direttamente riconducibili all'azione dei fenomeni di dilatazione-contrazione termica dei materiali. In generale ci si aspetta infatti che le lesioni tendano ad aprirsi con un abbassamento di temperatura, per cui questo andamento anomalo può essere messo in relazione con movimenti di natura più complessa, come quelli dovuti alle dilatazioni termiche delle barre ottocentesche in acciaio, inserite alla base dei pilastri, o il comportamento d'insieme della parete curva del lato est del Colosseo.

L'andamento del trasduttore a filo ha rilevato oscillazioni molto limitate, caratterizzate da massime escursioni contenute tra  $-0,16$  mm e  $+0,16$  mm, che hanno determinato, alla fine del periodo di registrazione, una deformazione pressoché nulla.

Il panorama delineato dall'analisi strumentale, dunque, illustra una situazione di sostanziale stabilità del quadro fessurativo monitorato.

L'elaborazione dei dati derivanti dal monitoraggio dinamico, ovvero dei valori di picco della velocità sismica, del vettore somma delle tre direzioni e della sovrappressione aerea, analizzati dal punto di vista stagionale, giornaliero e orario, ha permesso di osservare che le vibrazioni maggiori si sono presentate mediamente dal lunedì al venerdì, all'interno di una fascia oraria compresa tra le 12:00 e le 20:00. È stata inoltre individuata una progressiva attenuazione dei picchi maggiori con l'approssimarsi dei mesi estivi. L'insieme di questi risultati ha portato a riconoscere nel traffico veicolare la principale sorgente del campo di vibrazioni: il passaggio degli automezzi, infatti, risulta concentrato nei giorni feriali, negli orari diurni e nei mesi in cui la città è maggiormente abitata.

La derivazione delle onde "sismiche" dai veicoli e la propagazione di queste al costruito avvengono in generale dalla trasmissione di quota-parte dell'energia degli automezzi alla strada e da questa ai terreni circostanti sotto forma di deformazione elastica generata dalle irregolarità del manto stradale (tombini, giunti, buche ecc.). Quando le onde raggiungono il manufatto producono su di esso vibrazioni alle quali sono associate sollecitazioni dinamiche.

L'afflusso turistico, concentrato perlopiù nelle stesse fasce orarie di sviluppo del traffico, ma con un andamento opposto nell'arco dell'anno (con picchi nella stagione estiva, quando il passaggio degli automezzi si riduce), può essere invece considerato un fattore d'importanza secondaria.

I rilievi della velocità e della sovrappressione aerea hanno presentato picchi di modesta entità e i valori massimi di velocità sismica oscillano prevalentemente intorno a una media di  $0,21$  mm/s, con la presenza sporadica di picchi che raggiungono al massimo gli  $0,86$  mm/s.

Per valutare gli effetti di tali vibrazioni sulle murature del Colosseo, sono stati confrontati i valori riscontrati con quelli ammissibili riportati nelle norme, considerando sia la tedesca “DIN 4150 parte 3”, sia la francese “SN 6940312 a” (entrambe riportate nell’*Appendice D* della UNI 9916:2004). La prima prende in considerazione la tipologia dell’edificio in esame e la *peak component particle velocity* (PCPV), ovvero il picco nel tempo della singola componente di velocità (lungo gli assi di misurazione x, y e z); la seconda riguarda vibrazioni provocate nelle costruzioni dallo scoppio di mine, dalle attività di cantiere e dal traffico su strada e ferroviario e assume come grandezza di riferimento la *peak particle velocity* (PPV), ovvero il picco nel tempo del modulo del vettore velocità.

Il monitoraggio strumentale, oltre a essere impiegato per verificare l’evoluzione di un quadro fessurativo, può essere utilizzato per testare l’efficacia di un intervento di consolidamento. Ad esempio, la chiesa cinquecentesca di S. Maria de Elexondo a Zeanuri (Paesi Baschi), costituita da un impianto a tre navate coperte da crociere e disposta in collina, su un piano inclinato, ha riportato seri danni (con lesioni verticali concentrate nelle navate laterali, perdita di verticalità dei pilastri e deformazione di archi e volte) a seguito di movimenti del terreno; quest’ultimo è stato in seguito contenuto con la costruzione di un muro parallelo alla facciata della fabbrica. Fra il 1997 e il 1998 è stato installato un monitoraggio statico per testare l’efficacia del rinforzo introdotto, attraverso la disposizione di inclinometri, in corrispondenza di ogni pilastro, estensimetri, sulle principali lesioni, sensori per rilevare variazioni di temperatura e umidità, velocimetri; tutti collegati a un computer in grado di configurare il sistema e registrare *in situ* le misure, peraltro leggibili per via telematica. I dati acquisiti dopo un anno hanno evidenziato movimenti minimi e poco significativi (Palacio, Hernández, Aldasoro, 2001).

## 5.2

### Interventi di restauro statico nella fabbrica storica

#### 5.2.1. Introduzione

Le ragioni di un restauro statico di una fabbrica antica sono spesso strettamente legate alla storia stessa dell’edificio: la complessa vicenda costruttiva, infatti, quasi sempre costituita da trasformazioni e addizioni con materiali e fattura diversi, condiziona significativamente il comportamento delle strutture. L’insorgenza di fenomeni naturali, soprattutto terremoti, può determinare dissesti di varia entità, in grado di modificare nel tempo lo schema strutturale dell’organismo architettonico; spesso l’incuria e la mancanza di manutenzione compromettono sensibilmente le residue capacità resistenti delle membrature, già sottoposte a stress.



Diversamente, l'esigenza di un consolidamento può derivare dalla necessità di aumentare il livello di sicurezza della costruzione, come accade con alcune rifunzionalizzazioni che, a volte, richiedono capacità strutturali non previste in origine.

In ogni caso, un intervento sulle membrature portanti introduce sempre un mutamento irreversibile del comportamento statico e dinamico della struttura; tale mutamento, se non sufficientemente verificato, può condurre a danni maggiori di quelli a cui la medesima struttura sarebbe andata incontro senza subire modifiche. Ogni scelta d'intervento deve quindi fondarsi su un'approfondita indagine della fabbrica mirata alla lettura e all'interpretazione della logica statica dell'edificio, alla comprensione delle cause di dissesto e all'individuazione dei cinematismi potenzialmente attivabili dalle sollecitazioni attese. Come già accennato, particolarmente utile è la conoscenza delle fasi costruttive, che evidenzia le disomogeneità della fabbrica (negli apparecchi murari, nelle caratteristiche meccaniche delle strutture, in ammorsamenti e connessioni, nella modifica delle sollecitazioni nel tempo), le quali concorrono a definire il comportamento strutturale d'insieme. La lettura del quadro fessurativo rivela, nelle sconessioni prodotte negli elementi resistenti, le debolezze del sistema statico, ma anche i meccanismi di resistenza, ovvero le risorse che la fabbrica mette in campo per resistere alle azioni cui è soggetta. Questi semplici ma validi strumenti si affiancano alla verifica numerica, più o meno complessa, dello stato tensionale delle strutture ed, eventualmente, alla realizzazione di saggi d'indagine.

Lo scopo prioritario del restauro statico è la rimozione delle cause all'origine dei dissesti tramite la definizione dei presidi utili a impedire l'attivazione dei cinematismi esistenti. Una buona consapevolezza del comportamento e delle problematiche strutturali consente al progettista di raggiungere questo scopo con un intervento il meno invasivo possibile, nel rispetto della logica statica dell'organismo architettonico, anche attraverso la riabilitazione, quando possibile, dei sistemi resistenti già presenti ma compromessi nel tempo da eventi traumatici o resi inefficienti dal degrado. In alcuni casi, però, la conservazione della fabbrica necessita di interventi più invasivi, quali l'inserimento di elementi eterogenei e l'alterazione del sistema statico originario: anche in questo caso, una solida preparazione del progettista costituisce la migliore garanzia di evitare compromissioni serie della qualità finale dell'intervento e dell'efficacia strutturale dell'opera.

Dall'inizio del Novecento sono stati introdotti nel consolidamento delle costruzioni storiche materiali che non appartengono alla tradizione costruttiva storica, caratterizzati da resistenze decisamente più alte (TAB. 5.2).

L'impiego del cemento armato, in particolare, ha registrato una crescente diffusione a partire dagli anni sessanta e settanta; tuttavia il "collaudo" nel tempo degli edifici così restaurati ha mostrato come alcune tecniche di consolidamento si siano rivelate dannose. L'applicazione di strati in calcestruzzo

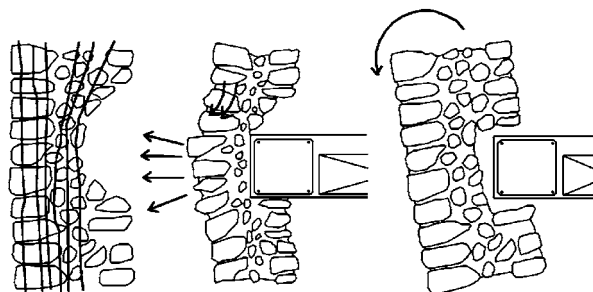
TABELLA 5.2

Confronto fra le caratteristiche meccaniche dell'acciaio e di alcuni materiali compositi

Materiale	Modulo elasticità	Resistenza max a trazione
acciaio	210 GPa	540 MPa
fibra di carbonio	200-600 GPa	2.000-3.000 MPa
fibra di aramide	140 GPa	3.600 MPa
fibra di vetro	70-85 GPa	3.000-4.500 MPa

collaboranti con le strutture originarie, eseguiti per incrementarne significativamente la resistenza, soprattutto a trazione, ha spesso favorito, invece, la trasformazione dei meccanismi locali di collasso in meccanismi globali, coinvolgendo porzioni più ampie della fabbrica. Gli interventi di restauro statico, infatti, anche se limitati a una parte di edificio, non possono prescindere da un'indagine estesa a tutto l'organismo murario, che verifichi se le membrature possiedono margini di resistenza adeguati a supportare gli aggravi tensionali generati dal maggior peso delle strutture consolidate o dalla redistribuzione degli sforzi. Il terremoto che nel 1997 ha colpito l'Umbria e le Marche ha mostrato le gravi conseguenze provocate da interventi errati di restauro, perlopiù risalenti alla riparazione dei danni dovuti al terremoto della Valnerina, del 1979; questa si basò sull'impiego consistente di cemento armato, seguendo logiche derivanti dall'ambito degli edifici a struttura intelaiata (Borri, 2003a). L'introduzione nella fabbrica di materiali con comportamento meccanico decisamente diverso da quello della muratura (alte resistenza, elasticità, capacità di lavorare a trazione) può comportare, infatti, l'alterazione della logica strutturale delle fabbriche storiche verso modelli di comportamento non sempre prevedibili. La consistente introduzione di cordoli e di strutture in cemento armato e la sistematica sostituzione degli orizzontamenti lignei con solai latero-cementizi, finalizzate a garantire alla fabbrica un miglior comportamento d'insieme, hanno nella realtà offerto risposte al sisma diverse da quelle attese, divenendo in alcuni casi motivo e innesco degli stessi dissesti riscontrati (Brovelli *et al.*, 1998; FIG. 5.29). Questi sistemi, infatti, non hanno garantito un comportamento scatolare delle fabbriche (che avrebbero dovuto manifestare, sotto l'azione sismica, eventuali cedimenti per rottura a taglio); i collassi più frequenti sono derivati invece soprattutto dal ribaltamento dei fronti (determinato da sollecitazioni sensibilmente più basse di quelle che provocano la rottura a taglio delle murature) e hanno evidenziato l'inefficacia dei vincoli ottenuti dalla disposizione di cordoli e solai latero-cementizi; queste esperienze hanno pertanto orientato la scelta di materiali compositi (Borri, 2003a) o di elementi metallici (Doglioni, Mazzotti, 2007) per la realizzazione di cordoli. L'incremento localizzato della rigidità può comportare una redistribuzione degli sforzi nel sistema portante e una conseguente pericolosa concentrazione delle tensioni, in quanto i carichi agenti non si distribuiscono uniformemente, bensì in maniera

FIGURA 5.29  
Effetti dannosi legati all'inserimento di cordoli cementizi



La realizzazione di un cordolo cementizio può indebolire il maschio murario riducendo la sezione su cui si verifica la migrazione permanente dei carichi. Al verificarsi di un sisma, poi, la spinta esercitata da solai rigidi può dare origine al punzonamento del muro. Se il cordolo non è ben ancorato alla parete, il collasso può verificarsi per ribaltamento del setto.

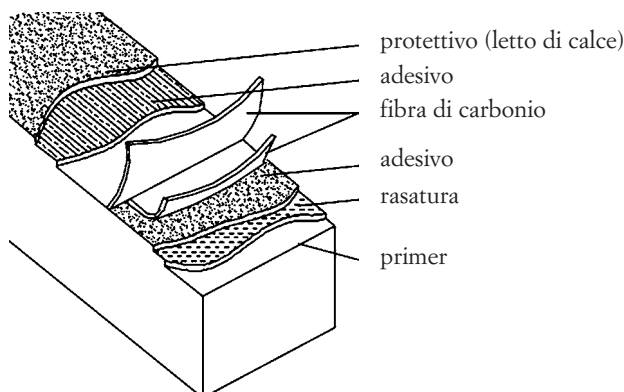
Fonte: rielaborazione da Borri (2003a).

proporzionale alla rigidezza delle strutture. La variazione delle rigidzze può determinare poi lo spostamento del loro baricentro (coincidente con il punto in cui è applicata la resistenza esercitata dalla struttura) rispetto al baricentro delle masse (ossia il punto in cui viene applicata la sollecitazione sismica): l'eccentricità che si viene così a creare fra le due risultanti può innescare precisi effetti torsionali, in genere molto pericolosi per le murature.

La drammatica quanto istruttiva esperienza del terremoto umbro-marchigiano ha favorito, nell'ultimo decennio, la maturazione di una maggiore sensibilità verso soluzioni più "leggere" di restauro statico, contrassegnate da un più ampio margine di reversibilità (Borri, Corradi, Vignoli, 2000; Marchetti, 2007).

Negli ultimi anni, gli interventi basati sull'impiego di materiali compositi che, per molti aspetti, rispondono alle istanze di compatibilità e leggerezza hanno avuto una sempre maggiore diffusione. Essi sono disponibili commercialmente in tessuti, applicati su un aggrappante di resina o sotto forma di profilati ottenuti per poltrusione (Di Tommaso, Russo, 1999). Il dibattito sull'uso di queste tecnologie nell'ambito delle costruzioni storiche è molto acceso; le perplessità manifestate dagli addetti ai lavori riguardano, in particolare, la scarsa conoscenza del comportamento meccanico e a lungo termine di strutture rinforzate con FRP. Dal punto di vista statico, i materiali compositi sono caratterizzati da un'elevata resistenza a trazione (nella direzione delle fibre), che si confronta, però, con una scarsa capacità di risposta alle sollecitazioni di compressione (almeno per i tessuti) e taglianti. Analisi e applicazioni sperimentali condotte hanno dimostrato, ad esempio, che è sempre necessario applicare un doppio strato di fibre, anche se il primo riesce già da solo a soddisfare ampiamente le verifiche a trazione: il secondo strato consente infatti di

FIGURA 5.30  
Allettamento dei tessuti in fibra di carbonio



Nelle strutture murarie, la necessità di creare una superficie di posa priva di asperità impone la stesura di uno strato di malta di livellamento, la quale può rappresentare l'anello debole nella trasmissione degli sforzi dalla struttura alle fasce di rinforzo.

ottenere una maggiore ripartizione di eventuali forze “parassite” ed evitare gli eventuali effetti di tranciamento delle fibre, che possono essere innescati dalla presenza di irregolarità sulla superficie di posa (Borri, 2003a; FIG. 5.30).

Il pericolo connesso all'impiego degli FRP riguarda pertanto il comportamento, spiccatamente anisotropo, del materiale, che potrebbe non assorbire tensioni impreviste in sede di progetto. La vicenda sopra ricordata del sisma umbro-marchigiano costituisce, d'altra parte, una significativa testimonianza di come il comportamento reale delle fabbriche storiche possa disattendere i modelli di comportamento avanzati dai progettisti. I rinforzi in materiali compositi necessitano anche di opportuni accorgimenti di protezione a diversi regimi termici; basse temperature, cicli di gelo-disgelo, alte temperature possono innescare fenomeni di *microcracking* (degrado del legame fibra-matrice) o di *de-bonding* (netto decremento delle proprietà meccaniche del rinforzo; Bonati, Quaglia, 2004).

Rimangono comunque altrettanto palesi i vantaggi dei materiali fibrorinforzati, relativi soprattutto alla leggerezza (che non modifica sensibilmente le masse sismiche e non determina aggravii sollecitazionali) e una relativamente maggiore reversibilità rispetto ad altre soluzioni. I fautori dei materiali compositi richiamano l'attenzione sulla diversa filosofia progettuale connessa al loro impiego; questi materiali, infatti, vengono applicati puntualmente per sopperire carenze strutturali e incrementare le capacità di resistenza a trazione nei punti in cui i possibili cinematismi di collasso porterebbero alla formazione di lesioni, senza trasformare il comportamento d'insieme come avviene con l'impiego del cemento armato (Borri, 2003a; Faccio, Foraboschi, Siviero, 1999).

## 5.2.2. Cenni sul comportamento statico delle fabbriche antiche

Un sintetico richiamo alla meccanica delle murature, che incide in maniera decisiva sul comportamento globale delle fabbriche antiche, è utile a inquadrare in modo più preciso le tecniche di restauro statico più diffuse.

Negli edifici storici è possibile rilevare una vasta casistica di tipologie murarie; il comportamento meccanico di queste ultime, tuttavia, pur variando con i diversi tipi di materiali utilizzati e di fattura, è caratterizzato da due fondamentali fattori comuni: una limitata resistenza a compressione (prossima a quella del materiale più debole, in genere la malta, e variabile fra qualche decimo e qualche decina di MPa) e una trascurabile resistenza a trazione (legata all'aderenza fra elementi lapidei e legante e alla qualità di quest'ultimo).

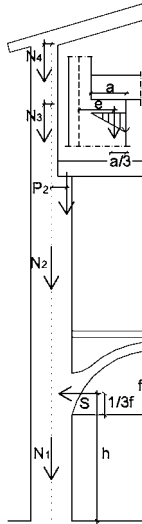
Lo stato tensionale migliore per una sezione muraria è dunque quello di compressione uniforme (una sezione è sollecitata solo a compressione se la risultante dei carichi, orizzontali e verticali, cade perfettamente nel baricentro della sezione). In questa condizione, tutti i punti raggiungono contemporaneamente il valore massimo di tensione e il collasso avverrà quando la muratura avrà reagito con tutta la forza resistente disponibile. I carichi possono pertanto crescere fino a quando la tensione raggiunge il valore limite oltre al quale si determina una crisi per schiacciamento; quest'ultima si manifesta con la formazione di lesioni verticali e un collasso di tipo fragile, improvviso e quindi particolarmente pericoloso (nelle strutture più duttili il collasso può però essere preceduto anche da deformazioni più o meno evidenti).

I maschi murari rivestono il ruolo strutturale più importante in un edificio; a essi è affidato il compito di sostenere sia i carichi verticali trasmessi dalla copertura e dagli orizzontamenti, sia le sollecitazioni orizzontali di natura statica (spinte trasmesse da volte e archi) e dinamica (forze d'inerzia sismiche). Pur in assenza di spinte, i carichi d'esercizio presentano generalmente un'applicazione eccentrica rispetto al baricentro del muro e il solido murario non risulta pertanto sollecitato a compressione uniforme ma a presso-flessione (FIG. 5.31).

L'eccentricità in una sezione (pari al rapporto fra momento e sforzo normale agenti su di essa  $e = M/N$ ) può variare da 0 a  $s/2$  (valore oltre il quale la risultante cade al di fuori della sezione e non è possibile ottenere un equilibrio delle forze): per valori di  $e$  superiori ad  $s/6$ , però, la sezione inizia a parzializzarsi e nella parte della zona tesa si verificano lesioni, segnali evidenti del superamento della tensione limite di trazione. Con la progressiva parzializzazione della sezione, l'area reagente diminuisce e, conseguentemente, si verifica anche un netto decremento della forza resistente ultima esplicita ( $F = \text{area sottesa dal diagramma delle tensioni}$ ); la fase successiva alla formazione di lesioni in zona tesa è, dunque, lo schiacciamento della zona compressa, nella quale si concentrano i carichi prima distribuiti su un'area più ampia (Giuffrè, 1991; FIG. 5.32).

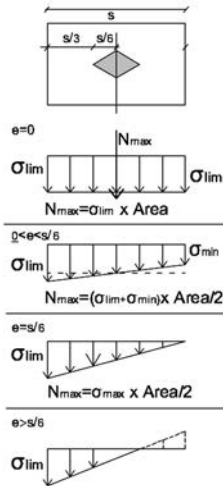
Le forze orizzontali incrementano significativamente la componente flessio-

FIGURA 5.31  
Regime statico di un maschio murario



I carichi gravanti su un maschio murario presentano in genere un'applicazione eccentrica rispetto al baricentro della sezione di base e determinano pertanto sollecitazioni flessionali che si aggiungono ai momenti esercitati dalle forze orizzontali presenti (momento della volta rispetto alla base =  $S \times h$ ).

FIGURA 5.32  
Forza resistente ultima e parzializzazione delle sezioni



La forza resistente ultima esplicita è massima nella sezione uniformemente compressa e diminuisce sensibilmente con la parzializzazione della sezione.

nale della sollecitazione; queste forze esercitano un momento ribaltante che risulta tanto maggiore quanto più aumenta la distanza della spinta dalla sezione di verifica (generalmente quella di base). La formula che esprime il valore dell'eccentricità evidenzia chiaramente come questa diminuisca, a parità di momento agente, con l'incremento dello sforzo normale: archi e volte sono per tale ragione collocati soprattutto nei piani bassi degli edifici, dove il braccio della forza è minore, e l'organismo resiste meglio alle spinte trasmesse grazie al peso stabilizzante degli elevati soprastanti. Il momento ribaltante esercitato dalla spinta può produrre nei setti dissesti di vario tipo, che si manifestano con rotazioni rigide dei solidi murari o spanciamenti localizzati a seconda delle caratteristiche degli apparecchi murari e dei vincoli esercitati da incastramenti e solai e in fondazione.

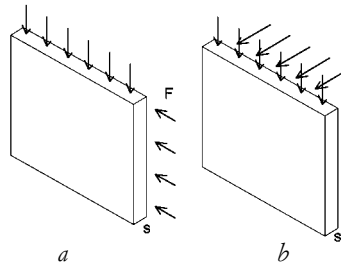
I fenomeni sismici danno origine alle sollecitazioni più pericolose, generando negli edifici forze d'inerzia proporzionali alle masse; tali azioni, piuttosto rilevanti, sollecitano strutture generalmente poco predisposte a una resistenza specifica, anche perché in genere caratterizzate da grandi luci libere e scarsamente vincolate. L'organismo edilizio è poi soggetto a spinte localizzate, ad esempio trasmesse da archi, volte e cupole, ma anche dagli archi di scarico "naturali" che si creano in una struttura muraria quando le linee di flusso delle forze non possono seguire il loro spontaneo percorso verticale, ad esempio per la presenza di bucatore.

Nei riguardi delle azioni orizzontali, il comportamento del setto viene definito "a lastra" o "a piastra", a seconda che la forza sia parallela o normale al piano murario. In entrambi i casi le modalità di collasso possibili sono per taglio o per presso-flessione, a seconda di quale delle due sollecitazioni incontri la resistenza minore (FIG. 5.33).

Generalmente, quando la forza è contenuta nel piano stesso del muro, la resistenza a flessione è abbastanza elevata e il collasso avviene più facilmente per taglio, con la formazione di diverse lesioni diagonali inclinate a  $45^\circ$ . La resistenza a flessione con sollecitazioni nel piano è, quindi, molto elevata, mentre con azioni ortogonali al piano essa è funzione dello spessore murario e risulta decisamente inferiore. I setti presentano pertanto una resistenza significativamente più bassa nei confronti delle azioni fuori dal piano: forze relativamente piccole possono infatti portare facilmente al collasso della struttura.

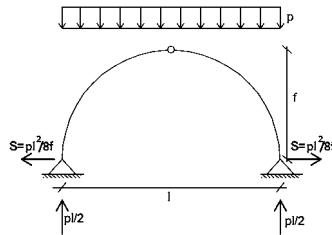
Il comportamento d'insieme delle fabbriche in muratura è determinato, oltre che dalle caratteristiche meccaniche delle murature, dalla presenza e dall'efficacia dei collegamenti fra le membrature portanti. Le significative carenze di connessioni che si riscontrano negli edifici storici favoriscono collassi strutturali dovuti a perdita d'equilibrio dei setti murari piuttosto che al raggiungimento delle tensioni ultime. Il comportamento di una facciata, ad esempio, può essere prossimo a quello di una mensola, a meno che la presenza di collegamenti efficaci ai muri ortogonali consenta alla parete di sviluppare un comportamento bidimensionale, determinando un significativo incremento di resistenza nei confronti delle spinte ortogonali al piano. Segnali di un incipiente

FIGURA 5.33  
Comportamento a lastra e a piastra di un setto murario



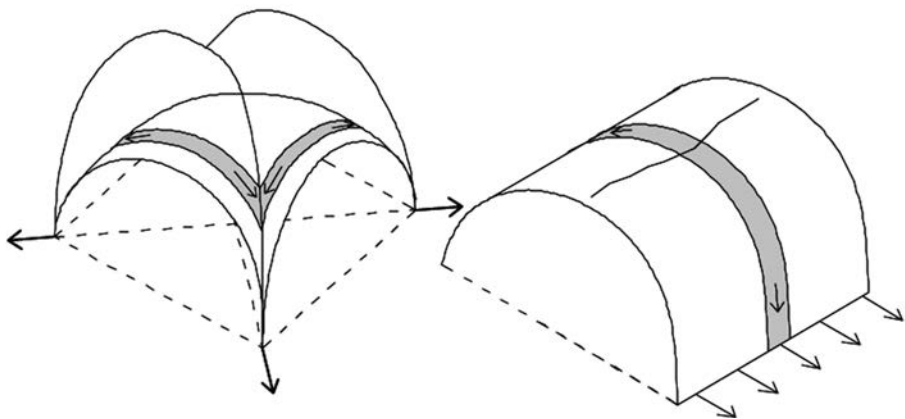
Il comportamento di un setto murario è definito “a lastra” se soggetto a forze lungo il piano del muro (a), “a piastra” quando le sollecitazioni sono ortogonali ad esso (b).

FIGURA 5.34  
Regime statico dell'arco



Gli archi esercitano una spinta orizzontale presso le imposte (posizionata a circa  $1/3$  dell'altezza), tanto maggiore quanto più grande è la luce (l) e minore la freccia (f).

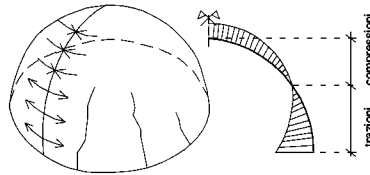
FIGURA 5.35  
Sollecitazioni trasmesse dalle volte alle murature



Nelle volte a crociera le sollecitazioni vengono trasmesse agli archi diagonali, i quali, a loro volta, esercitano una spinta orizzontale presso le imposte; le volte a botte trasmettono invece una spinta omogenea sui maschi murari d'imposta.



FIGURA 5.36  
Tensioni nelle cupole in muratura



Le volte a botte possono essere studiate come una serie di archi affiancati; nelle volte a crociera gli archi delle unghie esercitano spinte sugli archi diagonali.

Fonte: rielaborazione da Gallo Curcio (2007).

ribaltamento dei fronti si rilevano spesso negli edifici storici, in quanto, come s'è già osservato, la perdita di equilibrio della struttura interviene prima che le sezioni murarie abbiano esplicitato tutta la resistenza possibile; il grado di sicurezza del setto deve essere pertanto verificato non solo in riferimento alle tensioni agenti, ma anche guardando alla stabilità dell'elemento (Beolchini, Milano, Antonacci, 2007).

Gli archi e le volte presentano un'elevata capacità portante, lavorando prevalentemente a compressione. Il loro funzionamento è basato sul mutuo contrasto dei componenti strutturali, che può aver luogo solo in presenza di un'adeguata spinta all'imposta; in assenza di tale spinta, la struttura ad arco assume un comportamento di tipo flessionale, come fosse una trave, riducendo drasticamente il proprio livello di sicurezza (Gallo Curcio, 2007; FIG. 5.34).

Ad ogni arco è associata una curva delle pressioni, che costituisce il luogo dei punti di applicazione della risultante dei carichi per ogni sezione: questa curva è funzione dei carichi agenti, alla cui modifica (o al mutare puntuale della struttura) può variare forma, per assecondare la nuova condizione d'equilibrio. La curva delle pressioni, quindi, non ha nulla a che vedere con la curvatura geometrica dell'arco, tuttavia la prima, per garantire una condizione d'equilibrio, deve seguire un andamento contenuto all'interno della seconda, mantenendosi sufficientemente lontana dai bordi. La risultante dei carichi dovrebbe cadere all'interno del nocciolo centrale d'inerzia, così che la sezione sia tutta reagente (Gallo Curcio, 2007).

L'equilibrio di volte a botte e a crociera, la cui logica strutturale si fonda nell'interazione fra più archi resistenti, ribadisce gli stessi principi (FIG. 5.35).

La statica delle volte a padiglione, invece, per la presenza di settori piani, è caratterizzata da un comportamento basato sul reciproco contrapporsi di archi rampanti e puntoni murari. Nelle cupole la capacità resistente risiede nella doppia curvatura di ogni sezione e, più che nelle volte a padiglione, il comportamento è di tipo "membranale", non riconducibile alla statica di elementi monodimensionali; le sollecitazioni a trazione attive nella fascia inferiore possono determinare, se non opportunamente contrastate, la formazione di lesioni

radiali che si aprono dalla base e proseguono verso il cervello della cupola (FIG. 5.36).

### 5.2.3. Cedimenti fondali e metodologie d'intervento

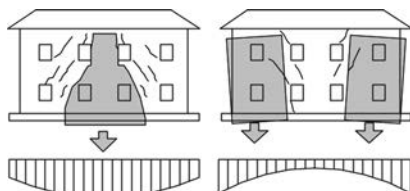
Le patologie in fondazione si manifestano con la formazione di lesioni sugli elevati, tali da individuare e separare porzioni della fabbrica coinvolte in un meccanismo di cedimento. La presenza di lesioni è legata alla presenza di cedimenti disomogenei; se l'entità degli abbassamenti fosse uniforme in tutto l'edificio, si registrerebbero semplicemente traslazioni o rotazioni estese a tutta la fabbrica, senza che si verificano nelle strutture incrementi tensionali (viceversa presenti nelle porzioni di terreno coinvolte) e, di conseguenza, fratture (FIG. 5.37).

I cedimenti presentano invece raramente una distribuzione omogenea: le eterogeneità delle costruzioni storiche e l'irregolarità stratigrafica del terreno (con caratteristiche meccaniche e quantità d'acqua variabili con la profondità) concorrono a determinarne il carattere disuniforme. Le costruzioni antiche, sorte per accrescimenti successivi, possiedono generalmente fondazioni diverse, per quota d'imposta, fattura e dimensioni, a volte inadeguate a sopraelevazioni e modifiche posteriori. Le eterogeneità costruttive rappresentano un fattore di vulnerabilità e possono innescare dissesti o amplificare gli effetti di cedimenti fondali derivanti da cause diverse.

I dissesti in fondazione possono dunque avere origine da movimenti del terreno o da mancanze strutturali; queste ultime consistono soprattutto in un'inadeguata capacità portante, ad esempio dovuta a sopraelevazioni, aumento dei carichi d'esercizio, eliminazione o costruzione di muri, ma possono essere anche legate a fenomeni di degrado che coinvolgono le strutture ipogee e ne riducono la capacità portante.

I cedimenti del terreno (fatta eccezione per quelli che si verificano istantaneamente all'applicazione del carico) sono causati principalmente da fenomeni viscosi, plastici (possono durare svariati decenni e produrre deformazioni permanenti), da variazioni del regime idrologico (per costruzioni di dighe, perdite

FIGURA 5.37  
Cedimenti fondali e dissesti



La distribuzione delle lesioni sugli edifici dipende dalla curvatura del diagramma dei cedimenti.

fognarie, emungimenti improvvisi ecc.) o da modifiche delle pressioni trasmesse dall'edificio; la realizzazione di scavi in profondità può inoltre ridurre gli effetti di confinamento, provocando movimenti orizzontali e perdita di portanza nel terreno fondale.

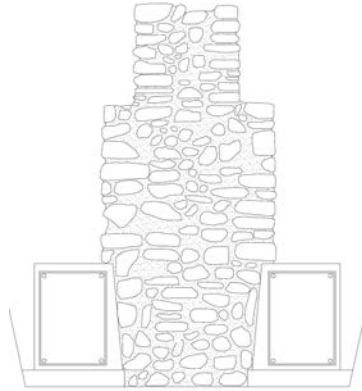
Se l'origine dei dissesti è nella portanza insufficiente, è possibile intervenire con operazioni che modifichino la resistenza e la deformabilità del terreno; tali interventi sono in genere onerosi e complessi, difficilmente applicabili all'architettura monumentale. Spettacolare, fra questi, è la tecnica della sottoscavazione, che consiste nel creare cavità nel terreno tramite il prelievo mirato di carote; la chiusura controllata dei vuoti così realizzati produce assestamenti artificiali in grado di compensare i cedimenti avvenuti in altre zone dell'edificio. Questa tecnica, sperimentata sulla cattedrale di Città del Messico nel 1995, è stata riproposta con successo due anni dopo per il parziale recupero della verticalità nella torre di Pisa (Viggiani, Squeglia, 2006).

Generalmente conviene agire sulla fabbrica storica con strategie atte a modificare la distribuzione delle pressioni in fondazione, ad esempio incrementando la rigidità del sistema, rendendolo capace di sopportare l'incremento di tensioni derivante dai cedimenti (se lievi) oppure aumentando la superficie d'appoggio, così da limitare le pressioni trasmesse al terreno. In alcuni casi si sono isolate le porzioni di edificio soggette a cedimenti creando appositi giunti, in modo da consentire movimenti indipendenti fra di esse e da evitare la trasmissione di stress aggiuntivi agli elevati. Questi interventi, oltre a essere tecnicamente piuttosto complessi, comportano una sostanziale alterazione della logica statica dell'edificio. Le motivazioni di ordine pratico e il necessario rispetto per la materia storicizzata favoriscono pertanto la scelta di interventi di sottofondazione (FIG. 5.38) o l'inserimento di micropali (FIG. 5.39). I primi consentono di ridurre le pressioni trasferite al terreno aumentando la superficie d'appoggio; il secondo permette di trasferire i carichi a strati più profondi di terreno ed è quindi indicato in presenza di strati superficiali del suolo poco resistenti (Mariani, 2006a).

In occasione dei restauri condotti sull'antico seminario vescovile di Ascoli Piceno, la soluzione di un problema di cedimenti fondali che aveva dato origine a vistose lesioni in facciata ha richiesto lo studio di fattibilità di entrambe le metodologie d'intervento. L'edificazione della fabbrica, ora denominata palazzo Andolfi, si conclude alla fine del XVII secolo; il progressivo accorpamento di alcune preesistenze medievali e l'attuazione di consistenti lavori allo scorcio del Cinque e Seicento ha dato origine a una fabbrica complessa, composta da corpi disomogenei volumetricamente e per fattura costruttiva. Agli inizi del 2000, l'edificio presentava un preoccupante quadro di dissesti, dovuti anche a cattivi interventi pregressi, come le sistematiche rimozioni dei muri di spina che avevano indebolito la struttura nei riguardi del sisma, favorendo spancamenti e rotazioni all'esterno dei fronti meridionali relativi all'ampliamento seicentesco (FIG. 5.40).

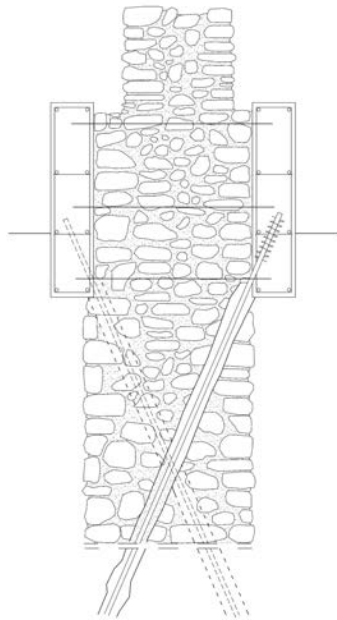
Proprio questo corpo presentava una particolare vulnerabilità, a causa del-

FIGURA 5.38  
Consolidamento fondale con cordoli in cemento armato



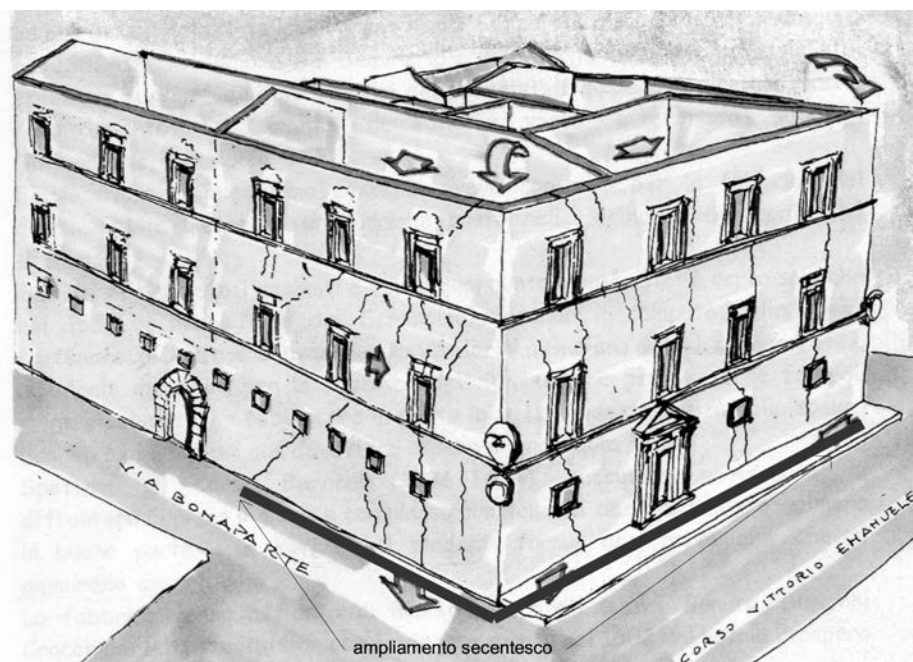
La struttura in cemento armato incrementa la rigidezza del sistema fondale e, ampliando la superficie di appoggio, riduce le pressioni trasmesse al terreno.

FIGURA 5.39  
Consolidamento fondale con micropali



I micropali vengono alloggiati con una inclinazione variabile e permettono di trasferire le azioni a strati più profondi e resistenti di terreno.

FIGURA 5.40  
Ascoli Piceno, seminario vescovile. Quadro dei dissesti e dei cinematismi riscontrati

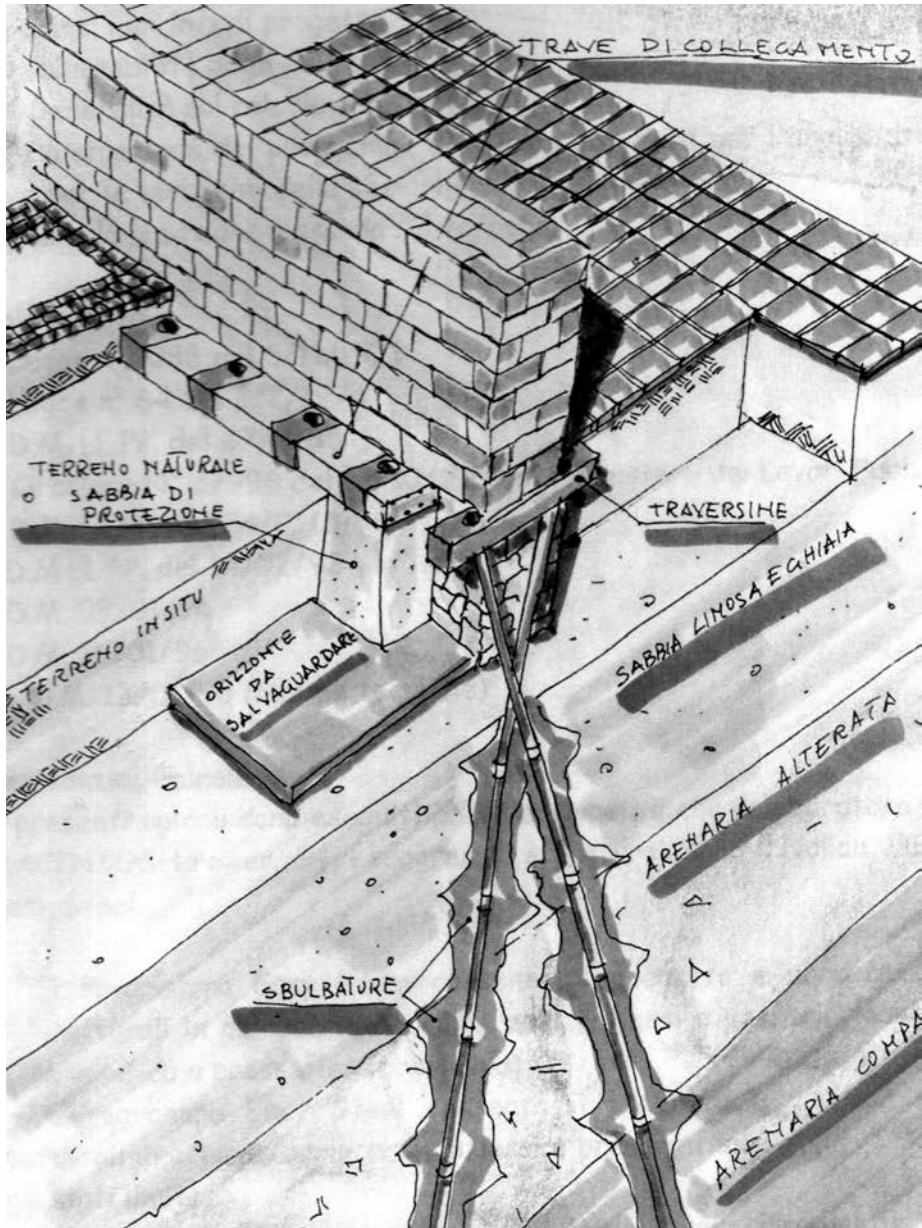


Elaborato grafico Studio R. Mariani.

la sua storia costruttiva e dell'imposta delle fondazioni a un livello più superficiale rispetto al corpo retrostante (dotato di ambienti sotterranei). La disposizione della strada a valle aveva poi favorito l'abbassamento della quota di calpestio con il progressivo "scalzamento" degli strati superficiali di terreno (per circa 80 cm), che aveva così perso il proprio effetto cerchiante, e la messa in luce dell'intera fondazione.

Il restauro strutturale (studio R. Mariani) ha comportato la ricostruzione delle murature portanti che erano state demolite nel passato e l'incatenamento trasversale degli impalcati a tutti i livelli. Il progetto d'intervento prevedeva in origine la creazione di una sottofondazione in cemento armato per ampliare la superficie d'appoggio della fabbrica. Generalmente questo tipo d'intervento viene esteso all'intero perimetro murario, per evitare d'introdurre elementi disomogenei nella fabbrica; in questo caso, però, sono state le eterogenee caratteristiche originarie della struttura a suggerire di confinare l'opera al solo tratto angolare interessato dalla rotazione, che si fondava più in alto rispetto al resto del fronte occidentale. Al momento dello scavo è però emerso, a circa 80 cm di profondità, un interessante strato archeologico, che sarebbe stato tagliato per intero dalla nuova base fondale; il progetto è stato pertanto rivisto

FIGURA 5.41  
Ascoli Piceno, seminario vescovile. Restauro statico in fondazione



L'impiego dei micropali ha consentito la salvaguardia dello strato archeologico. Essi sono stati alloggiati con un'inclinazione di  $16^{\circ}$ - $18^{\circ}$  in fori trivellati fino a raggiungere il livello dell'argilla compatta.

Elaborato grafico Studio R. Mariani.

radicalmente e, al posto della struttura continua in cemento armato, si è deciso di ricorrere all'inserimento di micropali in punti ben localizzati del basamento. I carichi sono stati così affidati a coppie di pali metallici infissi nel terreno fino agli strati più resistenti, poi iniettati con malta cementizia. I micropali sono intestati per oltre 3,5 m sullo strato di arenarie compatte localizzate a circa 6 m di profondità (FIG. 5.41).

Generalmente l'impiego di micropali è sconsigliato in terreni archeologicamente significativi per la difficoltà di controllare il percorso del fluido iniettato e il pericolo di danneggiare eventuali preesistenze sepolte. In questo caso, però, la scelta ha consentito di effettuare sullo strato archeologico noto solo fori puntuali del diametro di 100 mm e ha consentito di superare i livelli di possibile interesse archeologico, arrivando a strati profondi e inerti. I pali utilizzati (diametro 100 mm) sono realizzati con spezzoni di tubolari a grande spessore, dotati di filettatura e collegati a "manicotti" lunghi 3 m, muniti di valvole di non ritorno ogni metro. Sul micropalo, per aumentarne l'efficacia, attraverso una serie di valvole, sono state realizzate diverse "sbulbature", ottenute dall'iniezione a grande pressione di materiale in grado di fratturare il terreno ai lati del tubo e di generare protuberanze utili ad aumentare l'attrito laterale della fondazione. Ovviamente tale accorgimento ha riguardato esclusivamente gli strati al di sotto del livello archeologico.

Il trasferimento dei carichi delle masse murarie sui micropali è stato assicurato da un dispositivo composto da traversine in calcestruzzo che attraversano la muratura e si collegano fra loro con un cordolo; esse svolgono il duplice compito di congiungere trasversalmente le coppie di pali e di sorreggere il muro, accogliendo la maggior parte delle pressioni derivanti dalla muratura.

Il getto a contatto con le masse murarie di traversine e cordolo fa sì che le nuove strutture entrino in carico immediatamente, senza aspettare cedimenti ulteriori, inaccettabili per le gravi condizioni di dissesto. Con pali di maggior diametro, la messa in carico dei pali può essere garantita da operazioni diverse, quali ad esempio la precompressione tramite martinetti piatti, realizzata nel consolidamento fondale del Palazzo di Giustizia di Roma (Crocì, 2001).

#### 5.2.4. I terremoti e la riduzione della vulnerabilità alle sollecitazioni dinamiche

I terremoti sono prodotti da improvvise rotture della crosta terrestre che si verificano a grandi profondità. I lenti movimenti delle placche sismogenetiche generano concentrazioni di tensioni; quando i valori di resistenza limite vengono superati, le placche si rompono e l'energia di deformazione accumulata si propaga in tutte le direzioni sotto forma di onde sismiche.

Le caratteristiche del sisma registrate sulla superficie terrestre sono diverse da quelle del punto di origine (ipocentro) e variano in funzione della profondità ipocentrale (la stessa energia per terremoti che avvengono a profondità

maggiori viene distribuita su una superficie più ampia) e della stratigrafia del terreno attraversato (FIG. 5.42): i terreni molto compatti, come quelli rocciosi, non dissipano energia allo stesso modo dei terreni incoerenti, in grado di abbattere sensibilmente il contenuto in frequenze del sisma. L'intensità di un terremoto è definita dall'accelerazione massima registrata al suolo, espressa come frazione dell'accelerazione di gravità.

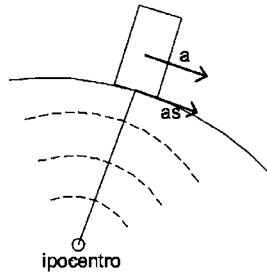
Le sollecitazioni sismiche presentano ulteriori caratteristiche significative, definite dalla loro ampiezza, intensità, contenuto in frequenze e durata. Un terremoto che investe un edificio produce dunque accelerazioni sempre associate alla presenza di forze orizzontali d'inerzia, in genere di rilevante entità, data la loro proporzionalità diretta con le pesanti masse murarie di una fabbrica storica (FIGG. 5.43-5.44); per tale ragione gli interventi che comportano accrescimenti murari sulle preesistenze devono essere attentamente verificati perché implicano l'aumento delle forze agenti in caso di sisma.

La struttura in elevato non è sottoposta alle stesse accelerazioni che si registrano al suolo e sulle fondazioni, perché queste vengono "filtrate" dalla costruzione; la risposta strutturale (in termini di accelerazioni e spostamenti) dipende quindi, oltre che dalla natura della forzante, anche dal comportamento dinamico della fabbrica. Se supponiamo di sollecitare un edificio con una forza orizzontale, poi immediatamente rimossa, questo inizierà a oscillare con un moto che non dipende dalla forzante esterna (assente), ma solo dalle caratteristiche geometriche e dinamiche della fabbrica. Il tempo impiegato a compiere un'oscillazione completa è detto "periodo proprio di vibrazione" ed è tanto minore quanto più piccola è la massa e più grande la rigidità ( $T = \sqrt{\text{massa}/\text{rigidità}}$ ). Le costruzioni murarie sono strutture rigide e, quindi, caratterizzate da bassi periodi propri ( $T = 0,1-0,3$  sec.; Croci, 2001) e da alte frequenze di vibrazione (la frequenza rappresenta il numero di cicli nell'unità di tempo,  $f = 1/T$ ); le strutture snelle e alte sono invece caratterizzate da periodi maggiori, perché il tempo necessario a un'oscillazione completa è evidentemente superiore ( $T = 0,5-2$  secondi, per torri campanili e minareti; Croci, 2001). La risposta dell'edificio a un determinato terremoto aumenta quanto più la frequenza principale della struttura è vicina alla frequenza d'oscillazione della spinta (in realtà un fenomeno sismico è caratterizzato non da una singola frequenza, ma da una banda di valori); semplificando molto i termini della questione, si potrebbe affermare che, quanto più la forzante sismica impone alla fabbrica un movimento che asseconda il modo di vibrare stesso dell'edificio, tanto più l'effetto viene amplificato; al contrario, se immaginiamo di sollecitare un struttura rigida con un terremoto lento (basse frequenze), si verifica un abbattimento delle risposte sia in termini di spostamenti che di accelerazioni massime (FIG. 5.45). Il fattore che nelle elaborazioni numeriche dà conto di questo fenomeno è il coefficiente di risposta.

I terremoti che si registrano in Italia sono caratterizzati da alte frequenze e bassi periodi propri, compresi tra 0,1 e 0,8 secondi, in un *range* di valori che raccoglie i periodi propri della maggioranza delle fabbriche in muratura; ciò

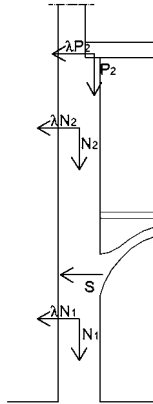


FIGURA 5.42  
Trasmissione delle onde sismiche



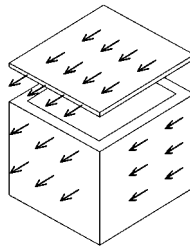
Le caratteristiche del sisma in superficie dipendono anche dagli strati attraversati e dalla profondità ipocentrale; la risposta dell'edificio varia in funzione delle caratteristiche dinamiche della struttura.

FIGURA 5.43  
Analisi dell'azione sismica sui setti murari



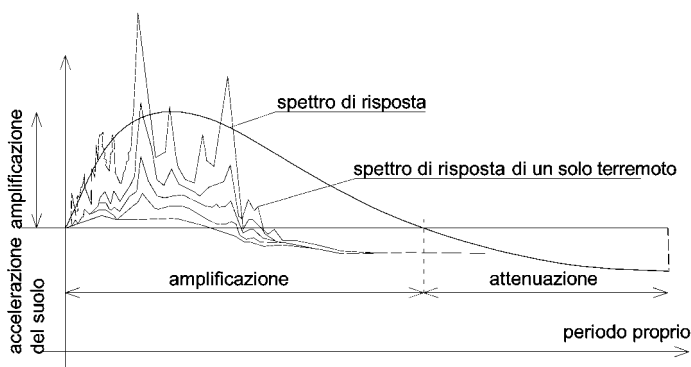
Le forze d'inerzia prodotte sulla struttura sono proporzionali alle masse secondo un coefficiente che dipende dalla sismicità del sito, dalla tipologia di struttura e dal terreno di fondazione.

FIGURA 5.44  
Sollecitazioni sismiche distribuite su una scatola muraria



Le forze d'inerzia si sviluppano nella stessa direzione dell'azione sismica, alcuni setti sono così sollecitati nel piano, altri da forze fuori dal piano. I solai, soprattutto se irrigiditi, possono creare effetti di punzonamento sui muri.

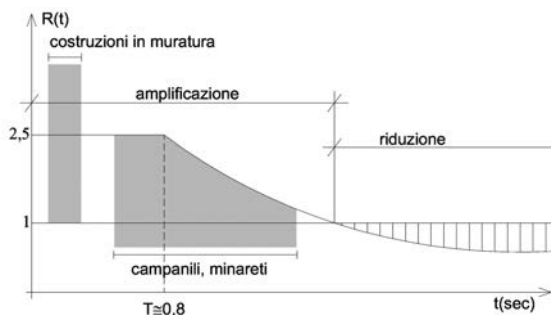
FIGURA 5.45  
Spettri di risposta sismica



Lo spettro di risposta di un singolo terremoto fornisce l'accelerazione massima (in ordinate) che subisce la costruzione in funzione del periodo proprio di questa (in ascisse).

Fonte: rielaborazione da Croci (2001).

FIGURA 5.46  
Grafico che illustra il coefficiente di risposta  $[R(t)]$  in funzione del periodo proprio di oscillazione di un edificio, secondo la normativa vigente



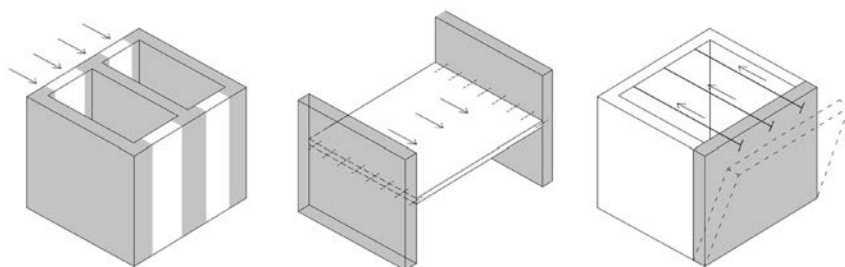
spiega la grande vulnerabilità degli edifici storici, che, in più, presentano spesso elementi ulteriori di debolezza, principalmente legati alla scarsità di presidi antisismici e di ammortature trasversali, nonché all'elevata snellezza di diversi maschi murari (Pasta, 2006; FIG. 5.46).

Le fabbriche antiche possiedono comunque altre risorse per resistere ai fenomeni tellurici, soprattutto espresse dalla loro capacità di dissipare energia (che avviene attraverso la formazione di lesioni o per la deformazione delle strutture). Gli effetti prodotti dal terremoto, infatti, diminuiscono all'aumentare dello smorzamento, parametro che esprime la suddetta capacità dissipativa, all'aumento del quale si ha un più rapido esaurimento delle vibrazioni una

volta cessata la forzante. Va inoltre osservato che la struttura lesionata risulta più flessibile, il suo periodo proprio di vibrazione aumenta e tende a valori di coefficienti di risposta più bassi, con conseguenti effetti sismici leggermente minori.

Si sta oggi lavorando alla messa a punto di tecniche innovative d'intervento in grado d'interferire con il comportamento dinamico della fabbrica, così da limitare le forze d'inerzia che si manifestano sull'edificio oppure da incrementare artificialmente le capacità dissipative della struttura. Queste tecniche non sono però sempre applicabili: la loro praticabilità e l'efficacia sono vincolate alle caratteristiche costitutive dell'esistente (Martelli, Sonino, Parducci, 2008).

FIGURA 5.47  
Presidi costruttivi antisismici



La realizzazione di collegamenti efficaci fra le membrature, la rigidità dei solai, la disposizione di sistemi di ritagno assicurano alla fabbrica un buon comportamento scatolare.

La strategia più diffusa negli interventi di adeguamento sismico consiste pertanto nel migliorare la resistenza della fabbrica con l'inserimento di adeguati presidi nei confronti delle azioni orizzontali, in grado di conferire una sufficiente inerzia sismica o di contrastare eventuali meccanismi di ribaltamento. Come già osservato, la resistenza del muro e, quindi, la pericolosità dell'azione sismica sono significativamente diverse a seconda che la forza agisca nel piano od ortogonalmente della parete. Il comportamento dinamico dell'edificio è tanto migliore quanto più è garantita la collaborazione fra le strutture, così che l'organismo murario possa trasferire le azioni orizzontali ai muri posizionati nella stessa direzione della forza (setti di controvento). La presenza di ammorsature adeguate fra i muri ortogonali e fra le diverse componenti strutturali costituisce quindi un requisito fondamentale; il compito di ripartire le azioni è generalmente affidato ai solai, che devono possedere una buona rigidità nel piano ma anche efficaci ancoraggi con i muri perimetrali. In alternativa, sistemi d'incatenamento possono esercitare il richiamo delle membrature

tendenti al ribaltamento (FIG. 5.47). La vigente normativa raccomanda inoltre in zona sismica l'eliminazione di ogni spinta attiva tramite la predisposizione di sistemi d'assorbimento delle forze orizzontali.

Il restauro statico dell'abbazia di S. Salvatore Maggiore presso Concerviano (Rieti) illustra come nell'ambito di uno stesso organismo la riduzione della vulnerabilità sismica sia ottenuta ricorrendo a tecniche di adeguamento diverse (studio S. Simoni), di volta in volta calibrate sulla base delle diverse caratteristiche geometriche, costruttive e di degrado delle strutture superstiti. L'abbazia è il prodotto di una complessa storia costruttiva, le cui origini risalgono all'alto Medioevo; si tralasciano, per ragioni di sintesi, le vicende architettoniche e i problemi conservativi dell'intero complesso benedettino e ci si limita a considerare il solo corpo occidentale, edificato su quattro livelli nel XVIII secolo e ridotto all'epoca dell'intervento (2006-08) alle sole pareti perimetrali, parzialmente crollate in sommità. I muri superstiti, in pietrame calcareo irregolare allettato con malta di calce, delimitano un corpo rettangolare ampio all'interno  $26 \times 7$  m; essi sono piuttosto snelli e non presentavano particolari legature, a meno di alcuni setti trasversali alti un solo piano eemicrollati. I solai in legno e la struttura di copertura erano scomparsi. Il progetto di restauro statico ha provveduto a riproporre gli antichi sistemi resistenti, basati sul trasferimento delle forze orizzontali alle cosiddette pareti "a taglio" (parallele alla direzione della forza): le membrature sopravvissute sono state reintegrate con materiale calcareo, quelle mancanti sono state ricostruite con blocchi di laterizio portante tipo "poroton" (poi intonacate), in analogia con le reintegrazioni effettuate nel resto della fabbrica. Le eventuali discontinuità trasversali, dovute alla presenza di vani di passaggio, sono state saturate con la disposizione di travi in calcestruzzo (con il filo arretrato rispetto a quello delle murature per far cogliere la sua natura moderna), così da garantire la presenza di diaframmi rigidi fra le pareti d'ambito. La collaborazione fra setti mutuamente ortogonali è certamente il modo più efficace di conferire inerzia sismica al manufatto: l'azione resistente esplicita da setti che hanno la stessa direzione della sollecitazione è relativamente elevata e consente di raggiungere sufficienti valori di sicurezza nei riguardi dei terremoti. L'introduzione di vincoli addizionali alle pareti d'ambito, inoltre, ne riduce la snellezza e ne modifica in senso favorevole lo schema statico.

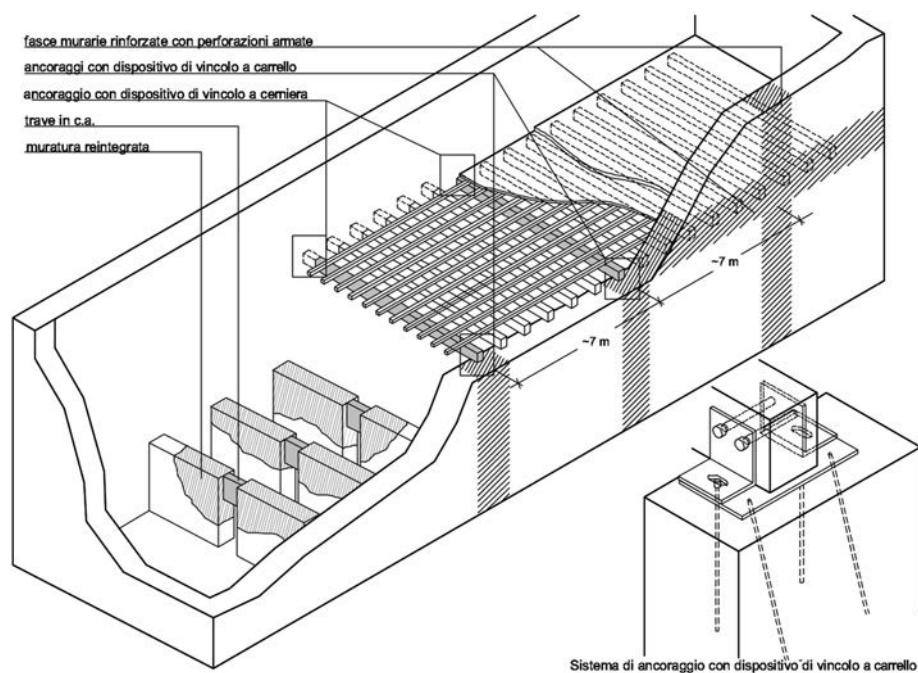
Ai livelli superiori, però, l'assenza di setti murari trasversali ha costretto a modificare la strategia progettuale: la luce libera delle pareti, molto lontana dai canonici 7 metri previsti dalla normativa per edifici in muratura, ha spinto a inserire nei maschi perimetrali opportuni sistemi d'irrigidimento, in grado di limitarne la deformabilità. Sono stati creati "telai" resistenti intervallati di circa 7 m, con gli elementi verticali costituiti da fasce murarie irrigidite (con perforazioni a quinconce armate da barre in acciaio inox inclinate a  $45^\circ$  sia in verticale che in orizzontale) e le strutture orizzontali consistenti nelle travi dei solai; i "telai" sono stati interconnessi orizzontalmente tramite particolari cordoli murari, realizzati disponendo analoghe armature metalliche nella parete;

nei tratti riedificati in “poroton”, l’irrigidimento è stato ottenuto con la costruzione di un tradizionale cordolo in cemento armato.

L’impiego di materiali e tecnologie che presentano caratteristiche meccaniche diverse comporta l’introduzione di fattori di disomogeneità; in questo caso, però, esso consentiva l’unica possibile alternativa a interventi di pesante manomissione materiale e spaziale della preesistenza. Al nuovo solaio in legno è affidato il compito di ripartire le azioni e di trattenere i muri perimetrali sotto sisma; l’orditura principale è costituita da travi a un interasse che varia in funzione delle condizioni di appoggio, ma in genere si aggira attorno a 1,2 m. Il sistema di ancoraggio al muro perimetrale è differenziato: alcune delle orditure principali sono semplicemente appoggiate alla muratura, ma le travi posizionate presso i “telai” resistenti, cui spetta il ritegno delle pareti longitudinali, sono vincolate con sistemi “a cerniera” e “a carrello”, rispettivamente realizzati nei due appoggi. Tale accorgimento costruttivo è particolarmente utile proprio in zona sismica: la struttura muraria e il solaio ligneo, infatti, offrono risposte molto differenti alle sollecitazioni dinamiche, dovute alla diversa rigidezza; i diversi spostamenti che ne conseguono, se impediti, si trasformano in sollecitazioni aggiuntive negli elementi interconnessi. Il vincolo a carrello, ottenuto dalla semplice asolatura oblunga presso le connessioni delle piastre metalliche che mediano l’alloggio della trave nel muro, consente spostamenti relativi differenziati fra orizzontamento ed elevato contenuti entro i limiti della perdita di equilibrio del setto (FIG. 5.48). Superato lo spostamento consentito, il solaio comincia a esercitare sul maschio murario un trattenimento anche intenso, variabile con la grandezza della sollecitazione esterna. Gli eventuali problemi di punzonamento che ne possono scaturire sono a quel punto assorbiti dalla parete, puntualmente irrigidita, per una fascia alta circa 70 cm, con le perforazioni armate orizzontali già descritte. Nel tratto meridionale d’ingresso del fabbricato, la configurazione degli elevati ha impedito di realizzare il solaio intermedio fra il piano terreno e il primo piano: l’interasse originario, più basso di due metri, non era infatti riproponibile e si è così scelto di lasciare in vista uno spazio a due livelli. La disposizione di un anello ottenuto dalla congiunzione di travi metalliche (profilo UPN180) connesse al prospetto murario interno, con perforazioni armate inclinate a 45° nel piano verticale e orizzontale, ha in questo caso consentito il cerchiaggio del vano in sostituzione del solaio in legno.

La vulnerabilità sismica di un edificio non va osservata solo alla scala globale dell’intero organismo, ma può interessare anche solo alcune parti della fabbrica, con manifestazioni di danno indipendenti. In occasione del terremoto umbro-marchigiano del 1997 si è osservata un’ampia casistica di danneggiamenti su edifici storici dovuti alle azioni sismiche. La tipizzazione di alcuni meccanismi di danno ricorrenti ha consentito di individuare per alcuni impianti tipologicamente semplici i “macroelementi” specifici, ovvero le porzioni omogenee di fabbrica caratterizzate da comportamenti unitari e indipendenti dal resto della struttura. L’attivazione di meccanismi parziali può favorire col-

FIGURA 5.48  
 Concerviano (Rieti), abbazia di S. Salvatore Maggiore. Schema del restauro statico effettuato sul corpo occidentale



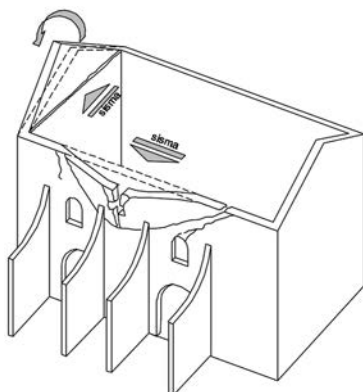
lassi strutturali anche in presenza di forze orizzontali sensibilmente inferiori a quelle necessarie a produrre il ribaltamento di strutture più grandi; questo fenomeno è imputabile principalmente all'assenza di vincoli efficaci fra membrature portanti e alla scarsa capacità di ripartizione delle sollecitazioni nella muratura (Brovelli *et al.*, 1998; Beolchini, Milano, Antonacci, 2007).

La lettura dei dissesti "per macroelementi" aiuta a evidenziare fattori di debolezza localizzati, come è avvenuto per la chiesa di S. Serafino a Montegranaro (Ascoli Piceno). Il santuario, poco lontano dall'abitato, costituito da una chiesa ad aula unica e da un adiacente monastero in mattoni, è stato edificato su una preesistenza monastica crollata nel 1431, negli anni immediatamente successivi alla morte del santo, che aveva vissuto nella zona (1603). All'inizio del 2003 un vasto crollo ha interessato il tratto centrale della copertura ecclesiale, dovuto a infiltrazioni di acque meteoriche e, in parte, anche a un intervento improprio condotto negli anni settanta, che aveva comportato la stesura sul tavolato ligneo di uno spesso strato di conglomerato cementizio alleggerito; tale massetto aveva sovraccaricato le capriate lignee, già sottodimensionate e indebolite per l'attacco di funghi xilofagi. Nello stesso anno, la

Soprintendenza per i Beni Architettonici e per il Paesaggio delle Marche ha intrapreso i restauri in copertura, curando nel contempo di dotare la struttura degli opportuni presidi antisismici. L'analisi statica dell'edificio aveva evidenziato la possibilità d'innesto di cinematismi dovuti al sisma e l'insorgenza di modalità di collasso piuttosto ricorrenti in questo tipo di strutture, concentrate soprattutto sui due timpani e sui fronti longitudinali della chiesa. Le pareti d'ambito dell'aula, pur non essendo sollecitate da spinte (la volta di copertura è a incannucciata), mostravano, soprattutto nel tratto superiore per un'altezza di circa 3 m, una vulnerabilità intrinseca dovuta alla loro snellezza. Un parziale presidio viene infatti garantito in basso dai setti trasversali per la separazione delle cappelle interne, mentre in alto la parete è libera e la muratura, anche per il carico ridotto, presenta una resistenza al taglio piuttosto scarsa (diminuendo la componente legata all'attrito, direttamente proporzionale allo sforzo normale sulla sezione). La presenza di una piccola apertura in corrispondenza del fianco destro della chiesa avrebbe favorito la creazione di tre cerniere, una verticale e due oblique, che individuavano una porzione muraria parabolica (contenuta in basso da contrafforti) a rischio di crollo (FIG. 5.49). Per limitare la deformabilità delle pareti d'ambito è stato inserito un cordolo perimetrale in acciaio, così da ottenere un effetto cerchiante e limitare la formazione della cerniera plastica descritta. Le pareti laterali sono trattenute da tre controventature disposte nei piani di falda (due nelle campate alle estremità e una nella centrale); i tiranti in acciaio, provvisti di manicotto tenditore e saldati al cordolo, sono stati dimensionati in base alla spinta sismica trasmessa dalla capriata e dalla porzione muraria soggetta al cinematismo di crollo descritto.

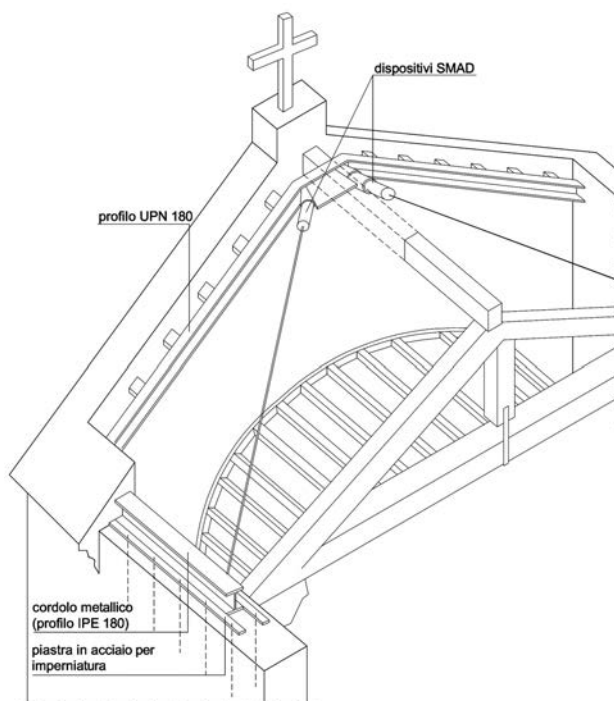
Il meccanismo di collasso relativo ai due timpani interessava la parte più vulnerabile della fabbrica: questi, privi dell'effetto cerchiante offerto dalle pareti laterali, tendevano con il sisma a ribaltare intorno a una cerniera orizzontale. La vulnerabilità dei timpani costituisce un problema ricorrente nelle fabbriche religiose, perché queste strutture, debolmente vincolate (con un comportamento statico assimilabile a quello di una mensola), sono soggette a stati di tensione elevati e sono prive di sistemi resistenti nei confronti delle azioni normali al piano. Alcune recenti opere di adeguamento sismico hanno utilizzato dispositivi "a memoria di forma", riproponendo la tecnologia messa a punto nel restauro statico del timpano della basilica superiore del S. Francesco d'Assisi, dove una serie di dissipatori collega il timpano al corpo retrostante lungo l'intero perimetro del transetto (Croci, 2001), o, più recentemente, nel Duomo di Siena (Martelli, Sonino, Parducci, 2008). La soluzione adottata nella chiesa di S. Serafino può essere considerata un'interessante alternativa della tecnologia appena descritta applicabile a fabbriche storiche minori, le cui dimensioni ridotte consentono, con idonei accorgimenti progettuali, di ridurre il numero dei dispositivi utilizzati e di contenere in tal modo la spesa dell'intervento (si pensi che il costo dei 4 dispositivi rappresenta circa il 30% del *bud-*

FIGURA 5.49  
Montegranaro (Ascoli Piceno), chiesa di S. Serafino. Meccanismi di danno attivabili



Rielaborazione da disegni dello Studio R. Mariani.

FIGURA 5.50  
Montegranaro (Ascoli Piceno), chiesa di S. Serafino. Dettagli del restauro statico



Elaborato grafico Studio R. Mariani.



get complessivo del restauro). Nella chiesa di S. Serafino si è cercato di rendere il comportamento dei timpani il più possibile monolitico, sistemando profili metallici UPN180 d'irrigidimento lungo i lati obliqui dei triangoli; la stabilità della struttura è stata poi assicurata creando sulla sommità un unico vincolo, in grado d'impedire lo spostamento orizzontale del muro. Questo ancoraggio è realizzato posizionando per ogni timpano due tiranti connessi al cordolo metallico perimetrale. Data però la scarsa capacità muraria di ripartire gli sforzi, è possibile che un vincolo puntuale, sollecitato a trazione, favorisca lo strappo in sommità della struttura; per tale ragione, ogni tirante è stato munito di un dispositivo a memoria di forma che funge da "ammortizzatore", ovvero consente di ottenere spostamenti controllati e contenuti entro i 2 cm, riducendo sensibilmente la rigidità del tirante con l'arrivo della scossa sismica (FIG. 5.50).

I dispositivi in lega a memoria di forma sono identificati dalla sigla SMAD (*Shape Memory Alloy Devices*), seguita da due gruppi di cifre rispettivamente relativi alla forza più elevata di progetto, in KN/10, e allo spostamento massimo possibile, in mm; essi sono dispositivi assiali di vincolo, il cui funzionamento sfrutta le proprietà di recuperare la forma originaria da parte di speciali leghe metalliche, con le quali sono confezionati i sottili cavi disposti all'interno di particolari elementi in acciaio. Tali dispositivi sono caratterizzati da un diagramma forza-spostamento con due *plateaux* (pianerottoli) in cui la forza rimane pressoché costante all'aumentare dello spostamento; questa proprietà consente di limitare sensibilmente il carico massimo trasmesso alla struttura con la quale sono collegati. La curva forza-spostamento è inoltre caratterizzata da un ramo "di scarico" inferiore a quello "di carico", ovvero da un ciclo isteretico. A fronte di un'azione sismica, i dispositivi sono quindi anche in grado di dissipare parte dell'energia ad essi trasmessa.

Si è già visto che, in zone mediamente o fortemente sismiche, l'accoppiamento di strutture che possono manifestare modi di vibrazione diversi può risultare pericoloso, oltre che controproducente. Il sistema di ancoraggio cerniera-carrello adottato per le travi di solaio nel S. Salvatore Maggiore, consentendo spostamenti entro determinati limiti, permette di evitare l'insorgere di tensioni addizionali all'azione sismica; un analogo apparato a scorrimento è stato messo a punto per il restauro strutturale dell'abbazia di S. Maria a Val diponte (Perugia; Mariani, 2005). Altre soluzioni possibili cercano nel contempo di garantire la possibilità di movimenti disaccoppiati e la dissipazione di parte dell'energia trasmessa dal terremoto, in modo da limitare l'entità dell'azione che si manifesta sulla fabbrica.

I sistemi di controllo basati sulla dissipazione di energia sfruttano l'effetto favorevole di riduzione della risposta sismica ottenuto da un artificiale incremento delle capacità dissipative della struttura, senza giungere al danneggiamento della costruzione. I dissipatori sono dispositivi che permettono di disperdere energia in presenza di un moto relativo fra le due parti a cui

sono collegati; si distinguono in sistemi “isteretici” (il funzionamento dipende dagli spostamenti relativi) e sistemi “viscosi” (il funzionamento dipende dalle velocità relative). Alcuni dispositivi sono costituiti da un cilindro che si muove all’interno di un fluido viscoso, altri utilizzano polimeri o elastomeri ad alto smorzamento (comportamento visco-elastico). Fra questi ultimi, si distinguono gli apparecchi metallici (in acciaio a basso contenuto di carbonio), in cui la dissipazione è legata alle deformazioni plastiche del materiale; la geometria degli elementi è studiata in modo tale che, in base alle sollecitazioni agenti, la deformazione sia sempre ben distribuita su tutto l’elemento e non si creino pericolosi picchi di tensione (Martelli, Sonino, Parducci, 2008). Dispositivi di questo tipo sono stati installati nella controventatura alloggiata nei piani di falda della copertura nella chiesa aquilana di S. Maria di Collemaggio. Dagli studi condotti sul comportamento della basilica emergeva una significativa vulnerabilità alle azioni sismiche, imputabile alla snellezza delle pareti laterali. Le analisi numeriche avevano evidenziato la possibilità di vibrazioni “in controfase” delle pareti della navata centrale, con conseguenti danneggiamenti dovuti al punzonamento esercitato dalla copertura. Con il sisma umbro-marchigiano del 1997, le testate delle travi alloggiate sulla muratura delle pareti avevano effettivamente prodotto un martellamento, confermando sostanzialmente il meccanismo di deformazione previsto. Si sono pertanto installati due controventi che possiedono al centro un sistema di dissipazione, la cui geometria è studiata in modo tale che, qualunque sia la direzione della sollecitazione, il dispositivo è in grado di danneggiarsi uniformemente, evitando la concentrazione di tensioni e le conseguenti fessurazioni dei muri (Cartapati, 2004).

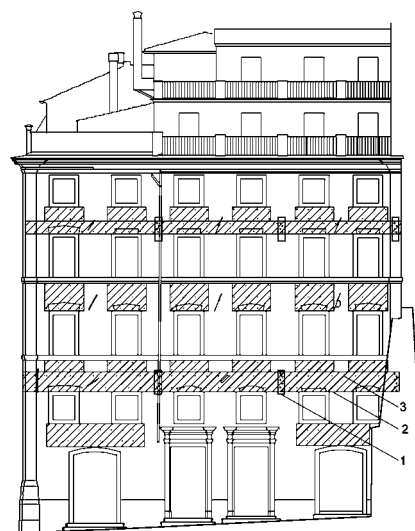
Una strategia di protezione sismica consiste nel limitare le forze d’inerzia che si manifestano sulla fabbrica, piuttosto che affidarsi alla sua resistenza meccanica. Una tecnica, già vista, si basa sull’impiego di sistemi dissipativi, l’altra è quella dell’isolamento sismico; quest’ultima è più adatta a strutture rigide, mentre la dissipazione di energia funziona meglio per strutture alte e flessibili.

I dispositivi d’isolamento sismico sono caratterizzati da alti parametri di smorzamento, bassa deformabilità verticale (necessaria a supportare i carichi della costruzione) e alta deformabilità orizzontale; sono costituiti da strati alternati di neoprene e lamine d’acciaio che, scorrendo reciprocamente, dissipano energia e limitano le forze trasmesse all’edificio entro livelli accettabili. I dispositivi di isolamento agiscono sostanzialmente sulla possibilità di disaccoppiare il moto fra due parti della fabbrica oppure fra terreno ed edificio. Gli isolatori vengono posti generalmente alla base della costruzione (isolamento alla base), in giunti creati appositamente fra l’elevato e le fondazioni. La struttura complessiva, costituita dall’edificio e dagli isolatori, presenta una rigidità inferiore rispetto alla condizione precedente all’intervento; il periodo proprio dell’insieme risulterà dunque più elevato e spostato verso la banda di va-

lori in cui il terremoto è meno dannoso. La corretta applicazione dell'isolamento è perciò possibile solo quando si abbia una buona conoscenza del sito della costruzione (si pensi all'influenza del terreno di fondazione sulla propagazione delle onde sismiche) e del contenuto in frequenza del terremoto atteso; in alcuni casi, come quando si prevedono componenti ampie alle basse frequenze (ad esempio su suoli soffici) l'isolamento può essere addirittura controproducente. La struttura isolata deve rimanere in campo elastico anche durante la sollecitazione sismica: la formazione di lesioni rende la struttura più flessibile e sposta nuovamente verso valori alti il periodo proprio, dove il sisma "filtrato" dagli isolatori diventa pericoloso; per questo motivo, l'inserimento di tali dispositivi si accompagna sempre all'irrigidimento degli elevati (Pasta, 2006). Sistemi di dissipazione energetica sono ancora rari su edifici esistenti, in particolare se di valore storico artistico, anche se non mancano sperimentazioni, condotte ad esempio sulla torre civica di Nocera Umbra (Perugia; Ambrosi, Tataseo, 2003), o studi mirati, come sulla chiesa di S. Giovanni Battista ad Appiano e di S. Croce a Nocera Umbra (Perugia; Indirli *et al.*, 2004).

Oltre ai terremoti, anche il traffico veicolare produce sollecitazioni dinamiche che possono rivelarsi pericolose: le vibrazioni da traffico si diffondono attraverso il manto e il sottofondo stradale, trasmettendosi da qui alle fondazioni e a tutto l'edificio. Queste sollecitazioni sono pericolose soprattutto per gli aggetti architettonici, specie se non ben ancorati alle strutture retrostanti (la norma UNI 9916, recentemente emanata, fornisce una guida alla scelta delle metodologie appropriate per la misurazione, il trattamento dei dati e la valutazione degli effetti delle vibrazioni). La vulnerabilità a questo tipo di sollecitazioni può essere però estesa anche all'intera fabbrica, specialmente con strutture molto snelle come quelle di palazzo Cappelli a Roma. L'edificio, d'impianto pressoché rettangolare, è disposto all'angolo di un isolato; la sua edificazione, condotta fra il XVIII e il XIX secolo a partire da una probabile rifusione di fabbricati preesistenti, ha determinato una sensibile disomogeneità di fattura muraria. Al piano interrato gli ambienti sono coperti con volte in pietra, mentre i solai superiori sono in voltine e profili metallici. Il rilievo del quadro fessurativo aveva evidenziato una spiccata sofferenza dei muri esterni della fabbrica e una vulnerabilità nei confronti delle vibrazioni prodotte dal traffico sulla strada attigua, dovuta soprattutto alla presenza di ampi vani in facciata e all'esilità delle fasce sottofinestra. La differente deformabilità che caratterizzava i maschi murari pieni e i tratti aperti, regolarmente allineati, aveva determinato la formazione di lesioni verticali che correavano in facciata lateralmente alle bucatore; queste avevano isolato il fronte in una serie di setti murari compresi tra le fasce con le finestre. Alcune di queste lesioni avevano dato origine a distacchi anche piuttosto ampi o erano passanti, diverse erano antiche, come testimoniano le rappezzature osservate in fase di cantiere. Sem-

FIGURA 5.51  
Roma, palazzo Cappelli. Indicazione del cerchiaggio in FRP su un prospetto



1. Chiodi Ø20 in acciaio, filettato e bloccato con bullone su piastra, sp.=8mm
2. Chiodi Ø20 in fibra di vetro, filettato e bloccato con bullone
3. Rete bidirezionale in fibra di carbonio

Il restauro statico prevede il cerchiaggio su due livelli con fasce in FRP ancorate ai setti con perforazioni inclinate a 45° (verticali e orizzontali) armate con barre in fibre di carbonio ( $\phi$  18; l = 110 cm).

Elaborato grafico Studio Pr.As – Roma.

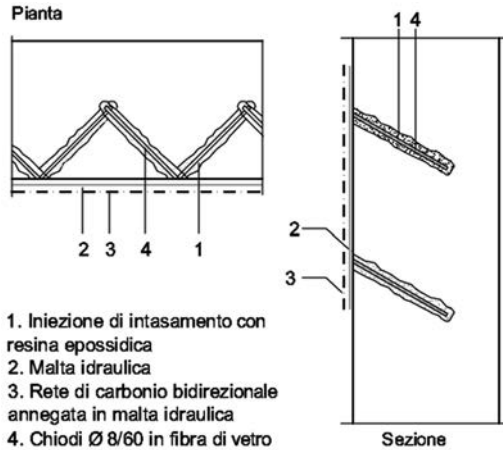
pre al passato risale la disposizione delle catene su più livelli, chiara testimonianza della prolungata tendenza al ribaltamento dei fronti. In aggiunta, le murature dei muri perimetrali presentavano vuoti e cavità interne, osservati in fase di cantiere.

L'esecuzione di iniezioni con malta di calce, che avrebbe consentito di migliorare la risposta strutturale della compagine muraria, era impossibilitata dalla presenza di affreschi e di pregevoli finiture sui paramenti interni. Per moderare la disomogeneità di comportamento fra le due diverse porzioni murarie si è dunque optato, in alternativa, per la realizzazione di un cerchiaggio esterno su due livelli, con l'impiego di fasce FRP (ai livelli inferiori e presso le zone sottofinestra; FIG. 5.51).

L'impiego di fasce in fibra di carbonio comporta la rimozione dell'intonaco antico, così da creare un alloggiamento sufficientemente liscio al materiale: qualsiasi asperità superficiale potrebbe infatti favorire la rottura per tranciamento delle fasce, a causa della loro ridotta resistenza a taglio. In palazzo Cappelli l'intonaco disposto nelle zone in cui è stato localizzato l'intervento era il frutto di una sostituzione della metà del xx secolo. Un incremento d'inerzia dei muri perimetrali nei confronti delle sollecitazioni orizz-

FIGURA 5.52

Dettaglio del sistema di ancoraggio dei tessuti in FRP alla struttura muraria



Elaborato grafico Studio Pr.As – Roma.

zontali è stato infine ottenuto con il loro ancoraggio puntuale ai setti interni mediante piastre in acciaio, necessarie alla ripartizione degli sforzi, connesse con perforazioni inclinate e armate con barre di acciaio (Studio Pr.As – Roma; FIG. 5.52).

#### 5.2.5. Criteri e tecniche d'intervento nelle strutture in elevazione

Le fabbriche storiche sono generalmente provviste di poderosi maschi murari che consentono loro di adattarsi a variazioni dei carichi agenti mantenendo sufficienti livelli di sicurezza nei confronti delle azioni verticali; esse appaiono invece più vulnerabili all'incremento delle spinte, dovuto, ad esempio, alla rimozione degli iniziali presidi, al rilassamento delle catene, alla crescita delle masse sismiche. Il progressivo impoverimento degli apparecchi murari, perlopiù dovuto al degrado della malta, può ridurre significativamente la resistenza meccanica degli elevati; le riduzioni delle sezioni resistenti o l'apertura di nuovi vani possono determinare concentrazioni eccessive di tensioni nelle sezioni residue e il possibile raggiungimento delle resistenze massime, con la conseguente apertura di lesioni da schiacciamento. Quando l'origine dei dissesti è nella riduzione delle membrature resistenti, il ripristino delle sezioni originarie risulta l'operazione più immediata ed efficace, a condizione che si adottino gli opportuni accorgimenti tecnici in grado di garantire la collaborazione fra le due porzioni murarie. In un setto murario, le linee di compressione seguono un percorso verticale che, in caso di demolizioni parziali, viene deviato verso

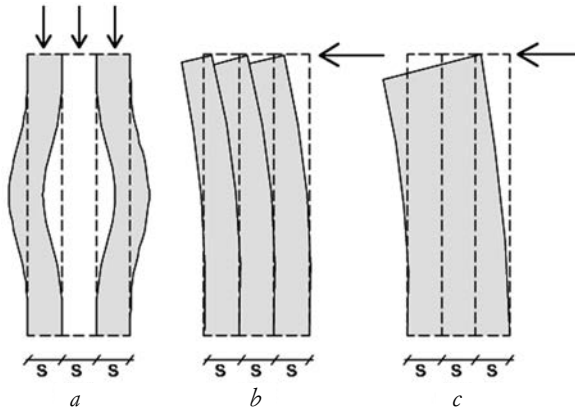
le zone resistenti più prossime; il nuovo assetto statico tende a rimanere invariato anche dopo la reintegrazione muraria, che, in tal modo, rimane non collaborante. L'intervento di richiusura di vani o di nicchie murarie si deve pertanto concentrare nella particolare perizia tecnica necessaria alla procedura d'ingranaggio della nuova costruzione; questa deve rispettare strettamente i tempi di presa e di assestamento, deve utilizzare malta con speciali caratteristiche tixotropiche e deve curare attentamente l'ancoraggio fra elemento lapideo o laterizio e gli stessi giunti di malta, così da spingere le due parti murarie a collaborare strutturalmente. Un chiaro esempio di questo tipo di procedura è stato illustrato per il restauro di palazzo Rossi Gentili da Ravellone a San Severino Marche (Fiorani, 2004a).

La crisi per schiacciamento è particolarmente pericolosa per la natura fragile del crollo a essa associato; gli stati avanzati di crisi, con disgregazione ed espulsione di materiale, sono di difficile soluzione e richiedono la sostituzione del materiale disgregato mediante delicati interventi di scuci e cucì localizzati o la completa sostituzione strutturale, come si è fatto per i piloni dell'abbazia di S. Pietro a Perugia (Tosti, 2003). Anche i rinforzi con pareti armate sono giustificabili solo con dissesti particolarmente gravi, come ultimo rimedio prima della demolizione totale (operazione che, fra l'altro, genera stress rilevanti alle membrature più prossime); esse, infatti, snaturano l'autenticità spaziale, costruttiva e materiale della fabbrica, alterandone inoltre l'originaria distribuzione delle rigidezze, con conseguenze negative sul suo comportamento statico e, soprattutto, dinamico.

Le tecniche d'incremento della resistenza a compressione di una parete dipendono strettamente dalla tipologia muraria con cui essa è costruita. Nelle murature irregolari e con molto legante, le iniezioni di malta consentono d'incrementare la capacità portante riempiendo i vuoti fra le pietre, sostituendo la malta pulverulenta e garantendo così una migliore adesione fra gli elementi lapidei. La composizione della malta d'iniezione dovrebbe essere studiata caso per caso in modo da garantire la massima diffusione della miscela d'iniezione all'interno della muratura. Le iniezioni di malta consentono incrementi di resistenza a compressione fino a un limite massimo pari al 20% rispetto al valore iniziale, se la distribuzione della miscela è buona; in caso contrario, come verificato da alcuni studi, la presenza di aree deboli all'interno del setto può favorire l'insacco localizzato dei dissesti (Borri, Corradi, Vignoli, 2000; Binda, Saisi, 2000, 2002).

Nelle murature con paramenti e nucleo, la capacità portante è influenzata dal loro grado di connessione; un ingranamento debole, infatti, espone i paramenti, generalmente più rigidi e snelli, a crisi per carico di punta e riduce drasticamente la resistenza alle forze orizzontali (FIG. 5.53). Diviene in questo caso essenziale l'efficace distribuzione e connessione dei diatoni, inseriti trasversalmente nella parete; se questi sono insufficienti o mancano del tutto, diverse tecnologie consentono di provvedere all'inserimento di "diatoni artificia-

FIGURA 5.53  
 Danni connessi alla tripartizione dei setti murari



La tripartizione del setto espone i maschi murari a crisi per carico di punta (a) mentre la resistenza nei confronti delle azioni orizzontali si riduce drasticamente. L'inerzia alle forze orizzontali, funzione dello spessore murario, nel caso (b) è pari a  $3b(s^3/12)$ , mentre nei paramenti solidarizzati (c) è tre volte maggiore, pari a  $b(3s)^3/12$ .

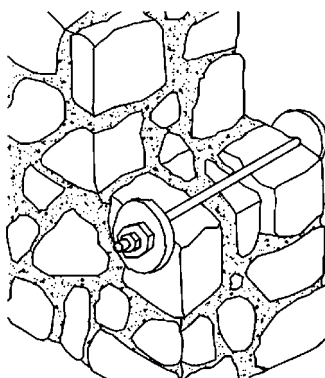
li", ad esempio con l'impiego di sistemi tradizionali (inserendo elementi lapidei perpendicolari al paramento), con elementi in acciaio (FIG. 5.54), in pultruso, come nelle mura di Fano (FIG. 5.55) o in cemento armato (Fiorani, 2004a).

Il conferimento di un'azione cerchiante determina nelle strutture sollecitate a compressione una redistribuzione degli sforzi e migliora significativamente la capacità portante finale. L'azione di confinamento ottenuta dal cerchiaggio può essere realizzata con vari materiali (acciaio, fasce in fibra di carbonio), con elementi di rinforzo generalmente pretesati, in modo da entrare in azione prima di ulteriori cedimenti.

Cerchiaggi con fasce in FRP e in fibre di carbonio sono stati effettuati di recente, soprattutto su colonne successivamente intonacate: si ricordano, fra gli altri, gli interventi nella corte maggiore del convento di S. Maria del Lavello presso Calolziocorte (Lecco; Cruciani Fabozzi, 2004) o in uno dei tre chiostri del convento di S. Domenico a L'Aquila (2007).

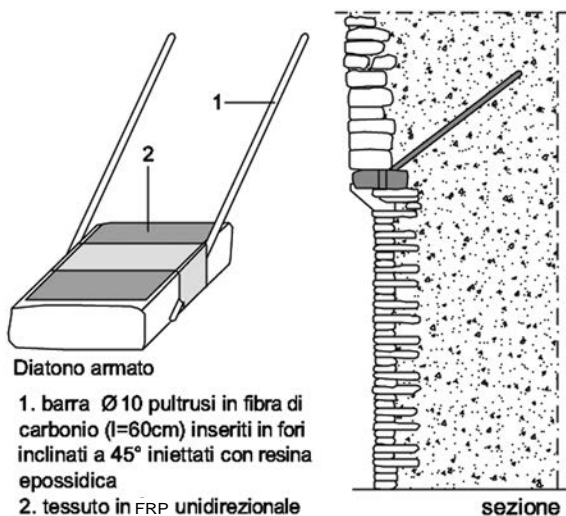
Come già si è illustrato nel paragrafo precedente, i piloni angolari che sorreggono la cupola della basilica di S. Biagio a Montepulciano presentavano segnali inequivocabili di uno schiacciamento incipiente, attribuiti da una puntuale campagna diagnostica alla mancata connessione fra cortina e nucleo interno. Il consolidamento ha cercato quindi d'incrementare la resistenza muraria a compressione, con iniezioni di malta, e di migliorare la distribuzione delle forze, applicando controllate sollecitazioni orizzontali alla sezione dei pilastri. Al posto degli impraticabili cerchiaggi esterni sono state pertanto inserite diverse barre in fibra aramidica accuratamente pretese con martinetti e succes-

FIGURA 5.54  
Tirantini antiespulsivi



I tirantini antiespulsivi sono efficaci sistemi per garantire la solidarizzazione fra paramenti e nucleo murario.  
*Fonte:* rielaborazione da Fiorani (2004a).

FIGURA 5.55  
Mura di Fano (Ancona). Restauro del paramento rinforzato con fasciature in FRP e imperme-  
niature con barre pultruse

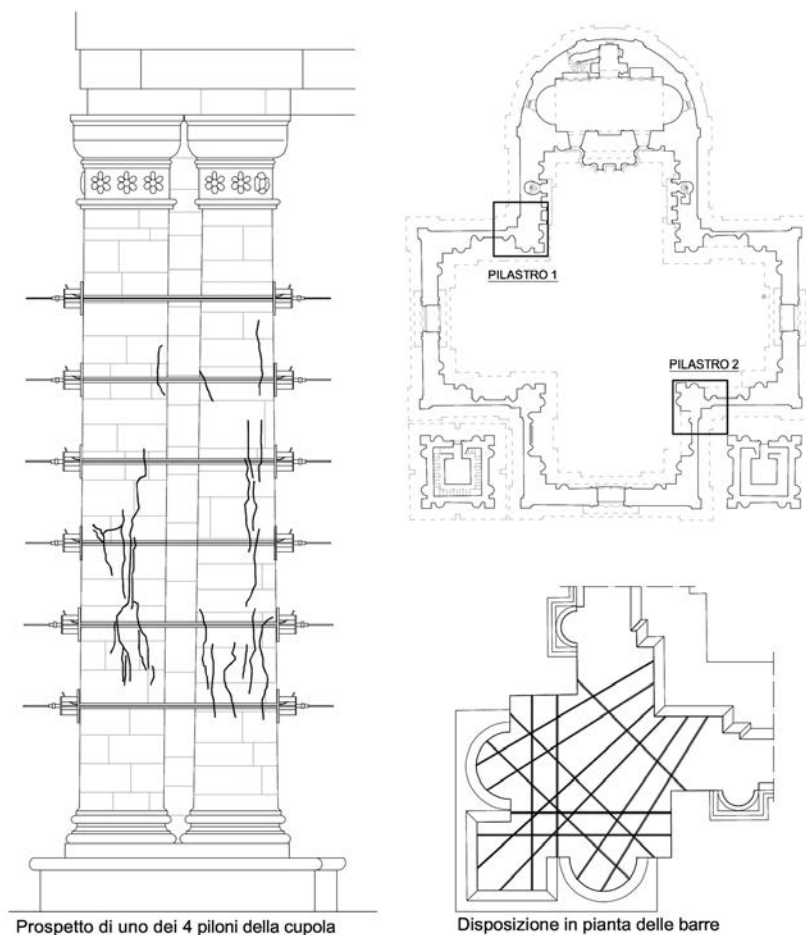


*Fonte:* rielaborazione da Fiorani (2004a).

sivamente iniettate. Dopo 24 ore, a legante indurito, è stata annullata l'azione dei martinetti, le barre sono state tagliate a filo con la muratura e i fori sono stati stuccati; al momento del rilascio, l'accorciamento elastico delle barre è stato in questo modo impedito e si è trasformato in un'azione di compressione



FIGURA 5.56  
Montepulciano (Siena), chiesa di S. Biagio. Restauro statico dei piloni



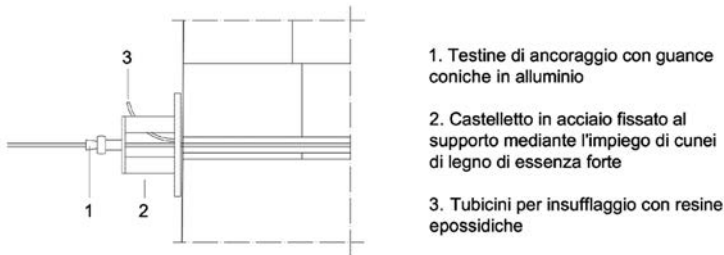
Il consolidamento del pilastro ha comportato l'inserimento di barre in fibra di aramide ( $\varnothing 7,5$ ; foro  $\varnothing 20$ ) pretensionate e ha prodotto un'azione orizzontale sui piloni di 38,4 t/mq.

Elaborato grafico Studio Croci&Associati – Roma.

sul pilone, con direzione normale all'asse (FIGG. 5.56-5.58; Studio Croci&Associati).

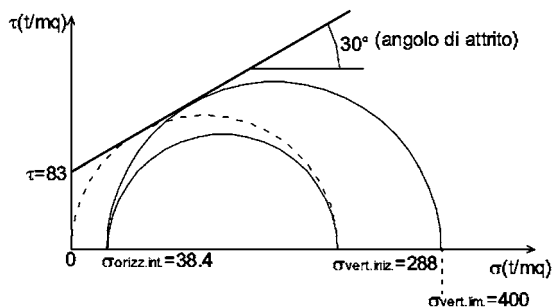
Le azioni orizzontali, come s'è visto, generano stati di tensione poco contrastabili da parte dei setti murari; tali forze, trasmesse da volte o tetti spingenti, sono all'origine dell'attivazione di cinatismi di ribaltamento riscontrabili in molte fabbriche storiche (FIG. 5.59). Gli stessi meccanismi di danno

FIGURA 5.57  
 Dettaglio del sistema di tesatura delle barre tramite martinetto forato, castelletto in acciaio e testine di ancoraggio munite di guance coniche in alluminio



Elaborato grafico Studio Croci&Associati – Roma.

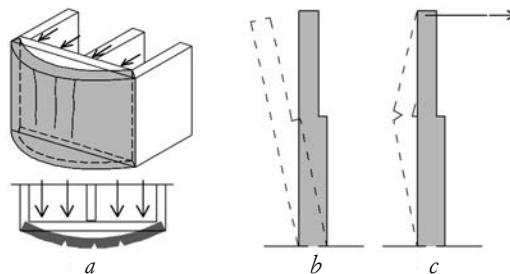
FIGURA 5.58  
 Verifica del consolidamento dei piloni con inserimento di barre in fibra aramidica



La trattazione grafica mediante il cerchio di Mohr ha evidenziato l'incremento teorico della tensione limite che passa dal valore di 288 t/mq a quello di 400 t/mq, con un miglioramento pari a circa il 40% della resistenza iniziale.

Elaborato grafico Studio Croci&Associati – Roma.

FIGURA 5.59  
 Cinematismi di setti murari poco vincolati sottoposti ad azioni orizzontali



Nei setti debolmente vincolati e soggetti a forze orizzontali possono verificarsi spaccamenti (a) e ribaltamenti dell'intero setto (b). In presenza di un vincolo in sommità, la rottura può avvenire in posizione intermedia (c).

generano poi ulteriori dissesti che coinvolgono coperture e volte, con conseguenti spostamenti delle imposte. L'eccentricità del peso proprio della porzione muraria fuori piombo determina sollecitazioni flessionali nelle sezioni sottostanti e conseguenti stati di trazione che possono parzializzare progressivamente il setto stesso. Il recupero della verticalità del fronte richiede una notevole perizia tecnica e comporta significativi stress strutturali; la loro esecuzione va dunque ben riflettuta e limitata ai casi in cui sia indispensabile per la sicurezza statica del muro stesso e dell'intero organismo architettonico. Si ricorda comunque la buona riuscita di raddrizzamenti murari anche complessi, come ad esempio quello condotto sul fronte esterno del palazzo del Capitolo dei canonici presso la cattedrale di Gubbio (studio Tosti; Fiorani, 2004a).

La rimozione delle sollecitazioni orizzontali statiche con sistemi di assorbimento delle spinte (come incatenamenti o cerchiaggi esterni), la realizzazione di ammorsature e l'inserimento di vincoli addizionali (ad esempio mediante cuciture armate) costituiscono, con le iniezioni di malta, i provvedimenti più diffusi. A essi si aggiunge il miglioramento della resistenza a presso-flessione, operazione nettamente più impegnativa, che deve conferire alla muratura una capacità di resistenza a trazione; tale obiettivo viene perlopiù perseguito con la disposizione di fasce in composito e l'inserimento di barre metalliche; non tutti gli studiosi concordano però sulla reale efficacia di queste operazioni (Gallo Curcio, 2007).

#### 5.2.6. Il recupero della capacità portante delle strutture lignee

Nelle costruzioni storiche, la copertura di spazi più o meno ampi viene in genere affidata alle strutture voltate o in legno, unico materiale "tradizionale" che presenta una discreta capacità di resistenza a trazione (FIG. 5.60). L'attacco di funghi e insetti xilofagi può determinare, però, il serio ammaloramento delle strutture lignee e la conseguente riduzione delle sezioni resistenti, soprattutto se il materiale è poco aerato (come avviene con le testate delle travi anegate nella muratura o nei sottotetti non ventilati).

In presenza di deterioramenti gravi, la sostituzione della materia originale diventa inevitabile qualora non si voglia ricorrere a protesi sostitutive di affiancamento; tale riduzione può essere però confinata alla sola porzione ammalorata, che viene sostituita con opportuni elementi in legno, acciaio o resina in grado di sostituire i tratti originari di appoggio (Tampone, 1996). Protesi contrassegnate da una elevata rigidità (come quelle in betoncino epossidico utilizzate in passato) trasformano il vincolo catena-puntone da "cerniera" a "incastro" alterando gli schemi di collasso originari (Munafò, Grilli, 2005). Decisamente più compatibile è la disposizione di protesi di legno massello congiunte a tassello con le parti preesistenti, alle quali vengono ulteriormente assicurate con fasciature o barre in vetroresina o acciaio, come nel restauro della copertura della chiesa dei SS. Sebastiano e Rocco in San Vito Romano

FIGURA 5.60  
Tensioni presenti nelle sezioni degli elementi lignei di solai e capriate

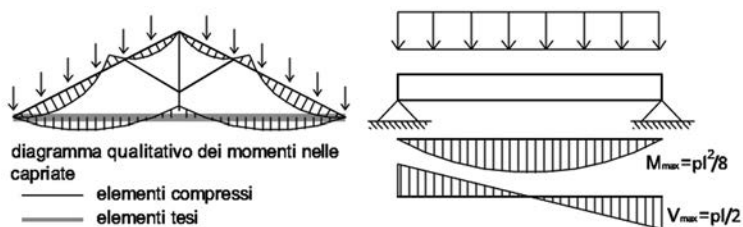


FIGURA 5.61  
Boboli, Scuderie Reali della Pace. Dettaglio della protesi in legno lamellare disposta nelle capriate

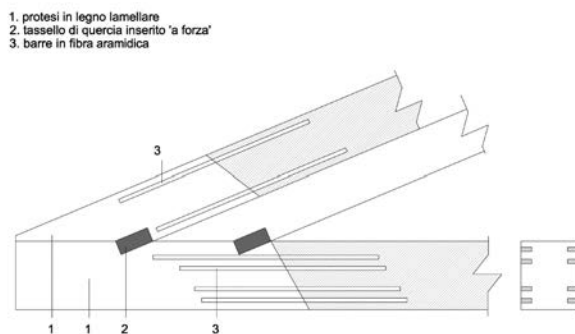
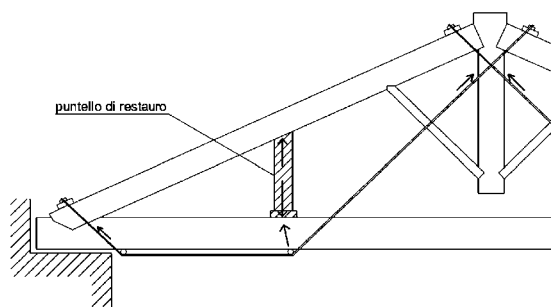


FIGURA 5.62  
Milano, chiesa di S. Carpoforo. Restauro delle capriate in legno



L'introduzione di un puntello ligneo nella capriata riduce la snellezza del puntone.

Fonte: rielaborazione da Jurina (2002).

(Roma; cfr. Fiorani, 2003b); protesi in legno lamellare sono state collegate con barre in acciaio e tasselli di quercia nelle capriate delle Scuderie Reali della Pace in Boboli (Firenze; cfr. FIG. 5.61; Caselli, Mannucci, 2005).

Le capriate del monastero di S. Clara a Pavia presentavano catene parzialmente rovinate e connesse a un pregevole cassettonato su cui era impossibile operare direttamente: si sono dovuti pertanto creare appositi elementi sostitutivi per l'appoggio dell'orditura primaria; questi intercettano i puntoni a una quota più alta e si collegano reciprocamente con un tirante metallico che supplisce le carenze statiche dell'antica struttura. Un sistema di bilancini e cavi post-tesati impedisce al nuovo sistema di appoggio di esercitare un momento sulle murature d'ambito (Jurina, 2003b). Si tratta di una soluzione progettuale interessante, che mostra come sia possibile aumentare le capacità prestazionali delle strutture lignee antiche tramite l'inserimento di elementi metallici ausiliari; questi ultimi possono risolvere i problemi del sottodimensionamento delle strutture originarie, della riduzione della sezione resistente dovuta al degrado del materiale e, in generale, tutte le questioni legate all'incremento dei livelli di sicurezza statica. La logica di questi interventi consiste nel modificare lo stato tensionale delle sezioni lignee con l'inserimento di vincoli aggiuntivi e sistemi metallici, leggeri e reversibili, che convogliano le forze negli elementi più resistenti. Nella chiesa di S. Carpoforo, a Milano, l'eccessiva snellezza dei puntoni è stata ridotta con l'introduzione di due ulteriori puntelli lignei appoggiati alla catena; le sollecitazioni trasmesse a quest'ultima sono rimandate, con un sistema di cavi metallici, alla posizione più favorevole, al colmo della capriata, mentre un sistema di tesatura, opportunamente registrabile nel tempo, permette la messa in tensione dei cavi (FIG. 5.62, Jurina, 2002).

Le strutture in legno presentano spesso deformazioni significative dovute al comportamento viscoso del materiale; il recupero della forma è però raramente opportuno, in quanto costringe a un mutamento brusco e improvviso delle sollecitazioni agenti sulle sezioni (Tamponi, 1996). Nelle travi di solaio, queste deformazioni rendono però difficoltosa la connessione con le strutture di rinforzo, che deve ad ogni modo essere garantita, eventualmente anche con mirati accorgimenti ausiliari, mentre nelle capriate i rilassamenti viscosi possono comportare un abbassamento del monaco che, oltre a inficiare il ruolo dei saettoni, può determinare il punzonamento della catena; una semplice soluzione, in quest'ultimo caso, può essere costituita dal taglio della porzione inferiore del monaco, verificando preventivamente che la sezione così ridotta sia sufficiente ad assorbire le sollecitazioni trasmesse dai saettoni (*ibid.*).

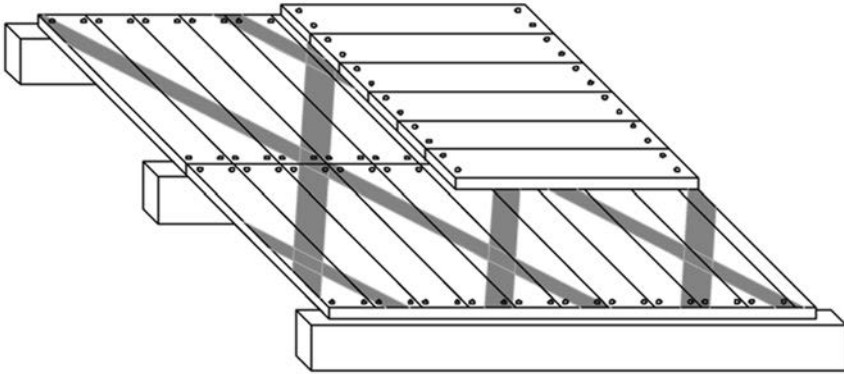
L'esigenza di aumentare le capacità portanti dei solai è spesso legata alla necessità di soddisfare nuove richieste prestazionali connesse a cambi di destinazione d'uso e agli standard proposti dalla normativa vigente. Gli orizzontamenti devono sostenere i carichi verticali e garantire una sufficiente rigidità nel piano, così da consentire la trasmissione delle azioni orizzontali derivanti dai sismi ai muri d'ambito. Nei decenni passati, l'eccessiva deformabilità delle strutture lignee e la scarsa fiducia nelle loro capacità di ripartizione avevano

portato alla rimozione sistematica dei solai antichi o al loro affiancamento con nuove strutture a cui veniva demandata l'intera funzione statica. L'esperienza del sisma umbro-marchigiano ha però definitivamente mostrato come l'inserimento di solai in latero-cemento all'interno di fabbriche in muratura non determini un comportamento "sicuro" e abbia al contrario costituito esso stesso una concausa dei dissesti (Borri, 2003a). Per questo motivo, in presenza di strutture ben conservate e dimensionate, interventi di miglioramento e di rinforzo del solaio originario sono preferibili alla pratica radicalmente sostitutiva, anche sotto l'aspetto strettamente strutturale. La realizzazione di un massetto armato collaborante conferisce all'orizzontamento un significativo irrigidimento nel piano e ne incrementa anche l'inerzia flessionale perché rialza la posizione dell'asse neutro; se, nel contempo, si cura il vincolo fra piano e travi lignee portanti, si riesce a incrementare anche la resistenza flessionale di queste ultime. Solai in legno ben dimensionati e conservati possono essere dotati di un doppio tavolato ligneo perpendicolare al preesistente, posto in sostituzione del massetto cementizio sopra descritto (Modena, Tempesta, Tempesta, 1998); questo può essere ulteriormente irrigidito con fasce resistenti in fibra di carbonio, disposte a croce fra i due tavolati (FIG. 5.63, CNR, DT 201:2005). Nel restauro di palazzo Alberoni a Roma, un solaio in legno è stato consolidato con un doppio strato di tavole in lamellare, mutuamente incollate con resina epossidica e collegato alla struttura originaria con barre metalliche e piastre zincate; esso è stato ancorato alle pareti perimetrali con piastre metalliche zincate dotate di barre filettate imperniate con resina epossidica alle membrature perimetrali (Pierdominici, 2004).

Le lesioni più diffuse nelle travi staticamente insufficienti sono di taglio (ad andamento subverticale), in corrispondenza degli appoggi, e di flessione, perlopiù in mezzera; quest'ultime possono seguire le fibre e determinare la divisione della trave in due elementi resistenti distinti, con una riduzione della capacità portante e un aumento della deformabilità. Interventi di risarcimento delle lesioni, anche da fessurazione, con malte o elementi lignei, possono comportare però l'insorgenza di tensioni parassite dovute ai fenomeni di dilatazione termica differenziale (Munafò, Grilli, 2005). Un nuovo incremento della capacità portante delle travi può essere ottenuto tramite strategie differenti; la scelta dell'una o dell'altra soluzione dipende, oltre che da considerazioni di natura statica, anche dalla fattibilità pratica e dai risvolti sul piano figurativo. I rinforzi applicati all'estradosso richiedono la rimozione dei pavimenti e di tutti gli strati superiori per aumentare la sezione resistente; si impiegano in genere profili metallici o il legno, naturale o lamellare, come in palazzo Alberoni (FIG. 5.64).

Se le travi antiche non sono decorate, i nuovi elementi possono essere anche affiancati all'orditura primaria, preservando così solaio e pavimentazione soprastante; in funzione delle esigenze statiche, gli elementi di rinforzo possono essere costituiti da semplici piatti in acciaio, come in alcune sale dell'ospizio annesso alla chiesa di S. Luigi dei Francesi a Roma, oppure da profili

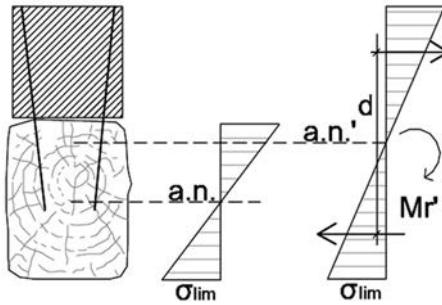
FIGURA 5.63  
Irrigidimento di un solaio in legno



Il conferimento di una maggiore rigidità nel piano può essere ottenuto attraverso la disposizione di un secondo tavolato eventualmente rinforzato con fasce in CFRP.

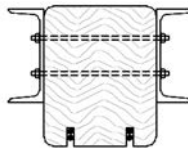
Fonte: rielaborazione da CNR, DT 201:2005.

FIGURA 5.64  
Roma, palazzo Alberoni. Ingrandimento di una sezione resistente di una trave in legno



La disposizione di profili resistenti aggiuntivi nell'estradosso di una trave crea un sistema composto, caratterizzato da una maggiore resistenza per l'incremento del braccio delle forze interne.

FIGURA 5.65  
Roma, palazzo Mattei. Disposizione di profili metallici all'intradosso delle travi lignee nei solai associata a un rinforzo in zona compressa con l'inserimento di trecce in fibra aramidica



Elaborato grafico Studio SPC – Roma.

metallici di tipo UPN, come in palazzo Mattei (FIG. 5.65). Al contatto fra la superficie metallica e quella lignea è opportuno inserire uno strato isolante (ad esempio un foglio di sughero), in modo da prevenire la formazione di condensa superficiale.

I solai in legno di palazzo Seri di Feltre (Belluno) presentano travi aggiuntive, lignee o metalliche, posizionate a metà dell'interasse dell'orditura primaria, così da dimezzarne il carico (Jurina, 2003a); in palazzo Altemps a Roma, invece, un intervento simile ha comportato l'inserimento di putrelle metalliche. Nel deambulatorio del palazzo Pallavicino a Cremona, un sistema di travi metalliche fornisce appoggi puntuali alle travi soprastanti, riducendone la sollecitazione flessionale (*ibid.*). Ancora appoggi aggiuntivi sono stati disposti nei solai lignei presso l'abbazia di S. Maria in Valdioponte (Mariani, 2006a) e nel palazzo Pallavicino di Cremona; in quest'ultimo, in particolare, un sistema in acciaio di cavi strallati, ancorati alle murature perimetrali, e puntelli telescopici, che realizzano due appoggi intermedi a ciascuna trave, riduce significativamente le sollecitazioni flessionali (Jurina, 2003b; FIGG. 5.66-5.68).

L'uso di materiali compositi nel restauro di strutture lignee presenta alcuni vantaggi dal punto di vista della compatibilità fisico-chimica (Borri, Corradi, Tampone, Trimboli, 2002), della leggerezza e della lavorabilità in cantiere. L'apposizione di strisce resistenti all'intradosso consente di sopperire le carenze statiche a trazione delle travi (FIG. 5.69); le prove sperimentali mostrano come, a fronte di un trascurabile incremento delle masse, si registri un significativo incremento di rigidezza e di resistenza ultima (Borri, Corradi, Speranzini, 2001).

Gli elementi in pultruso, lavorati in lamelle o profilati e utilizzati come le strutture metalliche, sono meno rigidi di queste e offrono prestazioni migliori dei nastri, conservandone le caratteristiche di compatibilità fisico-chimica, leggerezza e lavorabilità (Borri, Terenzi, Bartoloni, Caliterna, 1999). I solai lignei di palazzo Callicola a Spoleto sono stati rinforzati inserendo all'estradosso travi pultruse in GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymers*) rese collaboranti con l'orditura lignea tramite connettori in composito; un'attenta sagomatura in opera della struttura in FRP ha evitato la demolizione delle testate dei travetti (FIG. 5.70). Un'armatura di ripartizione con rete in fibra di vetro nel massetto di calce evita la concentrazione di carico in corrispondenza della trave in pultruso; le prove condotte al termine dell'intervento hanno confermato un significativo miglioramento della rigidezza e del carico ultimo (Borri, Giacomini, Giannantoni, 2005).

Nella seicentesca villa Litta a Milano, la destinazione a biblioteca di alcune sale al secondo piano ha richiesto l'adeguamento statico dei solai lignei con intradosso dipinto conservato grazie a un intervento "ibrido", che prevede l'inserimento di elementi in carbonio all'intradosso e profili metallici a sezione quadrata come rinforzo a compressione (FIG. 5.71, Chiaradia, Giacomini, Quaglia, 2005).



FIGURA 5.66  
Riduzione dello stato tensionale delle travi a seguito della disposizione di appoggi aggiuntivi

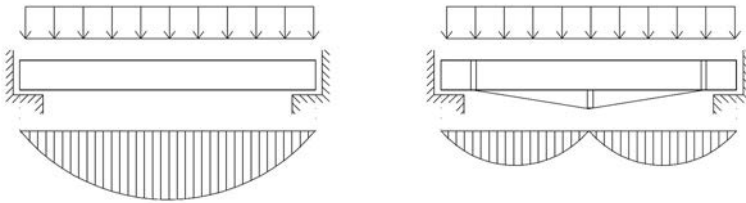
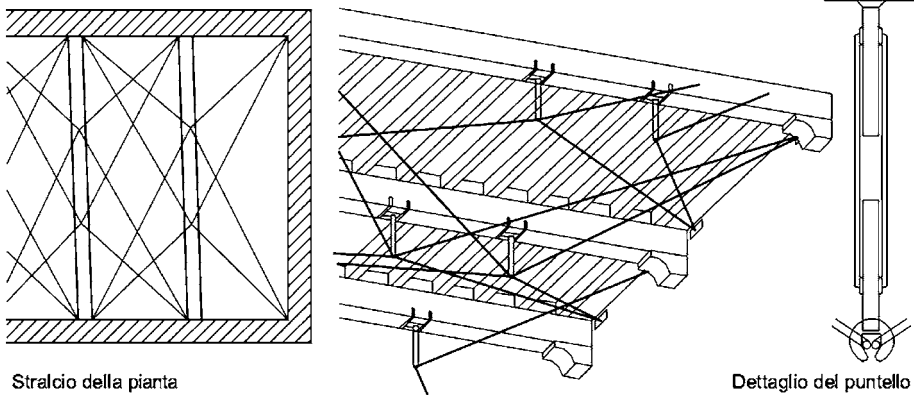


FIGURA 5.67  
Cremona, palazzo Pallavicino. Restauro strutturale con disposizione di appoggi puntuali nelle travi



Fonte: rielaborazione da Jurina (2003b).

FIGURA 5.68  
Roma, palazzo Altemps. Intervento di restauro strutturale sul solaio del salone nobile

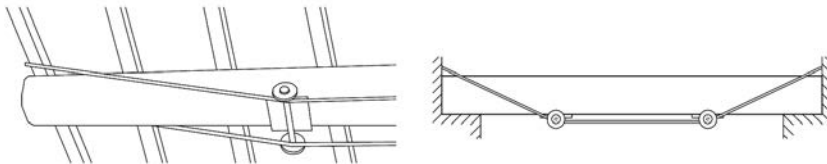
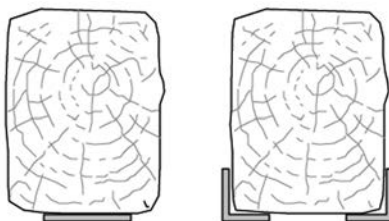


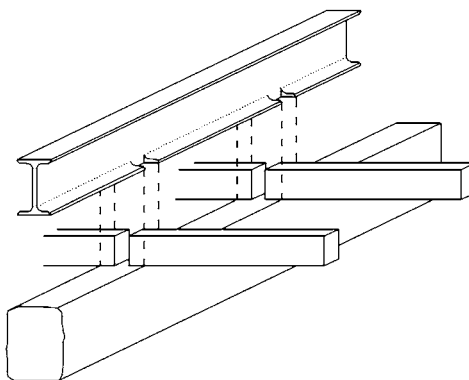
FIGURA 5.69  
Consolidamento di travi in legno con fasce in FRP



L'incremento della resistenza a trazione delle travi in opera può essere ottenuto disponendo fasce in FRP all'intradosso.

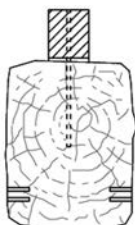
Fonte: rielaborazione da CNR, DT 201:2005.

FIGURA 5.70  
Spoleto (Perugia), palazzo Callicola. Incremento della capacità portante dei solai



L'attenta sagomatura in cantiere del profilo in pultruso ha consentito di disporre il rinforzo all'estradosso risparmiando le testate dei travetti.

FIGURA 5.71  
Milano, villa Litta. Restauro strutturale di un solaio

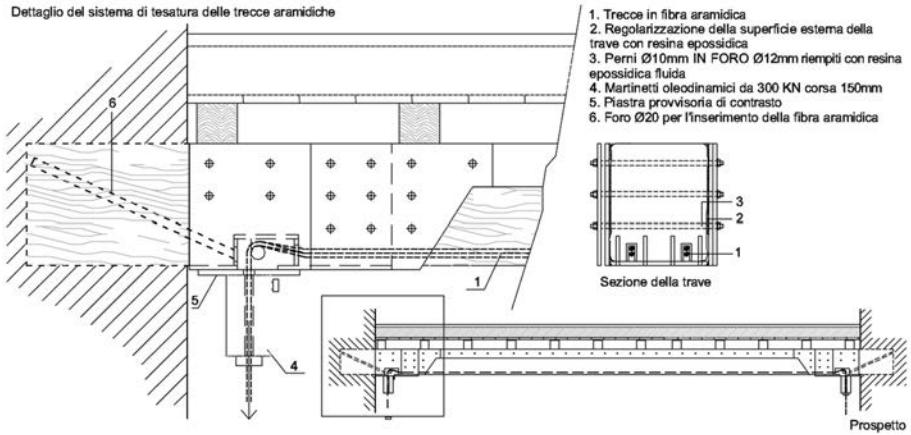


Un profilo quadrato in acciaio incrementa la resistenza in zona compressa e funge da rinforzo nei confronti delle sollecitazioni taglianti, responsabili di alcune lesioni agli appoggi delle travi. La disposizione di lamelle in fibra di carbonio incollate con adesivo epossidico all'interno di opportuni intagli laterali incrementa la resistenza a trazione e garantisce la conservazione dei solai affrescati.

Fonte: rielaborazione da Chiaradia, Giacomini, Quaglia (2005).

FIGURA 5.72

Roma, palazzo Mattei. Dettaglio del sistema di inserimento e messa in tensione delle trecce in fibra aramidica nelle travi del solaio



Elaborato grafico Studio SPC - Roma.

Il restauro statico di palazzo Mattei presenta un'interessante casistica di soluzioni messe a punto a problematiche ricorrenti con l'inserimento di nuove funzioni all'interno degli edifici storici. Il palazzo sorge nell'isola dei Mattei a Roma ed è stato costruito a più riprese fra la fine del 1500 e l'inizio del secolo successivo. Tutti i solai dell'edificio sono in legno, quelli del piano nobile presentano raffinate decorazioni floreali sia nelle travi maestre che nei travicelli soprastanti; essi sono stati rinforzati per rispondere all'aumento significativo dei carichi d'esercizio previsti (da 200 kg/mq per le sale a 400 kg/mq per la biblioteca), tenendo conto anche del diverso stato di conservazione delle strutture e attraverso un'adeguata varietà di soluzioni progettuali. Nelle sale di maggior pregio, l'orditura principale è stata consolidata disponendo lungo le facce laterali due piatti in acciaio imperniati e collegati con due trecce in fibra aramidica; queste ultime sono state inserite dentro intagli ricavati nell'intradosso della trave e pretensionate, così da ottenere il parziale recupero della deformazione e ridistribuire le sollecitazioni, riducendo le trazioni all'intradosso. La tesatura delle trecce è stata effettuata tramite martinetti idraulici disposti sotto la trave, ruotando le fibre, sfioccate all'estremità, attorno a un perno del sistema; gli intagli sono stati poi riempiti con resina epossidica, in modo da trasferire la sollecitazione a tutta la trave. All'indurimento della resina, scaricati i martinetti, le estremità delle trecce sono state ancorate al perno metallico, con la parte sfioccata inserita in un foro diagonale praticato presso l'appoggio della trave, a costituire una barra rigida (FIG. 5.72). Sui solai di minor pregio, a cui spetta anche un maggiore im-

pegno statico, si è operato affiancando le travi lignee con due profili metallici di tipo UPN.

Anche i travetti dei solai sono stati rinforzati con soluzioni diverse a seconda delle esigenze strutturali e delle deformazioni presenti; le diverse tipologie d'intervento prevedono l'inserimento di profili metallici a T rovesciata (eseguito in alcuni casi, dopo il puntellamento della struttura, per consentire il parziale recupero della freccia d'inflessione) o la disposizione di un rompitratta costituito da un profilo in acciaio IPE (progetto dello Studio SPC – Roma, 2003).

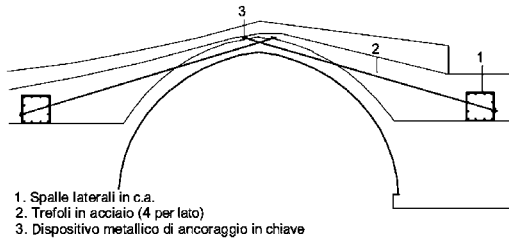
### 5.2.7. Il restauro statico di archi e volte

L'analisi dei meccanismi di danno che interessano queste strutture non può prescindere da un'indagine estesa all'intero organismo e più in particolare alla verifica, a ribaltamento e a presso-flessione, delle spalle su cui esse s'impostano. La stabilità delle costruzioni d'ambito, soprattutto, è di primaria importanza, perché i movimenti o cedimenti dei sostegni possono trascinare le strutture soprastanti e, in ogni caso, influiscono negativamente sul valore della controspinta offerta a volte e archi; la sicurezza statica delle costruzioni spingenti è, dunque, prioritariamente assicurata da un consolidamento delle strutture d'imposta e dall'eventuale disposizione di sistemi per l'assorbimento delle spinte (tiranti, cerchiaggi, speroni). La seconda condizione per l'equilibrio è che la curva delle pressioni cada, in ogni sezione, all'interno del nocciolo d'inerzia, così da evitare la progressiva parzializzazione della struttura e la formazione di fessurazioni. La funicolare dei carichi è funzione della forma del carico agente; le volte, ad esempio, sono vulnerabili all'azione di forze concentrate, mentre i carichi distribuiti (meglio se maggiori presso i rinfianchi) determinano una curva funicolare pressoché semicircolare, che ben si adatta agli archi a tutto sesto e alle volte a botte (Gallo Curcio, 2007).

Una logica d'intervento basata sulla modifica del carico agente (e in particolare della sua "forma": diffuso, concentrato o irregolarmente distribuito) trova pertanto interessanti applicazioni nella predeterminazione di funicolari dei carichi congeniali alle curvature geometriche di archi o volte. Il restauro strutturale del ponte di Apecchio, a Pesaro, risalente all'inizio del XIII secolo, si basa proprio sulla redistribuzione degli sforzi agenti, in modo da ricentrare la curva delle pressioni entro la geometria a sesto acuto dell'arco (FIG. 5.73; Beer, Pallotta, 2003).

In genere la modifica dei carichi agenti su strutture ad arco o a volte è difficilmente realizzabile e si cerca piuttosto di ampliare la sezione resistente, così da offrire alla curva delle pressioni un margine più ampio di applicazione. L'incremento della sezione è teoricamente ottenibile con un qualsiasi materiale, a condizione che questo sia più rigido rispetto alla muratura della volta da consolidare (o almeno rigido come quest'ultima), in modo che l'eventuale incremento di carichi venga assorbito dalla nuova struttura. Il calcestruzzo, sia

FIGURA 5.73  
 Ponte di Apecchio (Pesaro). Restauro strutturale



Lo studio della curva delle pressioni aveva evidenziato la necessità di disporre presso la chiave un sovraccarico di circa 3.000 kg/m, difficilmente applicabile. Una sollecitazione analoga è stata ottenuta con la messa in opera di tiranti opportunamente dimensionati, posizionati e pretensionati.

Fonte: rielaborazione da Beer, Pallotta (2003).

per caratteristiche meccaniche che per facilità di posa in opera, si presta molto bene a questo tipo di operazioni: esso viene applicato come massetto, dopo un'accurata pulizia della superficie estradossale e un'eventuale scarnitura dei giunti (utile a favorire l'aderenza fra le due strutture). Il letto di malta può essere o meno armato: la struttura, infatti, lavora a compressione e l'eventuale presenza di armatura, non indispensabile, le conferisce un'inedita capacità di resistenza a trazione, così che la curva delle pressioni può anche uscire dal nocciolo; l'efficacia dell'intervento è affidata alla collaborazione esistente fra muratura antica e parte soprastante, spesso assicurata con l'inserimento di perni metallici, sebbene alcuni autori mostrino perplessità sulla loro reale efficacia e necessità (Gallo Curcio, 2007). L'applicazione di una cappa all'estradosso altera certamente il funzionamento statico della volta in muratura, la rigidità del calcestruzzo, infatti, impedisce alla volta di microfessurarsi e di trovare così nuovi assestamenti nel caso in cui le strutture portanti si muovano; i meccanismi di collasso, di conseguenza, ne risultano fortemente modificati. Il peso del massetto, inoltre, oltre a determinare un aggravio del carico sulle strutture verticali, incrementa le masse sismiche. Si conferma ancora una volta la necessità di effettuare la verifica statica sull'intera fabbrica anche in presenza di soli consolidamenti localizzati.

Il regime idrometrico della fabbrica risulterà infine modificato irreversibilmente con la disposizione di un letto impermeabile sull'estradosso della volta, problema rilevante soprattutto in presenza di intradossi affrescati, che possono essere inoltre soggetti a incontrollabili percolazioni di malta.

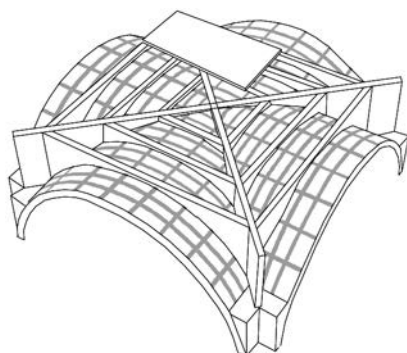
Come si è già visto, una problematica ricorrente in volte e archi è la perdita della curvatura originaria, che, nell'alterare la logica statica delle strutture, può giungere a minacciarne seriamente la stabilità. Nel monastero di S. Salvatore Maggiore sul Letenano, le volte a botte lunettate superstiti dell'aula ecclesiale si presentavano fortemente depresse a causa della rotazione delle pareti perimetrali; il recupero della curvatura originaria è stato ottenuto con l'impie-

go di martinetti a vite azionati manualmente, imprimendo settimanalmente modeste sollecitazioni per consentire alla struttura di trovare un graduale assestamento alle deformazioni imposte. Quest'intervento ha consentito di recuperare la piena funzionalità statica delle volte; esse, infatti, sono state risarcite nell'intradosso con opportune "rinzeppature" in laterizio e sono state trattate nell'estradosso con puntuali sarciture con malta, così da recuperare la coesione fra gli elementi lapidei sconnessi; al termine del consolidamento sono stati disposti sull'estradosso archi diagonali di scarico ottenuti con la sagomatura di travi metalliche con profilo a "C" e la loro imperniatura alla struttura muraria (progetto delle strutture dello Studio Tosti, 1990; Fiorani, Palmerio, Riccini, 1998).

Questa logica di rinforzo puntuale è simile a quella utilizzata più di recente da diversi interventi con nastri di materiale fibrorinforzato; nel Palazzo dei Priori ad Assisi, ad esempio, l'impiego degli FRP ha risolto i problemi legati alla presenza di affreschi lungo l'intradosso delle volte. La volta a crociera al di sotto della cosiddetta "Sala dei passi perduti" è stata consolidata con nastri di fibre di carbonio allettati su una matrice di resina epossidica lungo i due archi diagonali e i quattro perimetrali; la volta a padiglione lunettata che copre la stessa sala, sensibilmente depressa e lesionata a seguito del terremoto umbro-marchigiano, ha richiesto un intervento più complesso. Le scosse sismiche avevano in realtà riaperto fessure già esistenti e significative dell'originaria vulnerabilità della struttura, realizzata in mattoni a una testa secondo un profilo molto ribassato e sormontata da una guscio spesso 5 cm apparecchiato in foglio. Il recupero della curvatura della volta è stato condotto sempre tramite martinetti a vite agenti su una complessa centinatura lignea ovale appoggiata alla volta mediante speciali accorgimenti, per evitare danni agli affreschi. Sono seguite la reinzeppatura delle maggiori lesioni dovute al recupero della deformazione estradosale con cunei in legno (in quercia quelle permanenti e in abete quelle provvisorie), la rimozione per piccoli cantieri della malta originaria e la sua sostituzione con malta tixotropica. L'intervento sulle volte è stato accompagnato dal consolidamento degli elevati e dall'inserimento di tiranti per l'assorbimento delle spinte, ancorati alla pareti e alloggiati nello spessore del piano di calpestio montato su frenelli. La costruzione dei frenelli, elementi in muratura appoggiati sull'estradosso delle volte, è funzionale alla creazione del piano orizzontare, evita la disposizione di riempimenti e migliora il comportamento strutturale della volta, opponendosi alle eventuali deformazioni (FIG. 5.74; Borri, 2003b).

I frenelli possono essere associati alla disposizione di fasce in fibra di carbonio sull'estradosso della volta, come si è fatto nel restauro del palazzo Elmi-Pandolfi di Foligno (Perugia), dove anche il tratto superiore del muro è stato fasciato con lo stesso materiale. La struttura così ottenuta trattiene le pareti contrapposte e garantisce un irrigidimento ancor più efficace; le verifiche numeriche hanno dimostrato quasi il dimezzamento degli spostamenti attesi in

FIGURA 5.74  
Disposizione di fasce resistenti in FRP su una volta a crociera



I frenelli seguono la giacitura degli archi resistenti delle unghie e si oppongono alla loro deformazione.

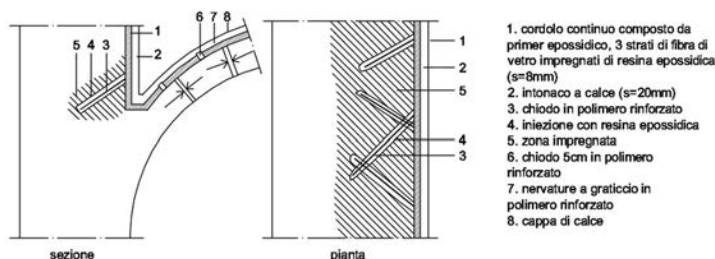
chiave e presso le imposte della volta a botte a padiglione che copre la sala consiliare del palazzo (Borri, Giannantoni, 2003).

L'impiego di materiali polimerici nel consolidamento delle volte è sempre più diffuso proprio in virtù della loro leggerezza, i nastri in FRP sono applicati nelle zone sottoposte a trazione per impedire la formazione di lesioni e i conseguenti cinatismi di collasso; in tal modo, però, la statica dell'arco risulta modificata, poiché la funicolare dei carichi può indirizzarsi al di fuori del nocciolo d'inerzia. I nastri in FRP possono essere applicati a cavallo delle lesioni o in corrispondenza delle zone dove queste sono attese (ad esempio all'intradosso presso la chiave e all'estradosso presso le reni) oppure a formare reticoli resistenti a trazione che interessano tutta la struttura. Alcuni studi condotti su modelli in scala hanno dimostrato che l'effetto ottenibile dai rinforzi in materiale composito non è strettamente dipendente dal numero di nastri applicati, ma piuttosto dal loro posizionamento; tale risultato può essere motivato dal fatto che le tensioni agenti vengono quasi completamente assorbite dal primo strato di fibre (Faccio, Foraboschi, Siviero, 1999; Borri 2003a).

I tessuti in composito, infatti, lavorano esclusivamente a trazione e risultano del tutto inefficaci presso le aree compresse; nelle strutture voltate, che lavorano prevalentemente a compressione, può accadere che le tensioni reali nelle sezioni siano diverse da quelle previste dalle elaborazioni numeriche (ciò accade soprattutto in strutture depresse). L'impiego di materiali compositi in volte che presentino già una deformazione è pertanto sconsigliabile, a meno che non si ripristini preliminarmente la curvatura originaria.

Il ponte Nomentano a Roma, come s'è già visto nel paragrafo precedente, è stato oggetto di un'accurata diagnostica e di un restauro statico; nel 1998, il Comune di Roma aveva infatti commissionato una verifica strutturale per accertare il livello di sicurezza del ponte in vista di una possibile riapertura al traffico

FIGURA 5.75  
Roma, ponte Nomentano. Restauro strutturale



Il cordolo perimetrale è solidarizzato alla struttura muraria (così come le fasce resistenti delle volte al cordolo stesso) da incollaggi chimico e meccanico per l'intera lunghezza del cordolo. Una maglia di chiodi in composito, lunghi 5 cm, è alloggiata in fori inclinati a 45 gradi e sigillata con resina.

Fonte: rielaborazione da Fantone, Ferrini (2002).

veicolare; tale verifica ha dimostrato l'insufficiente resistenza della volta centrale e ha promosso la progettazione di un intervento migliorativo, soprattutto per minimizzare gli effetti delle vibrazioni da traffico (Studio Pr.As. – Roma). Saggi ed elaborazioni numeriche hanno fra l'altro dimostrato che alcune lesioni presenti lungo la curvatura dell'arco non erano imputabili a fenomeni di dissesto, bensì all'impatto con i remi dei natanti. La volontà di non inserire elementi caratterizzati da resistenza e modulo elastico troppo elevati ha portato alla scelta dei materiali compositi (fibre di vetro e resina epossidica), applicati all'estradosso della volta a botte dell'impalcato; le strisce di tessuto sono state disposte nelle direzioni parallele e ortogonali alla generatrice, così da creare un sistema resistente bidimensionale e un sostanziale aumento della capacità portante d'insieme. Per il trattenimento delle murature perimetrali è stato realizzato un cordolo in fibra di vetro, alto circa 30 cm, alloggiato all'altezza dello spiccato delle vele e aderente alla muratura tramite un letto in resina epossidica.

La stesura delle fibre in composito sulle superfici murarie si serve di un letto di malta ben livellata; questa, per la sua scarsa resistenza a trazione, costituisce il punto debole nel trasferimento delle tensioni fra la struttura muraria e le fibre e può essere soggetta a distacchi. L'inserimento di ancoraggi aggiuntivi che fungano da presidio in caso si verificano scollamenti costituisce uno dei possibili sistemi per ovviare a questo inconveniente (Borri, 2003a). Le fasce del cordolo nel ponte Nomentano sono fissate con resina epossidica e con chiodi in fibra di vetro, che evitano fenomeni di erosione e di aratura del foro nella muratura (FIG. 5.75). I chiodi sono stati dimensionati in modo tale da costituire l'anello debole del sistema di ancoraggio; essi, sollecitati dalle eventuali vibrazioni prodotte dal traffico, raggiungono la rottura prima dell'apparecchiatura muraria, proteggendo in tal modo, com'è auspicabile in ogni intervento di restauro, la materia originale dell'opera (Fantone, Ferrini, 2002).



# Tecnologie per la conservazione delle superfici materiche

di Carla Bartolomucci e Lorenzo Cantalini

## 6.1

### Superfici dell'architettura e diagnostica

#### 6.1.1. Il concetto di "degrado"

Le superfici architettoniche sono il luogo in cui si manifestano principalmente il degrado degli edifici e l'invecchiamento dei materiali; esse costituiscono, perciò, una preziosissima fonte di informazioni sui materiali e sullo stato di conservazione, ma anche sulle tecniche di lavorazione, le modalità costruttive e le vicende conservative degli edifici stessi.

Appare fondamentale, quindi, conservare il più possibile l'autenticità delle superfici e delle finiture; a questo proposito è essenziale poter distinguere i naturali e "fisiologici" fenomeni di invecchiamento della materia, che possono solo essere rallentati ma mai annullati del tutto, dai fenomeni "patologici" di degrado, che in relazione alla loro effettiva pericolosità (se il meccanismo di degrado è ancora in atto o meno) possono essere riparati negli effetti e prevenuti nelle cause, per evitare interventi inadeguati, talora inutili e spesso dannosi.

A questo proposito, anche nel documento di riferimento per la descrizione delle forme di alterazione dei materiali lapidei (lessico UNI 11182:2006, già NORMAL 1/88) vengono distinti *a priori* i concetti di "degradazione" e di "alterazione", definendo "alterazione" la «modificazione di un materiale che non implica necessariamente un peggioramento delle sue caratteristiche sotto il profilo conservativo», mentre "degradazione" è la «modificazione di un materiale che comporta un peggioramento».

Tale distinzione dovrebbe rappresentare un costante riferimento per valutare l'effettiva necessità d'intervenire o meno, evitando atteggiamenti guidati da logiche "prestazionali" che portano a rinnovare periodicamente l'aspetto delle superfici mediante interventi che alterano l'autenticità e cancellano i segni del tempo (come puliture eccessive e dannose, rimozioni e sostituzioni di finiture e intonaci, applicazione di prodotti inadeguati ecc.).

## 6.1.2. Cause e meccanismi di degrado

L'analisi del degrado delle superfici materiche procede a partire dall'individuazione degli effetti sui diversi materiali (alterazioni macroscopiche) per poi risalire ai meccanismi e alle cause responsabili; tale procedimento "inverso" si fonda su un'indispensabile conoscenza preliminare delle vicende costruttive e conservative dell'edificio.

A tale scopo, sono necessarie ripetute e attente osservazioni (da condurre effettivamente *in situ* e non su fotografie), che consentano di verificare l'eventuale periodicità di alcuni fenomeni e l'evoluzione del degrado; le ispezioni devono essere compiute sia a distanza ravvicinata, tale da consentire il riconoscimento delle alterazioni, sia nel complesso dell'edificio, per esaminare la distribuzione delle manifestazioni patologiche.

L'osservazione dei segni di degrado, in realtà, non è soltanto visiva, ma si basa su una percezione sensoriale più ampia, in cui anche il tatto, l'udito, l'odorato e il gusto forniscono importanti informazioni (come per la valutazione della consistenza di un materiale al tatto o per l'individuazione delle parti distaccate tramite percussione e successiva valutazione della risposta sonora).

Solo dopo aver individuato le forme di alterazione sulle superfici (cioè gli effetti del degrado), dopo averne rilevato la distribuzione sulle differenti parti dell'edificio e sui diversi materiali, si può risalire alla comprensione dei meccanismi di degrado e alle cause che li hanno determinati; a questo scopo le indagini diagnostiche possono fornire un contributo determinante per confermare o meno le ipotesi avanzate su base empirica.

Lo studio sui meccanismi di degrado ha registrato, negli ultimi decenni, un consistente interesse dimostrato dalla ricca bibliografia in materia (*Fattori di deterioramento*, 1980; Fiorani, 1996b; Torraca, 2002; Pedemonte, Fornari, 2003); in questa sede basti accennare alla molteplicità di fattori che concorrono a determinare il degrado, per i quali è impossibile stabilire una corrispondenza precisa e biunivoca di causa ed effetto.

Le cause di degrado possono essere intrinseche dell'edificio – ovvero dovute alle caratteristiche geologiche del sito, a errori di progettazione e/o di esecuzione, alla qualità dei materiali ecc. – oppure estrinseche, ossia indipendenti dal manufatto e dovute all'ambiente in cui esso si trova o ad azioni dell'uomo.

Tra le cause estrinseche, gli eventi naturali che causano degrado possono essere improvvisi (sismi, attività vulcanica, dissesti geologici, eventi meteorologici eccezionali) o prolungati nel tempo (presenza di agenti degradanti quali acque meteoriche, aerosol marino, vento, cicli termici, vegetazione ecc.); si possono considerare tra le cause estrinseche anche le azioni antropiche, che possono essere dirette (incendi, atti vandalici, furti, usura) oppure indirette (abbandono, assenza di manutenzione, uso improprio, interventi inadeguati, inquinamento).

I meccanismi di degrado vengono definiti, a livello teorico, mediante una

suddivisione utile alla comprensione dei fenomeni, ma piuttosto artificiosa (Capponi, 2004), poiché in realtà essi agiscono molto spesso in maniera combinata e sinergica (ad esempio le microfessurazioni superficiali, dovute a sollecitazioni meccaniche, favoriscono la penetrazione di acqua all'interno del materiale, innescando meccanismi di degrado sia fisico che chimico). Di seguito s'illustrano i principali meccanismi di degrado, ma appare evidente che l'attribuzione d'un fenomeno all'uno o all'altro meccanismo quasi mai può essere univoca.

Il degrado di tipo meccanico è strettamente collegato alle caratteristiche del materiale: i materiali lapidei presentano una buona resistenza a compressione, ma una scarsa o nulla resistenza a trazione, solitamente affidata alla collaborazione di altri materiali quali legno e metallo.

Tralasciando le questioni statiche e macrostrutturali, è importante in questa sede considerare le sollecitazioni che interessano direttamente le superfici architettoniche; queste possono essere dovute sia alle modalità di lavorazione (l'uso di alcuni strumenti per la lavorazione della pietra, come per esempio la bocciarda, comporta microfessurazioni del materiale), sia alla concentrazione di tensioni sugli elementi più rigidi di una muratura disomogenea (sul paramento lapideo regolare, con giunti molto sottili, di una muratura irregolare "a sacco" può verificarsi una concentrazione di carichi per l'impossibilità di seguire gli assestamenti della parte meno rigida). In tali casi il materiale manifesta una serie di microlesioni e fessurazioni dovute a un'eccessiva sollecitazione a compressione (lesioni da schiacciamento; TAV. XIIa). La concentrazione di tensioni si verifica anche quando la superficie d'appoggio non è regolare: per questo motivo, solitamente, si usano gli allettamenti di malta, che hanno la funzione di regolarizzare la superficie d'appoggio e ripartire il carico in maniera più uniforme.

I tensionamenti meccanici sulle superfici possono essere causati anche da fenomeni di corrosione dei metalli (in perni, grappe ecc.), che determinano aumento di volume, oppure da azioni antropiche (danni causati da puliture troppo aggressive); fra queste, le vibrazioni prodotte dal traffico veicolare causano azioni meccaniche sugli elementi che hanno frequenza naturale analoga a quella della fonte eccitante (10-30 Hz), come vetri, intonaci e altri elementi parzialmente distaccati (Torraca, 2002).

I materiali, infine, vengono sollecitati a trazione non solo da carichi statici o da forze dinamiche, ma anche a causa di cicli termici che inducono dilatazioni differenziate nel materiale; queste possono verificarsi – nei blocchi di un certo spessore – tra superficie e zone interne oppure nelle lastre di rivestimento vincolate a incastro senza giunti di dilatazione. Gli effetti della dilatazione termica sono più evidenti nei materiali anisotropi (come i marmi con grossi cristalli o il granito) e negli elementi costituiti dalla combinazione di materiali eterogenei con coefficienti di dilatazione diversi (TAV. XIIb-c).

Oltre ai fenomeni di dilatazione termica, che possono essere attribuiti a

un degrado sia di tipo meccanico che fisico, anche i cicli termici di gelo-disgelo e la cristallizzazione salina inducono sollecitazioni meccaniche e danneggiano i materiali. Per comprendere il fenomeno della gelività è importante conoscere i fenomeni di capillarità (per cui la risalita capillare è maggiore quanto minore è il diametro dei tubi), il tipo di porosità del materiale e la dimensione dei pori. Il cristallo di ghiaccio, infatti, riesce a formarsi solo nei pori grandi e si accresce richiamando acqua dai pori capillari vicini (Torreca, 2002); questo è il motivo per cui un materiale con molti pori grandi e pochi piccoli (come il travertino), quindi con scarsa disponibilità di acqua per l'accrescimento dei cristalli di ghiaccio, non è gelivo, ovvero non viene danneggiato dal gelo. I cristalli di ghiaccio, in questi casi, possono formarsi senza creare tensionamenti meccanici sulle superfici del poro, dato che dispongono di spazio adeguato per espandersi ma non di una riserva d'acqua sufficientemente grande per accrescersi. Al contrario, nel materiale con pochi pori grandi e molti piccoli (pietre porose, laterizi), il cristallo di ghiaccio tende ad attrarre sempre più acqua dai pori capillari, ma la sua crescita è impedita dalle dimensioni del poro; si determinano quindi tensionamenti meccanici in grado di portare il materiale a rottura (TAV. XIII*d*). In realtà, dunque, i danni da gelo non dipendono tanto dall'aumento di volume dell'acqua che gela, quanto dal tipo di porosità del materiale (la dimensione dei pori più pericolosa per questo tipo di degrado è compresa tra 0,01  $\mu\text{m}$  e 1 micron) e dalla dislocazione delle cavità (una lente di ghiaccio che si forma nelle fenditure superficiali può spaccare il materiale). Il ripetersi dei cicli di gelo e disgelo aggrava i processi di rottura, determinando esfoliazioni e scagliature nei materiali che presentano stratificazioni, soprattutto quando queste sono disposte parallelamente alla superficie esterna (TAV. XIII*e*); il fenomeno è particolarmente grave non nei climi freddi, ma dove si riscontrano le maggiori oscillazioni delle temperature intorno a 0 °C.

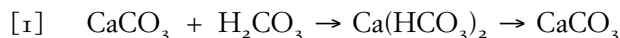
La cristallizzazione dei sali solubili dispersi e veicolati dall'umidità nelle murature produce fenomeni simili: i cristalli di sale, generati con l'evaporazione dell'acqua dalle pareti, si formano perlopiù nei pori grandi. In questo caso, tuttavia, le condizioni ambientali svolgono un ruolo determinante: se l'evaporazione è lenta, i sali cristallizzano sulla superficie determinando efflorescenze sgradevoli dal punto di vista estetico ma poco dannose per i materiali (TAV. XIII*f*); quando invece l'evaporazione è molto rapida, in presenza di climi caldi e ventilati, i sali si formano sotto la superficie del materiale, determinando pericolose subefflorescenze in grado di creare delle vere e proprie cavità in materiali teneri e molto porosi (tufi, arenarie; TAV. XIII*a*). In questi casi è importante condurre analisi chimiche mirate per individuare i tipi di sali presenti, non tutti ugualmente pericolosi. Occorre segnalare in proposito la particolare aggressività dei sali idrati: il solfato di sodio, ad esempio, presenta cristalli aghi-formi (mirabilite) che si accrescono molto rapidamente, determinando sollecitazioni meccaniche sul materiale.

Il fenomeno della cristallizzazione salina presenta, dunque, dinamiche sia

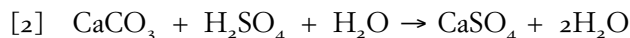
fisiche che chimiche, mentre l'attacco degli acidi sulle superfici rientra pienamente nei meccanismi di degrado chimico.

Gli acidi si formano dalla combinazione di acqua con altre sostanze contenute nell'atmosfera; i principali responsabili del degrado dei materiali lapidei sono l'acido carbonico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ), che deriva dall'anidride carbonica ( $\text{CO}_2$ ), e l'acido solforico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), prodotto dall'anidride solforosa ( $\text{SO}_2$ ) o solforica ( $\text{SO}_3$ ).

L'azione di questi acidi sui materiali calcarei, composti principalmente da carbonato di calcio (perlopiù pietre calcaree e malte a base di calce), comporta gravi danni alle superfici, soprattutto facilita l'insorgenza di fenomeni di "dissoluzione" [1] e "solfatazione" [2]:



La formula 1 illustra la reazione del carbonato di calcio (insolubile), che viene trasformato dall'acido carbonico in bicarbonato di calcio (molto solubile); questo viene trasportato dall'acqua e può depositarsi altrove in seguito a evaporazione. Tale processo di dissoluzione ed erosione è reversibile dal punto di vista chimico (il prodotto finale è il medesimo), ma in realtà è gravemente distruttivo in quanto il materiale viene eroso in alcuni punti e presenta concrezioni calcaree in altri (TAV. XIIIb-c).



La formula 2 illustra la trasformazione del carbonato di calcio in solfato di calcio (gesso, leggermente solubile) per azione dell'acido solforico; il gesso prodotto dalla reazione può essere trasportato in altre zone dell'edificio ed è essenziale, in questi casi, valutare se la presenza di gesso sulle superfici è dovuta effettivamente a fenomeni di degrado oppure alla composizione dei materiali costruttivi.

L'erosione delle superfici calcaree, che è il risultato visibile di tali trasformazioni, comporta il fenomeno della dispersione della luce (*scattering*) su materiali che, asciutti, presentano una superficie esposta sbiancata, mentre tendono a riassumere un colore più intenso se vengono bagnati.

Le rocce silicee e le malte a base silicatica (come il granito e il basalto, nonché altre pietre vulcaniche e arenarie contenenti argilla) sono materiali "silicatici" composti, fra l'altro, da quarzo e silico-alluminati; essi vengono attaccati dagli acidi, in grado di trasformare i silico-alluminati in argilla. Tale processo, detto "lisciviazione" o "caolinizzazione", non erode la superficie lapidea, ma la indebolisce; questa tende così ad ammorbidirsi, gonfiarsi e staccarsi dagli strati sottostanti, che rimangono più compatti (TAV. XIII d).

I processi di attacco acido sulle superfici non si verificano solo tramite l'acqua piovana (deposizione umida), ma anche con la condensazione superficiale (deposizione secca). In questo caso, l'acqua acida deposita sulle superfici

particellato atmosferico (polveri, ceneri ecc.) e, quando evapora, lascia in superficie le sostanze inquinanti con i prodotti delle reazioni acide (carbonato di calcio e solfato di calcio). Il ripetersi del fenomeno, soprattutto evidente nelle zone protette dal dilavamento, determina la formazione di “croste nere” sulle superfici non dilavate; le croste sono caratterizzate da materiale duro e fragile che tende a staccarsi dal materiale sottostante, solitamente deteriorato. Sulle zone esposte a dilavamento, invece, i prodotti di reazione e le polveri vengono portati via dalla pioggia e le superfici appaiono sbiancate per effetto dello *scattering* (TAVV. XIIIe, XIVa).

I meccanismi di degrado biologico comprendono sia la crescita di vegetazione – che può portare al collasso delle strutture per sollecitazioni meccaniche degli apparati radicali – sia lo sviluppo di vari microrganismi che attaccano le superfici lapidee; alcuni di essi possono essere riconoscibili per la presenza, sulle superfici, di incrostazioni colorate con forme vagamente circolari (licheni) oppure di patine verdastre o brune (alghie, muffe), mentre altri sono rilevabili solo osservando al microscopio il materiale prelevato (batteri; TAV. XIVb-c). È importante accertare, attraverso indagini specifiche, l'effettiva pericolosità del fenomeno, che dipende dalla natura degli organismi presenti e dalla loro velocità di accrescimento. Questo tipo di degrado si verifica solitamente in ambienti poco inquinati, spesso con clima caldo e umido, mentre nelle città è meno frequente.

Un aspetto particolare riguarda l'accumulo di guano su elementi architettonici dovuto alla presenza di piccioni; questo determina un attacco chimico sui materiali e favorisce l'insorgere di altri fenomeni di degrado, come la colonizzazione di microrganismi.

Il degrado biologico interessa, in modo particolarmente grave, soprattutto il legno, attaccato da insetti xilofagi, funghi e batteri. Ciò si verifica soprattutto in condizioni ambientali favorevoli (generalmente in presenza di elevati livelli di umidità), per cui è importante controllare le condizioni microclimatiche in cui si trovano gli oggetti lignei ed evitare il contatto diretto con l'acqua, che provoca marcescenza nel materiale.

### 6.1.3. Il degrado sui diversi materiali

Nel considerare le manifestazioni di degrado sui diversi materiali da costruzione bisogna distinguere i materiali rigidi e porosi (tutti i materiali lapidei, naturali e artificiali) da altri materiali quali il legno e i metalli.

I materiali lapidei naturali possono essere differenziati, in base alla loro composizione chimica, in rocce a matrice calcarea (calcari, marmi), rocce a matrice silicatica (tufi, graniti) e rocce a matrice mista calcareo-silicatica (arenarie, marne); il degrado di tipo chimico seguirà, pertanto, i meccanismi già descritti di dissoluzione e solfatazione oppure di lisciviazione e di caolinizzazione, a seconda della natura del materiale.

I materiali ceramici, in particolare i laterizi, sono spesso soggetti a fenomeni di efflorescenza; i sali possono essere contenuti nelle argille usate per la fabbricazione dei laterizi oppure derivare dalle malte di allettamento (le malte cementizie, ad esempio, presentano in genere un alto contenuto di sali; TAV. XIVd-e). In presenza di subefflorescenze, il materiale può presentare erosione, polverizzazione, esfoliazione, scagliatura; tali manifestazioni di degrado, tuttavia, possono essere dovute anche a fenomeni di gelività, a cui i laterizi sono molto soggetti per la loro elevata capacità di assorbimento di acqua (TAV. XIVf).

Il degrado delle ceramiche e delle terrecotte smaltate può interessare sia il biscotto che il rivestimento; quest'ultimo può distaccarsi dal supporto a causa di difetti di fabbricazione (discontinuità, bolle) o di lesioni intervenute successivamente per usura meccanica (Fancelli, 1987), che creano alcune vie preferenziali per l'innescò di meccanismi di degrado fisico o chimico. In taluni casi si è osservato anche un particolare tipo di attacco biologico, ossia la formazione di alghe al di sotto dello smalto, che causa il distacco e la perdita del rivestimento. Nel chiostro maiolicato di S. Chiara a Napoli, per esempio, le ceramiche presentavano vistose lacune e perdite di smalto decorato; tale degrado fu inizialmente attribuito a fenomeni di cristallizzazione salina, dato l'ambiente molto umido. Successivamente, l'osservazione della localizzazione del degrado nelle piastrelle, limitata alle parti decorate con colori chiari, ha consentito di risalire al tipo di patologie, legato a una colonizzazione di alghe (TAV. XVa). Queste, che si nutrivano di materiale ceramico, si erano infatti sviluppate privilegiando le zone chiare, in cui poteva penetrare la luce, escludendo quelle in cui la radiazione luminosa era filtrata da colori opachi e scuri (Torraca, 2001).

I manufatti in terra cruda sono molto vulnerabili se esposti senza adeguata protezione all'azione diretta delle acque meteoriche; la pioggia, infatti, causa danni meccanici alle superfici e, dopo aver asportato gli strati superficiali di rivestimento, penetra all'interno della muratura disgregandola (TAV. XVb).

Il degrado delle malte e degli intonaci è fortemente condizionato dalla presenza di umidità dovuta all'infiltrazione superficiale o alla risalita capillare; questa innesca infatti i consueti meccanismi di degrado fisico, chimico e biologico (TAV. XVc). Anche in questo caso è valida la distinzione tra materiali carbonatici (malte di calce aerea) e materiali silicatici (malte di calce idraulica), per cui i leganti possono essere attaccati da fenomeni di dissoluzione e solfatazione, che determinano erosioni superficiali oppure degradazioni differenziali (come l'erosione del legante e la messa a nudo degli inerti). Le efflorescenze saline possono determinare, anche in questo caso, disgregazioni e distacchi tra i vari strati di intonaco, fino alla caduta di parti del rivestimento; ovviamente tali discontinuità superficiali, come pure la presenza di lesioni e fessurazioni, favoriscono la penetrazione di acqua e innescano, quindi, nuovi meccanismi di degrado (colonizzazione biologica, gelività).

Il degrado delle coloriture può essere dovuto a problemi d'incompatibilità della finitura con il supporto (come per le tinte a calce applicate su intonaci precedentemente trattati con materiali sintetici) o a una scorretta messa in opera (come con le tinte ai silicati applicate su supporto umido) o alle caratteristiche stesse del tipo di coloritura (TAV. XVd). Le tinte, infatti, tendono a degradarsi per erosione superficiale e alterazione di colore (scolorimento), mentre le pitture che danno origine a pellicole tendono a rigonfiare e a distaccarsi per aree anche molto estese, determinando cadute di materiale (TAV. XVe).

Il vetro si degrada per “devetrificazione”, esso tende infatti nel tempo ad allontanarsi dalla struttura amorfa e a riassumere una struttura di tipo cristallino; tale fenomeno, caratterizzato dall'opacizzazione del materiale, che assume spesso una colorazione verdastria, è causato dalla perdita di alcali (sodio) e dalla formazione di silicati (clorite).

I metalli, oltre ai problemi di deformazione per scorrimento viscoso, dovuti normalmente al carico strutturale ma aggravati notevolmente dall'insorgenza di incendi (in grado di condurre le strutture al collasso), possono denunciare i fenomeni tipici della corrosione sulle superfici. La corrosione può aver luogo in ambienti asciutti a contatto con l'aria (corrosione “secca”) o in presenza di acqua (corrosione “umida”), con l'attivazione di un meccanismo elettrochimico di degrado determinante la perdita degli elettroni del ferro.

La corrosione secca è dovuta alla reazione tra ossigeno e ferro, che può dar luogo a ematite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , ossido rosso) oppure a magnetite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , ossido nero) a seconda della quantità di ossigeno presente nell'aria. Mentre lo strato di ossido rosso è molto poroso e non ha valore protettivo, l'ossido nero è molto compatto e protegge il materiale sottostante dall'aggressione atmosferica (ad esempio la colonna di ferro nei pressi del Qutb Minar di Delhi, in India, risalente al V secolo, è perfettamente conservata, nonostante la sua esposizione all'aperto, grazie alla patina nera che la ricopre).

La corrosione umida provoca danni più gravi, poiché attacca il materiale in superficie e in profondità, fino alla perdita completa dell'elemento metallico (TAV. XVf); essa determina la formazione di ruggine e un aumento di volume che può creare tensionamenti e rotture sugli eventuali materiali combinati con il metallo, soprattutto pietra e calcestruzzo.

Il degrado del legno è generalmente distinto in “biotico” (dovuto ad attacchi di insetti, funghi, batteri o altri organismi) e “abiotico” (dovuto a cause meccaniche, chimiche o fisiche). Il legno presenta problemi legati alla sua igroscopicità, ovvero alla tendenza ad assorbire o a cedere acqua a seconda delle condizioni ambientali in cui si trova. Ne scaturiscono aumenti o contrazioni di volume con conseguenti deformazioni (inflexioni o distorsioni), tensionamenti meccanici e fessurazioni. In generale, in ambiente secco il legno tende al ritiro, quindi a fessurarsi e spaccarsi, mentre in ambiente umido si rigonfia ed è maggiormente soggetto ad attacchi di tipo biologico.



## 6.1.4. Gli effetti del degrado: lessico delle forme di alterazione

La descrizione della morfologia alterativa e delle degradazioni riconoscibili a livello macroscopico è già da tempo oggetto di “normalizzazione” da parte delle commissioni NORMAL per i beni culturali (l’acronimo sta per Normativa Manufatti Lapidari), allo scopo di stabilire un glossario univoco ed evitare l’uso di terminologie ambigue.

Una prima proposta di lessico delle alterazioni macroscopiche dei materiali lapidei venne pubblicata all’inizio degli scorsi anni ottanta (NORMAL 1/80), poi rivisto successivamente (NORMAL 1/88) e di recente sottoposto a un nuovo aggiornamento (UNI 11182:2006); l’ultima versione introduce qualche termine nuovo e illustra più ampiamente con fotografie le definizioni mutate dal documento precedente, senza apportarvi sostanziali modifiche.

Oltre alla distinzione preliminare già accennata tra i concetti di “alterazione” e di “degradazione”, ribadita anche nell’ultimo documento, il lessico illustra una serie di forme di alterazione descritte dal punto di vista prettamente fenomenologico (ovvero dell’aspetto visivo), a prescindere dalle cause originarie, per le quali si rimanda agli approfondimenti diagnostici.

L’illustrazione delle casistiche procede in ordine alfabetico, indipendentemente dal meccanismo di degrado e dal materiale coinvolto; in altre sedi, invece, vengono proposti alcuni criteri per distinguere le diverse patologie. Taluni propongono di separare le patologie caratterizzate da formazione o deposito di materiale estraneo da quelle che asportano materiale dall’opera, oppure che non producono né addizione né sottrazione di materia (Cagnana, 2000); altri differenziano i fenomeni non peggiorativi dal punto di vista fisico-chimico (alterazione cromatica, macchia, patina) da quelli che comportano perdite di materiale (erosione, *pitting*, alveolizzazione) o che modificano la morfologia del manufatto (disgregazione-polverizzazione, esfoliazione, scagliatura, distacco, mancanza-lacuna) e, ancora, da quelli che comportano la deposizione e/o la formazione di prodotti secondari (concrezione-incrostazione, deposito superficiale, crosta, efflorescenza, pellicola, patina biologica) o una riduzione della resistenza meccanica (deformazione, rigonfiamento, fratturazione) (Bugini, Folli, 2005).

Tali distinzioni sono senza dubbio interessanti a livello teorico ma, in alcuni casi, difficilmente applicabili alla concreta realtà delle patologie: la disgregazione, il distacco e l’erosione, per esempio, descrivono fenomeni di degradazione, più o meno attivi, con effettiva sottrazione di materiale, mentre la lacuna e la mancanza si riferiscono al risultato finale di tale sottrazione, ovvero alla perdita di materia dell’opera. Diversamente, l’alterazione morfologica dell’opera determina, in effetti, anche una perdita di materiale e una conseguente riduzione della resistenza meccanica.

In questa sede le definizioni del lessico vengono organizzate in riferimento agli effetti di asporto o di apporto di prodotti sul materiale, integrando ove possibile la descrizione con il riferimento al materiale su cui tali alterazioni si

presentano e al meccanismo di degrado che ha determinato tali effetti; ciò per poter risalire alle cause del fenomeno, da verificare ulteriormente con opportune indagini strumentali. In taluni casi l'attribuzione a un genere determinato di effetti è piuttosto discutibile (la "colatura", ad esempio, può descrivere sia il deposito di materiale disciolto in soluzione, sia l'erosione della superficie dilavata). Si ritiene inoltre di dover eccettuare da tale suddivisione la voce relativa alla "patina" che, intesa come «modificazione naturale della superficie non collegabile a fenomeni di degrado e percepibile come una variazione del colore originario del materiale», non è da considerarsi patologia.

Di seguito si riportano, quindi, le definizioni del lessico UNI 11182:2006, suddivise tra:

a) fenomeni caratterizzati da sottrazione di materia:

– alveolizzazione: «formazione di cavità, dette alveoli, di forma e dimensioni variabili, spesso interconnesse e con distribuzione non uniforme». L'alveolizzazione è un fenomeno erosivo caratterizzato dalla perdita di materia; questo tipo di degrado non va quindi confuso con la presenza di cavità tipiche di alcuni materiali lapidei vacuolari, come il travertino. Si verifica, solitamente, in materiali lapidei teneri e molto porosi (tufi, arenarie) per effetto di subefflorescenze, soprattutto quando l'evaporazione è favorita da clima secco e ventoso (talvolta si parla, perciò, di "erosione eolica");

– disgregazione: «decoesione con caduta del materiale sotto forma di polvere o minutissimi frammenti; talvolta viene utilizzato il termine "polverizzazione"». Può verificarsi sui materiali lapidei in generale, sia naturali che artificiali, spesso per effetto di meccanismi di degrado fisico (cicli termici, subefflorescenze saline). Le indagini strumentali devono verificare l'eventuale presenza di sali o di altri prodotti di degrado mediante cromatografia ionica (IC), analisi XRD e osservazioni al microscopio ottico ed elettronico (SEM-EDS);

– distacco: nelle malte «è una soluzione di continuità tra strati di un intonaco, sia tra loro che rispetto al substrato, che prelude, in genere, alla caduta degli strati stessi». Nei materiali ceramici e nei vetri «è una soluzione di continuità tra rivestimento ed impasto o tra due rivestimenti». La presenza di parti distaccate non rilevabili a occhio nudo o con prove di percussione può essere evidenziata strumentalmente dalla termografia e da prove soniche e ultrasoniche;

– erosione: «asportazione di materiale dalla superficie che nella maggior parte dei casi si presenta compatta». Può verificarsi su tutti i materiali lapidei e sui metalli, per effetto della corrosione. La caratterizzazione del materiale, tramite analisi XRD e osservazioni al microscopio ottico ed elettronico, può chiarire le cause del fenomeno;

– esfoliazione: «formazione di una o più porzioni laminari, di spessore molto ridotto e subparallele tra loro, dette sfoglie». Si verifica sui materiali lapidei in genere, sui rivestimenti e sugli strati pittorici. Anche in questo caso, la caratte-

rizzazione mineralogico-petrografica e la composizione chimica del materiale possono chiarirne le cause;

– lacuna: «perdita di continuità di superfici (parte di un intonaco e di un dipinto, porzione di impasto o di rivestimento ceramico, tessere di mosaico ecc.)». Tale definizione, immediatamente applicata a casi concreti, può apparire piuttosto riduttiva e rischiosa, muovendo da un semplice riscontro dell'integrità materiale e priva com'è di qualsiasi riferimento alla necessità di lettura critica del manufatto: si pensi ad esempio al concetto brandiano di "lacuna" come «interruzione nel tessuto figurativo», riferibile nella realtà a qualsiasi opera, dalle componenti del tessuto urbano alla superficie pittorica o scolpita (Brandi, 1963b);

– mancanza: «perdita di elementi tridimensionali (braccio di una statua, ansa di un'anfora, brano di una decorazione a rilievo ecc.)». Anche in questo caso sono stati ignorati i riferimenti teorici del restauro, che trascendono la mera valutazione della consistenza materiale dell'opera rimandando alla complessità della sua lettura storico-artistica: basti ricordare la distinzione di Umberto Baldini fra «lacuna-perdita», in grado di compromettere irreversibilmente la figuratività dell'immagine, e la «lacuna-mancanza», meno dannosa dal punto di vista dell'alterazione percettiva (Baldini, 1978-81). La profonda differenza qualitativa esistente fra "perdita" e "mancanza" viene ricondotta nel documento UNI alla semplice qualificazione bidimensionale o tridimensionale del danno, con un'evidente riduzione delle complesse problematiche percettive connesse con il fenomeno al mero riscontro geometrico;

– *pitting*: «formazione di fori ciechi, numerosi e ravvicinati. I fori hanno forma tendenzialmente emisferica con diametro massimo di pochi millimetri». Il fenomeno può essere dovuto a erosione localizzata o all'effetto di un attacco biologico; in questo caso l'osservazione al microscopio ottico ed elettronico può consentire la verifica della presenza di eventuali prodotti di alterazione e chiarirne le cause;

– scagliatura: «presenza di parti di forma irregolare, spessore consistente e non uniforme, dette scaglie, generalmente in corrispondenza di soluzioni di continuità del materiale originario». Interessa principalmente i materiali lapidei di origine sedimentaria, caratterizzati da giaciture ben riconoscibili. Il fenomeno è analogo all'essfoliazione; la differenza sta nello spessore delle parti che si distaccano (superiori a 2 mm nelle scaglie).

*b*) Fenomeni caratterizzati da addizione di materia:

– colatura: «traccia ad andamento verticale; frequentemente se ne riscontrano molte ad andamento parallelo». Tale definizione, introdotta di recente, appare piuttosto vaga e confondibile con altri fenomeni, quali le macchie per dilavamento o le concrezioni derivanti dalla solubilizzazione di carbonati;

– colonizzazione biologica: «presenza riscontrabile macroscopicamente di micro e/o macrorganismi (alghe, funghi, licheni, muschi, piante superiori)». La definizione comprende tutti i fenomeni di origine biologica, inclusa la pre-

senza di vegetazione infestante, che tuttavia appare nel lessico come fenomeno distinto;

– crosta: «modificazione dello strato superficiale del materiale lapideo. Di spessore variabile, generalmente dura, la crosta è distinguibile dalle parti sottostanti per le caratteristiche morfologiche e spesso per il colore. Può distaccarsi spontaneamente dal substrato che, in genere, si presenta disgregato e/o polverulento». Trattandosi di un effetto di degrado di natura chimica (dunque ben diverso dall'incrostazione, che non altera il materiale), le indagini strumentali devono accertare l'effettiva trasformazione del materiale, quindi rilevare la presenza di prodotti di degrado (solfati). A questo scopo le tecniche utilizzate possono essere: osservazione al microscopio ottico ed elettronico (SEM-EDS), diffrazione a raggi X, cromatografia ionica IC, spettroscopia IR;

– deposito superficiale: «accumulo di materiali estranei di varia natura, quali polvere, terriccio, guano ecc. Ha spessore variabile, generalmente scarsa coerenza e scarsa aderenza al materiale sottostante». Può verificarsi su qualsiasi tipo di materiale, che solitamente si presenta integro, a meno che il fenomeno di deposito non inneschi meccanismi di degrado di altro tipo (come la deposizione secca e/o umida di acque acide);

– efflorescenza: «formazione superficiale di aspetto cristallino o polverulento o filamentoso, generalmente di colore biancastro». Il fenomeno può interessare tutti i materiali lapidei e il legno ed è dovuto alla cristallizzazione dei sali sciolti nell'acqua all'interno delle strutture. Alcune indagini strumentali (cromatografia ionica, diffrazione XRD) possono accertare la natura dei sali, per verificarne pericolosità e provenienza. I sali, infatti, possono provenire dal terreno con l'umidità di risalita oppure – piuttosto frequentemente – sono stati introdotti con interventi inadeguati, che hanno utilizzato materiali non compatibili, come le malte cementizie;

– graffito vandalico: «apposizione indesiderata sulla superficie di vernici colorate». Oltre all'effetto, spesso deturpante, di disturbo visivo, la pericolosità di tali elementi di degrado dipende dal tipo di vernici, dal grado di penetrazione e dalla loro difficoltà di rimozione (Pandolfi, 2000);

– incrostazione: «deposito stratiforme compatto e generalmente aderente al substrato. Si definisce "concrezione" quando il deposito è sviluppato preferenzialmente in una sola direzione non coincidente con la superficie lapidea e assume forma stalattitica o stalagmitica». L'incrostazione, in quanto deposito di sostanze estranee, è quindi cosa ben diversa dalla crosta, costituita da materiale chimicamente alterato; essa può verificarsi su qualsiasi materiale. Le concrezioni, invece, si verificano sui materiali carbonatici solubilizzati (dunque non si tratta di materiale estraneo) che si depositano altrove in seguito all'evaporazione dell'acqua. In questo caso le indagini strumentali devono accertare la natura dell'incrostazione tramite osservazioni al microscopio ottico ed elettronico e analisi chimiche;

– macchia: «variazione cromatica localizzata della superficie, correlata sia alla presenza di determinati componenti naturali del materiale (concentrazione di

pirite nei marmi) sia alla presenza di materiali estranei (acqua, prodotti di ossidazione di materiali metallici, sostanze organiche, vernici, microrganismi per esempio)». Le osservazioni al microscopio possono accertare la penetrazione delle sostanze estranee nel materiale e quindi la profondità del danno;

– patina biologica: «strato sottile ed omogeneo, costituito prevalentemente da microrganismi, variabile per consistenza, colore e adesione al substrato». Può interessare tutti i materiali lapidei, ma anche legno e metalli. Le indagini consentono d'identificare il tipo di biodeteriogeni con opportuni prelievi e colture in laboratorio;

– pellicola: «strato superficiale trasparente o semitrasparente di sostanze coerenti fra loro ed estranee al materiale lapideo (pellicola protettiva, pellicola con funzioni estetiche, pellicola ad ossalati ecc.)». Le pellicole possono presentarsi su tutti i materiali, compresi metalli e vetro, e possono anche essere opache (come le pellicole derivanti dall'ossidazione dei metalli o quelle pittoriche su strati di finitura superficiale). Anche in questo caso le osservazioni al microscopio e le analisi chimiche possono accertare i componenti organici o inorganici;

– presenza di vegetazione: «presenza di individui erbacei, arbustivi o arborei». Come già osservato, la definizione riprende, in parte, il fenomeno della colonizzazione biologica. In questo caso uno studio botanico dovrebbe individuare il grado d'invasività e la pericolosità della vegetazione sulla fabbrica.

c) Fenomeni senza sottrazione né apporto di materia:

– alterazione cromatica: «variazione naturale, a carico dei componenti del materiale, dei parametri che definiscono il colore. È generalmente estesa a tutto il materiale interessato; nel caso in cui l'alterazione si presenti in modo localizzato è preferibile usare il termine di macchia». Può insorgere su tutti i materiali lapidei, su legno, vetro e metalli e può essere dovuta a fenomeni chimici, fisici o biologici. È importante comprenderne le cause, per valutare il suo reale effetto patologico;

– deformazione: «variazione della sagoma o della forma che interessa l'intero spessore del materiale». Si verifica soprattutto sugli elementi lignei, in particolare se di modesto spessore, ma anche su materiali lapidei, vetro e metalli (per scorrimento viscoso o per dilatazione termica);

– degradazione differenziale: «perdita di materiale dalla superficie che evidenzia l'eterogeneità della tessitura e della struttura. Nel caso degli intonaci può assumere una caratteristica forma "a rosetta"». La definizione appare piuttosto vaga, d'altra parte il fenomeno è specificamente legato alle peculiarità del materiale su cui si presenta, solitamente lapideo e con caratteristiche di anisotropia;

– fratturazione o fessurazione: «soluzione di continuità nel materiale che implica lo spostamento reciproco delle parti. Nei materiali ceramici, in caso di fratturazione incompleta e senza frammentazione dell'oggetto si utilizza il termine "cricca" o, in presenza di rivestimento vetroso, il termine "cavillo"».

Può interessare tutti i materiali lapidei con differenti livelli di gravità, che coinvolgono i soli strati superficiali o si spingono in profondità, essendo legati all'insorgenza di dissesti strutturali nella muratura. Nel legno la fessurazione è in genere dovuta a fenomeni di ritiro;

– fronte di risalita: «limite di migrazione dell'acqua che si manifesta con la formazione di efflorescenze e/o perdita di materiale. È generalmente accompagnato da variazioni della saturazione del colore nella zona sottostante». Tale definizione, introdotta di recente, non descrive in realtà un tipo di degrado, ma identifica una specificità della distribuzione di umidità derivante dalla risalita capillare nella muratura;

– rigonfiamento: «sollevamento superficiale localizzato del materiale di forma e consistenza variabili». Il rigonfiamento può preludere al distacco del materiale, sia in presenza di strati di rivestimento staccati dal supporto, sia con l'alterazione chimica degli strati superficiali nelle pietre silicatiche per caolinizzazione.

Oltre al lessico UNI 11182:2006 che, come già detto, riguarda le forme di alterazione dei materiali lapidei, la norma UNI 11130:2004 definisce la terminologia relativa al degradamento del legno; attualmente non esistono documenti ufficiali per gli altri materiali.

Nel lessico del degrado del legno, una particolare attenzione è dedicata alle cause (ossia alla descrizione degli organismi animali o vegetali responsabili del degrado); sono eccettuati i danni meccanici, esclusi *a priori* perché interessano l'elemento ligneo, più che il materiale.

Il degrado del legno, come già accennato, può essere di tipo "biotico" (quindi dovuto a insetti, funghi, organismi marini, batteri) oppure "abiotico" (dovuto ad agenti chimici e fisici). Tra le patologie legate al degrado biotico si richiamano in particolare:

– attacco entomatico: «degradamento causato da larve e insetti xilofagi che scavano gallerie all'interno del legno» lasciando in superficie i tipici «fori di sfarfallamento»;

– carie: «degradamento causato da funghi che provocano progressiva perdita di massa, di resistenza meccanica, di durezza e generalmente anche variazioni di colore e di aspetto». La carie può essere bianca (detta anche fibrosa) o bruna (detta anche cubica, può essere secca, umida o soffice) e si verifica se il legno ha umidità maggiore del 18-20%;

– attacco da organismi marini: avviene in acqua di mare ed è causato da crostacei e molluschi xilofagi, che scavano gallerie sulla superficie o all'interno del legno;

– attacco batterico: si osserva in legni conservati a lungo in condizioni di alta umidità (o immersi in acqua); essi presentano una superficie «generalmente più scura e soffice, a volte grigiastria, con una consistenza come burro». Può avvenire sia in condizioni aerobiche che anaerobiche.

Tra i meccanismi di degrado abiotico, si ricordano:

- attacco fotolitico: degradamento superficiale dovuto a processi foto-ossidativi (esposizione alle radiazioni solari e ultraviolette);
- attacco chimico: dovuto ad acidi, basi, agenti ossidanti ecc.;
- idrolisi: «degradamento causato dal contatto con soluzioni acquose, acide o basiche». Il contatto con l'acqua può determinare fenomeni di “lisciviazione”, ovvero di asportazione dal legno di sostanze solubili;
- pietrificazione (o mineralizzazione): «sostituzione della sostanza organica del legno con una inorganica per deposizione di sostanze minerali entro i lumi e le pareti cellulari». Può avvenire per contatto con metalli in fase di ossidazione; a seguito del completo degradamento si ha la “metasomatosi”, una sorta di replica minerale della struttura anatomica del legno.

I fenomeni di degrado abiotico comprendono il degradamento termico del legno, ovvero:

- torrefazione: «fase iniziale non ancora configurabile come pirolisi, del degradamento termico» in cui il legno subisce alterazioni cromatiche, riduzione della igroscopicità e delle caratteristiche meccaniche;
- carbonizzazione: «processo degradativo che si realizza in carenza di ossigeno, che porta alla trasformazione del legno in carbone attraverso complesse reazioni di ossido-riduzione»;
- combustione: può essere lenta (“pirolisi”) o viva (in caso d'incendio).

#### 6.1.5. Le indagini strumentali

Di seguito si presentano alcuni esempi pratici relativi all'analisi dello stato di conservazione delle superfici e alle relative indagini diagnostiche, con l'intento di evidenziare il rapporto fra conoscenza storico-conservativa del manufatto, conoscenza dei materiali e studio dei problemi di conservazione; per un'illustrazione più dettagliata e per i relativi approfondimenti si rimanda alla bibliografia citata. I casi di studio sono stati selezionati per offrire una panoramica delle possibili indagini su materiali diversi (materiali lapidei, murature in laterizi, mosaici, intonaci e affreschi); si sottolinea, tuttavia, che la specificità degli approfondimenti diagnostici non può che derivare dal caso di studio particolare, più che dal materiale.

Le indagini condotte sulla Torre di Pisa costituiscono un caso esemplare per lo studio diagnostico sulle strutture e sui materiali; una prima osservazione delle tracce di degrado sulle superfici lapidee della torre fu compiuta negli anni sessanta del Novecento e, nonostante la prevalente attenzione ai problemi strutturali (il rilevamento dei “guasti” evidenziava soprattutto le manifestazioni di dissesto statico, quali lesioni e fratture), si accennava in quella occasione anche al degrado da erosione superficiale (Locatelli, Polvani, Selleri, 1971).

Successivamente, a partire dal 1993, si è proceduto a una sistematica mappatura dei materiali costitutivi (marmo di san Giuliano, usato originariamente

per tutte le parti strutturali; marmi apuani, impiegati nelle successive reintegrazioni o sostituzione di alcuni elementi degradati, come capitelli, colonne, basi ecc.; calcare grigio di Filettole, utilizzato per le parti scure ornamentali) e alla descrizione dei fenomeni deteriorativi, sinteticamente raggruppati in tre diverse classi: depositi di superficie, degrado del materiale, rotture. L'analisi dello stato di conservazione ha interessato anche il rilievo delle patine, delle stuccature e dei trattamenti eseguiti in passato, evidenziando la presenza di patine ad ossalato solo sulle parti originarie della torre (D'Elia, Capponi, Lodola, 2005).

Le forme di alterazione rilevate a livello macroscopico sulle superfici lapidee della torre sono attribuibili, come accennato, sia a meccanismi di degrado meccanico-strutturale (concentrazione di sollecitazioni), sia a meccanismi di degrado fisico-chimico e biologico.

Nuovi apporti di materiale si sono avuti con la formazione di croste nere, presenti diffusamente sulle superfici non esposte a dilavamento (nei casi particolarmente gravi, caratterizzati anche da alterazione della morfologia superficiale, esse vengono definite "dendritiche"); con le incrostazioni calcaree, dovute a dissoluzione del materiale carbonatico per dilavamento superficiale o per infiltrazione d'acqua all'interno della muratura; con le patine biologiche, che comprendono le proliferazioni di muschi, licheni e alghe sia sulle superfici, sia nelle discontinuità del materiale; con la crescita di vegetazione, soprattutto piante infestanti.

Le degradazioni del materiale hanno comportato fenomeni di disgregazione e decoesione (tra cui il distacco superficiale di cristalli di calcite, definito in passato come "marmo cotto"); disgregazione differenziale (nei casi in cui l'erosione è talmente avanzata da evidenziare venature e motivi strutturali del materiale); polverizzazione (disgregazione con caduta spontanea di materiale), scagliature (con sfaldature dovute a sollecitazioni meccaniche o lungo discontinuità del materiale lapideo). Sono state individuate infine esfoliazioni diffuse, associate a un «forte degrado strutturale del materiale lapideo» che si manifestavano lungo piani sia paralleli alla superficie (accompagnate da fenomeni di disgregazione o polverizzazione) sia ortogonali (in corrispondenza di fratture).

In un terzo gruppo sono state classificate le degradazioni dovute a rotture e le perdite di materiale, quindi: fessure e fratture, sintomo di degrado strutturale (probabilmente dovute a concentrazione di sollecitazioni nelle zone compresse, secondo l'inclinazione della torre); mancanze, definite come «significative perdite di parti».

È interessante notare, nel rilievo dei fenomeni di degrado relativi alla torre, la presenza di «elementi metallici» che, pur non costituendo di per sé fattori di degrado, potrebbero dare origine a tensionamenti meccanici o a pigmentazioni accidentali, nonché l'indicazione di «stuccature frammentarie», ovvero erosione dei giunti di malta, e di «stuccature non idonee» (per colore,



per materiale o per forma) in presenza di interventi inappropriati. Questi ultimi rientrano così a pieno titolo fra i fenomeni di degradazione, diversamente da quanto viene suggerito da altri autori, che considerano questo tipo di presenze non quali fenomeni di degrado, ma testimonianze di interventi passati, quindi tracce storiche comunque significative da valutare nel corso di un'attenta analisi stratigrafica (Pittaluga, 2004). Tale dissonanza denuncia ancora una volta il carattere solo apparentemente “oggettivo” e “tecnico” delle classificazioni legate al degrado, palesando in maniera indiretta i diversi orientamenti teorici derivanti da un approccio “critico” o di tipo “puro-conservativo”.

L'analisi distributiva delle forme di degrado ha evidenziato, in sintesi, una maggiore presenza delle alterazioni nel settore nord (lato di pendenza della torre), interessato anche da un più diffuso attacco biologico, mancante nel fronte sud. In particolare, tra i fenomeni di alterazione superficiale più diffusi, le croste nere sono molto accentuate in basso e diminuiscono sensibilmente in alto; i fenomeni di disgregazione e di esfoliazione, invece, dipendono essenzialmente dalla natura dei litotipi e non dalla loro collocazione: essi sono soprattutto diffusi sui marmi apuani – nelle parti sostituite in passato – e meno presenti sulle parti originarie in marmo di san Giuliano.

Le indagini strumentali hanno riguardato sia il materiale degradato (per erosione, disgregazione ecc.), sia i prodotti di alcune alterazioni (croste nere, incrostazioni, efflorescenze, patine), analizzati dal punto di vista chimico e mineralogico-petrografico. Il campionamento è stato condotto anche per le parti sane, effettuando microprelievi sui diversi litotipi (marmo di san Giuliano, marmo apuano, calcare grigio di Filettole), sulle malte di stuccatura, sulle patine e sui prodotti di alterazione.

I litotipi, sia sani che alterati, sono stati osservati al microscopio ottico (tramite sezioni sottili e sezioni lucide) e sottoposti a prove fisiche per determinare le caratteristiche di porosità. Quest'ultima, infatti, aumenta sensibilmente sulla superficie nel materiale alterato per la formazione di microfessurazioni e decoesioni intergranulari messe in luce dall'osservazione strumentale.

I campioni di malta sono stati sottoposti ad analisi termiche (DTA-TGA) e diffrattometria ai raggi X (XRD) per determinare la composizione chimico-mineralogica; le patine sono state osservate, oltre che con le suddette tecniche diagnostiche, anche mediante spettroscopia ai raggi infrarossi (FTIR) e osservazioni al microscopio elettronico con sonda EDAX per analisi chimiche puntuali (SEM-EDS).

Sulle croste nere sono state eseguite determinazioni di sali solubili mediante cromatografia ionica (IC), che hanno rilevato la diffusa presenza di solfati e, in percentuale decisamente inferiore, di cloruri, mentre quasi tutti i campioni hanno mostrato la presenza di ossalati.

Un aspetto molto rilevante del degrado superficiale della torre è dovuto ai fenomeni di decoesione del marmo dovuti alle caratteristiche di anisotropia

del materiale, alla dilatazione termica dei cristalli di calcite, agli effetti dei cicli termici di gelo-disgelo e della cristallizzazione salina; questi interessano principalmente il marmo apuano, che mostra, all'osservazione al microscopio, scollamento dei grani di calcite, microfrazioni con deposizione di gesso all'interno, corrosione dei cristalli.

La presenza di lesioni e microfessurazioni superficiali, dovute a sollecitazioni meccaniche e alle lavorazioni del materiale, determina concentrazioni localizzate di tensioni e apre nuove vie di penetrazione per l'acqua, con l'innescio di ulteriori meccanismi di degrado fisico-chimico.

Un altro caso significativo, in particolare per l'analisi del degrado di tipo biologico, è rappresentato dalle indagini diagnostiche sulla necropoli vaticana (tomba di san Pietro e altri ambienti scavati sotto la basilica a partire dagli anni quaranta del xx secolo) compiute dal gabinetto di Ricerche scientifiche dei Musei vaticani. La necropoli, costituita da una serie di ambienti ipogei costituiti da murature laterizie con residui di mosaici, intonaci dipinti e decorazioni a stucco, presenta particolari problemi di conservazione dovuti al contesto ambientale e al microclima, alla presenza di umidità e di microrganismi; tali problemi si sono aggravati notevolmente negli ultimi anni a causa dell'apertura al pubblico, per la conseguente alterazione delle condizioni ambientali (variazioni di temperatura, umidità relativa, illuminazione, quantità di CO<sub>2</sub>).

L'aumento delle cariche microbatteriche, collegato all'impatto antropico, ha comportato un maggior degrado sulle superfici, colonizzate da organismi biodeteriogeni che si nutrono di sostanze organiche (alghe, funghi, attinomiceti, batteri); gli effetti visibili sono incrostazioni nere o bianche, macchie circolari biancastre o nerastre, polveri policromatiche, patine verdastre. Il riconoscimento degli organismi biodeteriogeni, in questo caso, è basato essenzialmente su parametri cromatici e morfologici, osservando al microscopio ottico il materiale prelevato (polveri e frammenti di incrostazioni e patine biologiche).

L'introduzione di sistemi per l'illuminazione artificiale ha determinato la comparsa di alghe sulle superfici, generalmente in prossimità di fonti luminose e in condizioni di elevata umidità del substrato. Indagini specifiche, con prelievi e successiva moltiplicazione in vitro, sono state condotte allo scopo di selezionare opportuni biocidi che inibiscano la crescita di tali microrganismi.

Lo studio della flora algale ha permesso anche di calibrare l'impianto d'illuminazione artificiale in modo tale che lo spettro di emissione luminosa possa attenuare il processo di fotosintesi, evitando la proliferazione delle alghe.

Una particolare attenzione è stata dedicata allo studio delle efflorescenze saline, dovute sia all'uso di malte cementizie nel corso di restauri precedenti (stuccature delle cortine laterizie, solaio delle sovrastanti Grotte vaticane realizzato nel 1948), sia alla presenza di sali nei materiali (laterizi e malte pozzolaniche) e nel terreno circostante. Le analisi tramite cromatografia ionica hanno identificato, infatti, il tipo di sali: solfati e cloruri sono presenti in grandi

quantità, ma sono stati rilevati anche fluoruri, mentre sembrano quasi del tutto assenti nitrati e nitriti. La presenza di cloruri, molto dannosi per le opere, sembra derivare dalla notevole quantità di acque ricche di cloro che per molto tempo hanno permeato la zona; i solfati e i fluoruri, invece, provengono dai materiali usati nella costruzione (i fluoruri sono tipici delle pozzolane, mentre i solfati erano contenuti nelle argille che riempivano gli ambienti ipogei prima dello scavo).

Lo studio della necropoli vaticana evidenzia in modo particolare la necessità di mettere a punto una «strategia conservativa» basata su un monitoraggio microclimatico continuo e un controllo periodico dello stato di conservazione delle superfici; lo sviluppo dei microrganismi, infatti, può subire variazioni significative a seconda delle condizioni ambientali, che risentono sia della presenza di visitatori che delle variazioni climatiche stagionali (Sperandio, Zander, 1999).

Un caso particolarmente significativo, che illustra in modo esemplare i danni che l'impiego di materiali non compatibili (come il cemento e i protettivi idrofobizzanti) possono causare su manufatti antichi, è rappresentato dal restauro del ciclo di affreschi raffiguranti la *Leggenda della vera Croce*, nella basilica di S. Francesco ad Arezzo (Maetzke *et al.*, 2001).

Tali dipinti, realizzati da Piero della Francesca con tecnica mista (a fresco e tempera), erano stati sottoposti in passato a diversi interventi: nel 1858 un restauro "integrativo" di G. Bianchi; nel 1915 il consolidamento delle murature della cappella con iniezioni cementizie, usate anche per far riaderire le zone d'intonaco distaccato; negli anni sessanta del Novecento un restauro pittorico di L. Tintori. Già dai primi anni ottanta del secolo scorso, però, essi mostravano nuovamente gravi segni di degrado; il cemento usato in precedenza aveva infatti causato la formazione di efflorescenze saline che, oltre a rendere illeggibile l'opera, determinavano un progressivo disfacimento del supporto (esfoliazione della pellicola pittorica, distacco dell'intonaco). La situazione si era aggravata in seguito agli interventi successivi, che avevano applicato prodotti fissativi per consolidare la pellicola pittorica, rendendo così impermeabile la superficie.

Le indagini eseguite dall'Opificio delle Pietre Dure di Firenze in occasione del recente restauro, oltre al monitoraggio strutturale delle lesioni e al controllo microclimatico (indispensabile per evitare la circolazione dei sali solubili all'interno delle murature e l'evaporazione delle soluzioni con conseguenti cristallizzazioni saline) miravano a identificare i materiali e le tecniche di esecuzione dei dipinti mediante analisi di tipo non distruttivo eseguite sulle superfici (fotografie a raggi infrarossi e ultravioletti, riflettografia, per evidenziare le giornate di lavoro, i disegni preparatori ecc.) o microdistruttivo tramite prelievi di campioni (analisi mineralogiche e petrografiche sulle malte, analisi stratigrafiche, tecniche spettroscopiche per lo studio dei pigmenti) e a verificare lo stato di adesione del supporto mediante indagini termografiche.

## 6.2

**Interventi sulle superfici**

## 6.2.1. La progettazione dell'intervento sulle superfici

Nella redazione di un progetto tecnico di restauro delle superfici l'attenzione del progettista deve essere anzitutto rivolta all'individuazione e alla successiva rimozione delle cause responsabili del degrado e, solo in seguito, al ristabilimento di continuità e coesione della superficie materica. In tal modo sarà possibile restituire al bene una leggibilità spesso sensibilmente compromessa e alla sua superficie caratteristiche meccaniche e di stabilità fisico-chimica soddisfacenti. Accanto a questi obiettivi nel progetto svolge un ruolo centrale anche la selezione dei materiali, delle tecnologie e delle procedure d'intervento più idonee; in ultimo va ricordata la volontà di prevenire danni futuri, pur nella necessità di non cedere all'illusione di poter immunizzare definitivamente l'opera dagli effetti del tempo.

La distinzione ricorrente fra le principali fasi di lavorazione che articolano il processo di restauro sulle superfici dell'architettura identifica quattro categorie d'intervento, consistenti in preconsolidamento, pulitura, consolidamento e protezione. Non sempre, però, tutti e quattro i tipi di trattamento sono necessari e il principio del minimo intervento aiuta a guidare a una selezione corretta ed efficace. Spesso l'impiego, in queste lavorazioni, di tecnologie, materiali e, talvolta, anche manodopera differenti conduce a un'eccessiva emancipazione del singolo trattamento nei confronti dell'intera procedura, con il conseguente rischio di perdere di vista le problematiche conservative reali e di dare origine a veri e propri accanimenti terapeutici; durante ogni fase di lavorazione non dovrebbero, poi, essere usati prodotti che possono ostacolare i trattamenti successivi.

Nessuna delle operazioni di restauro è definibile come "neutra" dal punto di vista materiale o sotto l'aspetto estetico: il progetto di conservazione comporta inevitabilmente una mutazione ed è proprio tale consapevolezza che deve generare nel progettista e, ancor più, nell'operatore una particolare cautela. In questa fase di progettazione il tecnico deve mostrare un'acquisita capacità di lettura dell'opera che, dall'analisi condotta nella fase diagnostica fino alla scala microscopica, sia in grado di rivolgersi all'opera nel suo complesso.

Il progetto esecutivo si articola in elaborati descrittivi che illustrano minuziosamente tutte le fasi operative relative alle quattro categorie d'intervento su citate, dall'eventuale preconsolidamento fino alle conclusive operazioni di protezione. È molto importante per il progettista, specialmente qualora non dovesse poi vedersi assegnata la conduzione dei lavori, porre molta cura nella redazione di queste voci di capitolato.

La scelta definitiva di tecnologie e prodotti da impiegare può comunque fare affidamento su solidi criteri di selezione, relativi ad esempio alla possibilità di controllare nel tempo le successive trasformazioni superficiali. La possibi-

lità per una patina di resistere al trattamento, l'identificazione del "punto di pulitura" desiderato, la scelta del giusto momento in cui arrestare un'immissione di consolidante al di sotto dell'intonaco costituiscono tutti esempi della necessità di privilegiare tecniche "lente", controllabili dal punto di vista meccanico, fisico o chimico. Queste sono in genere più compatibili con la natura dei materiali architettonici e con la necessità di conoscere il comportamento del manufatto nel tempo. Tali tipi di intervento, però, presentano spesso costi di cantiere elevati, soprattutto se riferiti a superfici molto estese quali quelle architettoniche. Ecco dunque tornare in evidenza le responsabilità del progettista che, coadiuvato dalla preziosa esperienza dei restauratori, è chiamato a individuare punto per punto la miglior terapia cui sottoporre l'edificio, tenendo sempre sotto controllo il delicato rapporto fra costi (in termini di fondi, ma anche di tempi di lavorazione) e risultati.

Anche nel campo degli interventi sulla "pelle" delle architetture storiche, la fase progettuale non si conclude affatto con la consegna degli elaborati esecutivi, ma, al contrario, si protrae per tutta la fase d'intervento diretto sull'opera. È nei mesi trascorsi sui ponteggi che anche le lavorazioni di restauro delle superfici si trasformano in potenti strumenti per approfondire la conoscenza del manufatto, dell'ambiente culturale che gli ha dato vita e del ruolo da questo svolto nel corso dei secoli. Oltre che semplice mezzo per l'indagine diretta sull'opera, questi interventi si rivelano di frequente decisivi nell'orientare il successivo restauro.

### 6.2.2. Preconsolidamento

Quando la superficie materica presenta un cattivo stato di conservazione, le operazioni di pulitura possono richiedere un consolidamento parziale preventivo, così da evitare possibili perdite di materiale. L'opportunità di questo trattamento appare strettamente legata alla natura del materiale: in un travertino, pietra quasi priva di microporosità e, dunque, molto resistente al degrado fisico-meccanico, la pulitura non richiede in genere un preconsolidamento. Nei materiali che presentano fenomeni di decoesione, come polverizzazioni o esfoliazioni, la pulitura potrebbe determinare ulteriori danni meccanici o provocare un'ulteriore perdita di materia e viene pertanto richiesto un preconsolidamento. In questa fase, il consolidamento ha carattere parziale in quanto, nell'eseguire queste operazioni, è fondamentale non ostacolare le successive fasi dell'intervento di restauro, come viceversa può accadere scegliendo materiali inadeguati che, rendendo la superficie idrorepellente già in una fase iniziale, impediscono puliture con solventi ad acqua e consolidamenti con adesivi e stucchi. I materiali idrorepellenti possono essere utilizzati solo quando tutte le altre lavorazioni sono già state portate a termine, ovvero nella fase di protezione della superficie (Torraca, 1995). Per un'efficace stesura dei prodotti preconsolidanti è molto spesso opportuno sfruttare le caratteristiche della superficie deteriorata nel tempo, facendo affidamento su quelle che si potrebbero de-

finire “ferite esposte” (Gabrielli, 1984). Le superfici di frattura recente consentono infatti al preparato di entrare all’interno del materiale senza correre il rischio di consolidare, rendendoli così di più difficile asportazione, anche gli strati superficiali di sporco. Negli intonaci, allo stesso modo, le zone di distacco e rigonfiamento consentono l’ingresso del fluido, che entra così in contatto con il retro del rivestimento (tale accorgimento risulta prezioso in particolare con gli intonaci dipinti, poiché evita il contatto diretto del consolidante con la pellicola pittorica).

Uno dei prodotti oggi più diffusi per queste applicazioni è il silicato di etile (estere dell’acido silicico), un composto inorganico di sintesi, il cui effetto è legato alla precipitazione di silice idrata, che avviene liberando unicamente prodotti secondari volatili. Da un punto di vista strettamente chimico, questa sostanza è nata per applicazioni su elementi argillosi, così che la precipitazione di silice all’interno della struttura di materiali a componenti silicatici produca risultati ottimali, osservabili ad esempio nel recente intervento sui paramenti in laterizio della Porta Palatina di Torino condotto dalla Soprintendenza per i Beni Archeologici del Piemonte. È tuttavia ormai frequente l’impiego del silicato di etile anche su elementi calcarei, dove si verifica comunque un effetto consolidante, più debole ma ugualmente in grado di rispondere alle esigenze del preconsolidamento. In occasione dei lavori realizzati nel 1990 alla stazione di S. Maria Novella di Firenze, questo materiale è stato, ad esempio, utilizzato come preconsolidante delle lastre marmoree che rivestono le pareti (Berti, Gentile, 1990). Proprio questa versatilità d’impiego rivela la natura prettamente fisica dell’interazione che si stabilisce fra le molecole del materiale da consolidare e quelle di silice amorfa: queste ultime formano un reticolato che va ad abbracciare le prime, accrescendo la capacità di resistenza meccanica della superficie. Il silicato è disponibile in commercio già diluito in solvente (composto sufficientemente fluido che favorisce la penetrazione in profondità) con additivi in grado di accelerarne la reazione. Può essere applicato a pennello o iniettato con siringhe; il trattamento deve essere ripetuto dopo 15-20 giorni, garantendo l’assorbimento degli strati più interni. Un inconveniente non trascurabile di questo prodotto è rappresentato dall’occasionale formazione di uno strato di silice resistente alla pulitura; il suo colore grigiastro, fra l’altro, evidenzia la zona preconsolidata dal resto (Torraca, 1995); questa formazione non può essere rimossa con mezzi chimici e richiede l’ausilio di una lieve micro-sabbatura.

I prodotti alternativi presenti sul mercato appartengono alla famiglia dei siliconici, che sono però caratterizzati da uno spiccato effetto idrorepellente; quest’ultimo, se da una parte protegge la materia, dall’altra impedisce la successiva applicazione di altri prodotti e rende questo tipo di materiali inadatti al preconsolidamento. Un problema analogo è presente nelle sostanze della famiglia dei silani, che associano a un potere consolidante (minore di quello del silicato di etile) anche un minimo di azione idrorepellente e possono rappre-

sentare un giusto compromesso nei casi in cui sia consentita una minima capacità idrorepellente del materiale.

Il preconsolidamento, come primo intervento diretto sull'opera, può a volte giocare un ruolo fondamentale per la totale comprensione delle cause di degrado. Il già ricordato intervento sulle maioliche del chiostro di S. Chiara a Napoli ne costituisce un esempio significativo: iniettando un silano liquido all'interno dello smalto distaccato dal corpo ceramico e premendo lievemente sulla superficie, i restauratori osservavano fuoriuscire una pasta verdastra, successivamente ricondotta alla presenza di alghe (Torraca, 2001).

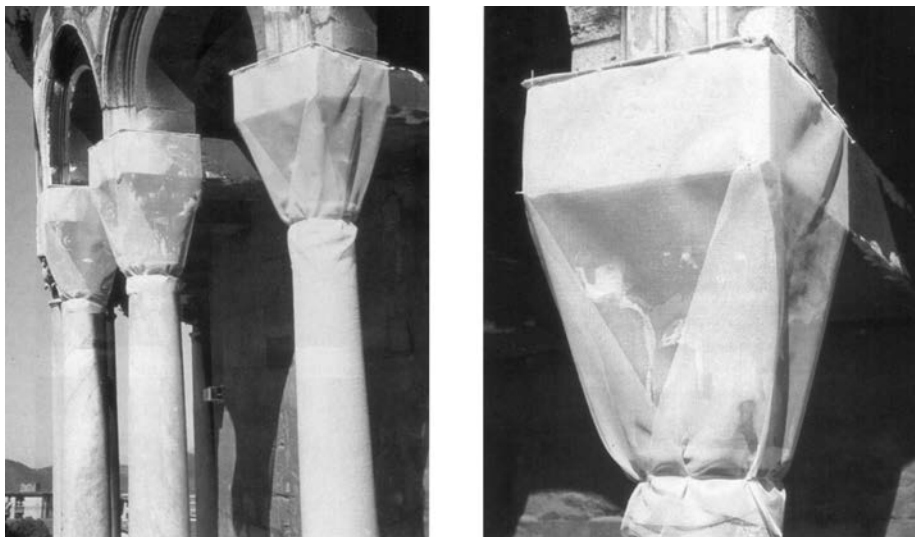
Nel corso del complesso restauro condotto sulle superfici esterne della Torre di Pisa, le operazioni di preconsolidamento hanno accompagnato tutta la lunga fase di studio dei materiali e sperimentazioni di laboratorio costituendo, per un periodo di più di due anni, l'unica operazione condotta direttamente sul monumento. Inizialmente l'intervento è stato effettuato sulle parti più a rischio, perlopiù zone dell'apparato decorativo che rischiavano di distaccarsi completamente. Nel corso del primo cantiere si è dunque provveduto alla messa in opera di involucri protettivi, realizzati con reti antigrandine fissate tramite elementi lignei sui sistemi mensola-capitello, allo scopo di contenere le parti disgregate (FIG. 6.1). Altrove si è fatto ricorso a comuni velature con garze di cotone preventivamente impermeabilizzate al fine di ridurre la quantità di adesivo (Paraloid B72 al 25% diluito in tricloretoano) necessaria al fissaggio.

L'intervento sul campanile pisano doveva essere totalmente reversibile e, per questo, l'uso del silicato di etile è stato limitato solo a circoscritte porzioni; l'efficacia della lavorazione è stata soprattutto affidata a una diffusione il più possibile omogenea del prodotto, favorita dalla disposizione di una copertura dell'impacco in grado d'impedire un'evaporazione troppo rapida del preparato e di garantire un contatto prolungato con la superficie. Tali accorgimenti permettono inoltre di migliorare la distribuzione del consolidante in profondità (D'Elia, Capponi, Santamaria, Torraca, 2005).

Un anno più tardi si è tornati a intervenire sul monumento per risolvere i seri rischi che coinvolgevano numerose parti aggettanti, quali cornici marcapiano, arcate dei loggiati, mensole e capitelli. Il cantiere della Torre, fra l'altro, è stato contrassegnato dal carattere d'urgenza (come spesso accade per molti interventi di preconsolidamento) e si è per questo protratto durante i mesi invernali. Questa scelta iniziale ha avuto precise conseguenze sull'impossibilità di ricorrere all'uso di resine epossidiche; tali potenti adesivi strutturali non sono infatti in grado di lavorare in presenza di basse temperature e con alti livelli di umidità. In risposta a questo severo vincolo si è scelto di utilizzare esclusivamente malte idrauliche: nei vuoti maggiori è stata inserita una malta strutturale realizzata con premiscelato a basso contenuto salino e inerti di sabbia di fiume di granulometria elevata, in proporzione 1:2; in presenza di fessure, scagliature ed esfoliazioni è stata scelta una malta di calce idraulica e polvere di marmo, setacciata con un vaglio di 40 *mesh* e opportunamente sele-

FIGURA 6.1

Torre di Pisa. Involucri protettivi realizzati attorno ai fusti e ai capitelli sottopendenza durante le fasi di messa in sicurezza nel cantiere di restauro



Le semplici strutture in legno e rete antigraffio si sono mostrate resistenti nel tempo, nonché molto efficaci nel contenere le parti in via di distacco e nel limitare l'accumulo di polveri sugli elementi scultorei.

Fonte: D'Elia, Capponi, Santamaria, Torraca (2005).

zionata per avvicinare le caratteristiche cromatiche della superficie da consolidare, in rapporto 1:3. In questa fase, i frammenti più grandi, che presentavano un evidente pericolo di caduta, sono stati completamente rilevati (attraverso un'accurata documentazione grafica e fotografica della loro esatta posizione in opera), asportati e catalogati (identificati con un codice alfanumerico), per essere poi sottoposti separatamente alle altre fasi del restauro e, infine, riposizionati nel sito originario (D'Elia, Capponi, Santamaria, Torraca, 2005).

L'intervento di restauro condotto negli anni 1998-99 sui 21 edifici sepolcrali conservati nella necropoli vaticana è stato in gran parte condizionato dalle caratteristiche tipiche degli ambienti ipogei interessati da un costante afflusso di visitatori, tali da richiedere un approccio molto cauto e rispettoso della materia antica e la riduzione al minimo delle opere di consolidamento. La considerevole incidenza di fenomeni quali la mancanza di coesione e adesione nelle malte e nei laterizi ha portato a effettuare gran parte dei consolidamenti prima delle fasi di pulitura. La disgregazione delle cortine laterizie e degli elementi lapidei con cui sono costituite le pareti è stata trattata con cicli d'imregnazione con silicato di etile. Tale prodotto perde nettamente di efficacia con l'aumento di umidità all'interno dei manufatti trattati e, per questa ragione, è stato utilizzato soltanto nelle situazioni più gravi, rimandando a futuri inter-



venti (magari attuabili con prodotti nuovi e maggiormente efficaci) la realizzazione di opere più risolutive. Negli ultimi anni si sta appunto sperimentando l'impiego di silicati all'acqua come consolidanti; tale tipo di silicati esiste già da tempo fra i prodotti in uso per la pittura: esso viene impiegato come diluente e nelle tinte ai silicati, garantendo la capacità di agire anche in ambienti con alti valori di umidità relativa.

I distacchi riscontrati sui paramenti murari dei mausolei della necropoli sono stati preconsolidati tramite infiltrazioni puntuali, poco invasive e differenziate a seconda della scala d'intervento: sono state effettuate microiniezioni con consolidanti inorganici (come ad esempio il Ledan, una malta di calce idraulica additivata) e, in alcuni casi, si è fatto ricorso a prodotti di natura organica, quali le resine acriliche (come il Primal) in emulsioni a differenti percentuali (Adamo *et al.*, 1999).

Il ciclo di affreschi della *Leggenda della vera Croce*, dipinto sulle pareti della cappella maggiore nella basilica di S. Francesco di Arezzo, presentava agli inizi degli anni ottanta del Novecento condizioni di degrado decisamente preoccupanti. Il capolavoro di Piero della Francesca, risalente alla metà del xv secolo, si è rivelato in tutta la sua complessità grazie a una lunga serie di studi (analisi a luce radente, campagne fotografiche a raggi infrarossi e ultravioletti, analisi stratigrafiche di microcampioni ecc.) che hanno mostrato come il ciclo pittorico non sia stato interamente realizzato "a buon fresco", ma abbia anche comportato l'impiego di tecniche tipiche della pittura su tavola, quali la tempera e la tempera grassa. Questo ha costituito un considerevole banco di prova per i progettisti del restauro (curato dall'Opificio delle Pietre Dure in collaborazione con la Soprintendenza per i Beni Ambientali, Architettonici, Artistici e Storici di Arezzo), che hanno elaborato metodologie d'intervento specifiche per ciascuna delle parti dell'opera, omogenee per tecnica pittorica e stato del degrado.

Oltre al fenomeno della solfatazione, già molto diffuso e in rapida espansione, erano presenti esfoliazione della pellicola pittorica, distacco degli strati d'intonaco, danni dovuti ai dissesti murari e un vistoso affioramento salino (facilmente relazionabile alle iniezioni cementizie di un precedente restauro datato al 1915). L'intervento, iniziato nel 1985 e protrattosi fino al 2000, ha richiesto operazioni urgenti di preconsolidamento; le aree a rischio erano infatti caratterizzate da un tale livello di degrado da non poter sostenere alcun intervento di pulitura. Fra le varie tecnologie disponibili per contrastare la diffusa contaminazione da gesso dovuta ai processi di solfatazione, dopo una lunga serie di test condotti in laboratorio e *in situ*, la più efficace è sembrata quella a base di idrossido di bario, anche nota come "metodo Ferroni-Dini". Questo metodo di desolfatazione, già utilizzato in numerosi interventi dai tecnici di scuola fiorentina, prevede la stesura, tramite impacco, dell'idrossido di bario, in grado di reagire con il carbonato di calcio dando origine, come unici prodotti, a carbonato di bario e a idrossido di calcio (calce spenta); quest'ultimo può così iniziare un nuovo processo di presa attraverso la reazione con il

biossido di carbonio contenuto nell'aria e riuscirebbe in tal modo a ricostituire una coesione con il supporto. I sostenitori di questo metodo ne evidenziano l'efficacia e la scarsa invasività. Nell'intervento di Arezzo, la tecnica di applicazione è stata differenziata in base al degrado presente nelle diverse zone della superficie. Dove si è rivelato necessario, l'impacco è stato preceduto da iniezioni di caseato di ammonio e di acqua di calce, fatte fluire contemporaneamente tramite una siringa doppia e veicolate da uno strato di carta giapponese. Dopo un accurato tamponamento della superficie con una spugna naturale, è stato applicato l'impacco, molto sottile, di pasta cellulosica e idrossido di bario (in quantità di 5 g su 100 cc di acqua deionizzata); questo è stato lasciato per circa un'ora, prevenendo l'asciugamento del supporto, al fine di evitare strappi durante la rimozione. Nei punti ove, a causa di una condizione pulverulenta, la superficie non avrebbe sopportato la posa e, soprattutto, la rimozione di un impacco, si è proceduto a una successiva applicazione di più strati di carta a grammatura crescente, così da arrivare alla stesura a pennello dell'idrossido di bario. L'azione, garantita altrove dalla presenza dell'impacco, è stata qui ottenuta tramite la stesura a pennello di sepiolite (tempo di contatto dai 30 ai 40 minuti), in grado di proteggere da un'eventuale carbonatazione superficiale. È da notare come la presenza di fissativi acrilici sulla superficie, risalenti al precedente restauro, non abbia ostacolato l'efficacia del "metodo Ferroni-Dini"; tale sostanza, ormai non più compatta, ha infatti permesso alla soluzione di bario di penetrare agevolmente all'interno della materia degradata (Matteini, Giovannoni, Lazzeri, 2001).

### 6.2.3. Pulitura

La pulitura e le tematiche a essa legate (patina, tracce di lavorazione, storizzazione del manufatto ecc.) sono sempre più divenute un tema centrale nell'ambito del dibattito sul restauro critico-conservativo e in particolare attorno alla logica del "minimo intervento". Fin dagli anni settanta del secolo scorso, l'acquisizione, nel campo del restauro dei monumenti, di principi provenienti dal restauro delle opere d'arte ha infatti cercato di ricondurre anche l'architettura agli standard qualitativi più opportuni al valore dell'opera antica. L'attuale tecnologia di pulitura delle superfici consente quindi una scala della lavorazione "al centimetro" e l'uso di tecniche distinte da punto a punto, in funzione del tipo di materiale e dello stato di conservazione. Ecco dunque che la continua sperimentazione (portata avanti dagli specialisti e dall'industria del settore), accanto alla vivacità del dibattito teorico, mette oggi a disposizione una gamma molto vasta di tecniche e macchinari, rendendo però molto arduo il ruolo del tecnico-progettista, che nonostante la larga multidisciplinarietà dei temi, è comunque chiamato a dire l'ultima parola sui trattamenti delle superfici e sul conseguente effetto estetico. Un buon restauro deve infatti garantire operazioni di pulitura graduabili e controllabili, selettive, delicate, prive di residui e con costi ragionevoli (Pedemonte, Fornari, 2003).

I costi rappresentano spesso il vero nodo problematico del restauro, soprattutto negli interventi comunemente eseguiti sulla cosiddetta architettura “minore”; qui prevale infatti un concetto di “pulitura” intesa piuttosto come “levigatura” e asportazione superficiale di sporco (e di materiale), facilmente ottenibile attraverso metodi invasivi e rapidi, notevolmente più economici di quelli più rispettosi della fabbrica antica. Le condizioni dei comuni cantieri di “restauro urbano” sono in realtà ferme alle consuetudini e alle modalità operative diffuse diversi decenni or sono, fenomeno che palesa un sensibile divario fra una ricerca in costante sviluppo e gli interventi “d’eccellenza”, su pochi e fortunati edifici, e lavori correnti sul tessuto storico diffuso. Gran parte di questo consistente divario è legata alla scarsa attenzione che i committenti (privati, ma anche pubblici) pongono alle tematiche della conservazione, ma anche alla bassa professionalità del mercato diffuso. In realtà, soluzioni di compromesso, in grado di conciliare costi e conservazione, sono pienamente praticabili garantendo anzitutto la specializzazione di chi interviene, a livello sia progettuale che operativo, così da selezionare le tecniche più opportune. Per l’architettura storica minore occorrerà, in particolare, ricercare soluzioni tecniche che, per loro natura, presentano un ampio raggio di azione (idro-sabbatura con uso di abrasivi di nuova generazione – spugna poliuretana, materiali organici –, pulitura ad acqua, impacchi) e non richiedono particolare manualità da parte dell’operatore (non si penserà di certo a una pulitura laser estesa su di un’intera facciata).

Le tecnologie di pulitura, da calibrare a seconda del livello di precisione richiesto, sono di tipo meccanico, ad acqua, chimica, ad ultrasuoni, laser.

### *Pulitura meccanica*

Questa tecnologia, realizzabile con mezzi differenti, prevede sempre l’esercizio di un’azione abrasiva sulla superficie da pulire. Le tecniche più diffuse sono la microsabbatura (e minisabbatura) e l’idrosabbatura.

La prima prevede l’impiego dell’aria come mezzo di trasporto delle particelle abrasive e permette di combinare variamente una vasta gamma di parametri che possono graduare l’intensità dell’intervento da livelli accettabilmente delicati a fortemente invasivi. La distruttività dello strumento aumenta, in particolare, con la pressione di esercizio (variabile da 1 a 200 atmosfere); con la durezza dell’abrasivo scelto, che può essere molto aggressivo, come l’allumina (o il vetro) sotto forma di microsferi, oppure lievemente incisivo, come i materiali organici; con la grana del materiale (grossa, circa di 20 *mesh*, o piccola, con diametri fino a 120 *mesh*). Gli interventi più radicali, naturalmente, sono associati a costi più contenuti e a una maggiore velocità di esecuzione, ma comportano rischi elevati di danneggiamento, soprattutto con materiali teneri o pietre con struttura macrocristallina (marmi e graniti), sottoposti a sfaldatura e al conseguente distacco dei cristalli (Torraca, 1995).

Un valido esempio d’impiego di questa tecnologia è costituito dall’inter-

FIGURA 6.2  
Torre di Pisa. Impiego di strumenti meccanici



Rimozione meccanica con vibroincisore dei residui di malta debordanti sulla superficie dei conci.

vento condotto negli anni novanta del secolo scorso sulla facciata in travertino di S. Andrea della Valle a Roma (restauratori Paolo e Laura Mora). Si è qui scelta una pulitura a secco per le caratteristiche materiali di questa architettura, contrassegnata dalla presenza di una gran quantità di perni metallici per il collegamento dei blocchi e il sostegno delle sculture e dall'esistenza di numerose stuccature utilizzate per colmare gli evidenti difetti del travertino. La micro-sabbatura, in questo caso, è stata realizzata con minipistole ad aria compressa operanti a bassa pressione (2-2,5 atmosfere) e con un abrasivo di grana fine piuttosto incisivo, come l'allumina a 100 *mesh* (Torraca, 2001).

Nell'idrosabbatura l'acqua viene sostituita all'aria come mezzo di trasporto, con una notevole diminuzione del quantitativo di polveri generate e l'abbattimento dei rischi d'inalazione per gli operatori. La superficie materica,

inoltre, risente della riduzione del calore sviluppato dall'abrasione e subisce di conseguenza effetti meno lesivi.

Altri interventi di pulitura meccanica sono realizzati manualmente come finitura e completamento di altre lavorazioni. Gli utensili impiegati a tal fine variano dalla semplice carta vetrata ai diversi tipi di bisturi, spatole e spazzole, fino alle microfresse e ai trapani di provenienza odontoiatrica (FIG. 6.2). Nell'intervento sul portico della villa di S. Marco, sita nell'*Ager Stabianus*, in Campania, gli affreschi, databili al I secolo a.C., sono stati liberati dal tenace strato di natura calcarea ceneritica che li ricopriva tramite una particolare attrezzatura per la pulitura meccanica manuale. I restauratori hanno utilizzato minitrapani a velocità regolabile elettronicamente, dotati di piatti rotanti flessibili e dischetti in polvere di vetro. Grazie a questa strumentazione è stato possibile ottenere una rimozione stratigrafica delle concrezioni senza intaccare la superficie decorata; la pittura riportata alla luce conservava consistenti tracce di una patina di cera, probabilmente risalente al tempo dell'esecuzione (Barbet, Miniero, 1999).

### *Pulitura ad acqua*

Una prima famiglia di metodi ad acqua comprende la nebulizzazione e l'atomizzazione (procedimenti simili, differenziati fra loro per le dimensioni delle goccioline utilizzate nel getto); questi procedimenti nebulizzano il liquido e, tramite macchinari dotati di numerose cannule facilmente orientabili, lo dirigono verso il manufatto con traiettorie indirette di tipo parabolico (FIG. 6.3).

Tali tecnologie si basano sull'incremento della capacità solvente ed emolliente dell'acqua sulle superfici solide quanto più essa viene suddivisa finemente, aumentando in tal modo la superficie di contatto. Inoltre, è stato ormai ampiamente confermato dai dati sperimentali che la trasformazione dei nebulizzatori per ottenere getti di maggior diametro e potenza con orientamenti che colpiscono direttamente le superfici materiche non offre alcun vantaggio. Si ottengono in tal modo esclusivamente un costo più elevato, legato allo spreco d'acqua, e un inumidimento dei materiali che può rivelarsi pericoloso. Il metodo appare comunque molto flessibile, essendo applicabile anche su superfici non piane (come quelle di decorazioni e capitelli), ma, nella maggior parte dei casi, è insufficiente per una pulitura in profondità; le incrostazioni più resistenti richiedono quindi interventi successivi di rifinitura con altre tecniche. Nel restauro della Fontana di Trevi a Roma, ad esempio, la semplice esposizione all'azione di acqua atomizzata, in alcuni punti unita all'intervento con spazzole in fibra vegetale, si è rivelata sufficiente a rimuovere gli strati di sporco accumulatisi su di una consistente porzione della superficie del monumento (parte della facciata, dei pilastri e dei fusti delle colonne). Altrove è stato necessario far ricorso a una localizzata microsabbatura per la totale rimozione dei residui (Cooperativa "Conservazione Beni Culturali", 1992). Occorre però fare attenzione a non prolungare eccessivamente l'azione dell'ac-

FIGURA 6.3  
Roma, Tempio di Adriano. Pulitura ad acqua atomizzata



Cannule di atomizzatore fissate al ponteggio e variamente orientate in modo da bagnare uniformemente la superficie di uno dei capitelli del tempio.

Foto di M. Guaricci.

qua, che non migliora il risultato finale ma, viceversa, può comportare un'eccessiva imbibizione del materiale e innescare problemi di deterioramento.

Diversamente, l'acqua può essere applicata a diretto contatto con la superficie tramite l'uso di adeguati materiali di supporto. La realizzazione degli impacchi rende possibile un notevole prolungamento del tempo di contatto fra liquido e superficie; parallelamente, grazie alla presenza dell'ispessente, l'evaporazione viene ridotta, consentendo così una più efficace penetrazione in profondità dell'acqua. I materiali utilizzati come supporto sono essenzialmente di due tipi: la polpa di cellulosa e le argille altamente assorbenti (come la sepiolite e l'attapulgitite) e facilmente riutilizzabili. La stesura di un impacco si opera in quattro fasi: 1. sgrassaggio della superficie grazie all'azione di opportuni solventi (acetone o soluzioni di tensioattivo), al fine di permettere l'adesione dell'ispessente e l'assorbimento della soluzione attiva; 2. applicazione manuale (o a spatola) dell'impacco per uno spessore variabile dai 2 ai 4 cm (il rischio di un'eventuale evaporazione troppo rapida della soluzione a seguito di particolari condizioni ambientali può essere evitato coprendo l'ispessente con un telo in materiale plastico o con un foglio di alluminio. La copertura deve essere però rimossa adeguatamente prima dell'impacco, così da garantire la migrazione in superficie della frazione liquida residua, spesso portatrice di pericolosi pigmenti o composti); 3. rimozione manuale del materiale dopo un tempo predeterminato grazie alla realizzazione di campioni di pulitura (fino a un massimo di 48 ore) (la fase di rimozione dell'impacco richiede molta attenzione, soprattutto se la superficie d'applicazione è molto porosa – ad esempio con le arenarie – o se i tempi di applicazione sono stati troppo lunghi e hanno determinato un'essiccazione eccessiva – errore che può rendere notevolmente difficoltosa la rimozione dell'ispessente); 4. lavaggio con acqua corrente (Pedemonte, Fornari, 2003).

Questa tecnica, molto economica, è inoltre poco pericolosa per l'opera d'arte, ma, anche in questo caso, è frequente incontrare zone di depositi comunque troppo resistenti, anche dopo diversi cicli di applicazione, che richiedono pertanto interventi di finitura meccanica (come microsabbature e rimozioni con microfres). Anche se sono state fra le prime tecniche di pulitura poco invasiva, oggi gli impacchi di pura acqua non sono più considerati un sistema autonomo: essi vengono spesso utilizzati, al contrario, come coadiuvanti nell'estrazione dei sali solubili dalle superfici porose o per eliminare le tenaci macchie giallo-brune che frequentemente, al termine di una pulitura meccanica, si vedono comparire al di sotto delle croste nere (Torraca, 1995). Macchie di questo tipo sono emerse sulle superfici in travertino della basilica di S. Andrea della Valle al termine del già citato intervento di pulitura a secco. Per la rimozione di queste sostanze coloranti si è scelto di ricorrere a interventi puntuali, singolarmente calibrati, eseguiti con impacchi di sepiolite impastata con una ridotta quantità d'acqua, al fine di ridurre la quantità di liquido in grado di penetrare in profondità. Questi impacchi molto densi sono stati lasciati asciugare sul posto e successivamente rimossi con una semplice

FIGURA 6.4  
Sermoneta, cantiere-scuola della Specializzazione in Beni Architettonici e del Paesaggio,  
Università di Roma "Sapienza". Pulitura con EDTA



Stesura di un impacco di EDTA in polpa di cellulosa sulla superficie di un paramento murario ricoperto da residui di patina biologica.

spazzolatura. Ove necessario, l'applicazione è stata ripetuta più di una volta, fino al raggiungimento del risultato desiderato (Torraca, 2001).

#### *Pulitura chimica*

La pulitura chimica comporta l'arricchimento della soluzione acquosa con cui viene imbibito l'ispessente con principi attivi di varia natura. I prodotti sono perlopiù miscele di composti ad azione acida o basica, addizionati con tensioattivi, solventi opportunamente selezionati o biocidi (Pedemonte, Fornari, 2003).

La pratica di cantiere ha condotto a un ventaglio di formulazioni relativamente ristretto, che prevede soluzioni acquose quasi sempre a base di carbonato d'ammonio (un sale lievemente basico) in varie concentrazioni, spesso addizionate con il sale bisodico dell'EDTA (acido etilen-di-ammino tetra-acetico, un chelante del  $\text{Ca}^{++}$ ; FIG. 6.4). Tale composto risulta molto efficace nella rimozione di croste nere, concrezioni calcaree e sali colorati, ma le condizioni



ambientali del contesto sono determinanti per la qualità dei risultati. Questi appaiono, ad esempio, quasi del tutto inefficaci con le basse temperature (pochi gradi sopra lo zero) e richiedono pertanto un riscaldamento preliminare della soluzione da disporre sull'impacco. La pulitura chimica appare decisamente più costosa e aggressiva di quella ad acqua, ma il suo limite maggiore consiste nella scarsa selettività che consente.

Sugli stucchi della cappella Contarelli in S. Luigi dei Francesi (Roma), l'operazione di pulitura è stata eseguita con applicazioni di compresse di polpa di carta imbevute con una miscela leggermente basica (50 g di carbonato di ammonio in un litro d'acqua), per una durata di circa 12 ore. Fra la superficie degli stucchi e la compressa è stato steso un foglio di carta giapponese per evitare l'eccessiva penetrazione in profondità della soluzione. Per il trattamento dei rivestimenti marmorei, al fine di evitare fenomeni di sbiancamento delle superfici, la pulitura è stata eseguita con compresse di carta giapponese imbevute con una miscela appositamente studiata di solventi CAD (carbonato di ammonio in soluzione satura e dimetilsolfossido), in proporzione 1:1, lasciate agire per circa 45 minuti (Vazio, 2002).

Nel restauro del grande globo bronzeo sovrastante la cupola vaticana (2005) è stato necessario far ricorso a differenti trattamenti di pulitura chimica in conseguenza del diverso stato di conservazione riscontrato fra le zone alte e la calotta inferiore, ove erano presenti strati di deposito molto più compatti. Nella parte superiore (circa il 65% dell'intera superficie), è stato effettuato un trattamento a impacchi di sale EDTA trisodico in soluzione al 10% su carta giapponese e polvere di cellulosa, applicati per tempi di 6-9 minuti. Questo trattamento è stato sufficiente per riportare alla luce la *facies* originaria della superficie, senza intaccare la preziosa e antica doratura; nelle aree inferiori, invece, si è reso necessario ricorrere all'uso di resine scambiatrici di ioni. In questo caso, risultati soddisfacenti sono stati ottenuti con una resina Amberlite SH cationica forte, applicata in un ciclo unico della durata di 4 minuti, con successivo risciacquo a mezzo di impacchi di acqua demineralizzata (Gabrielli *et al.*, 2005).

### *Pulitura a ultrasuoni*

La pulitura a ultrasuoni si basa sull'emissione di onde sonore di alta frequenza generate da una sorgente meccanica e trasferite, tramite un flessibile molto sottile, a una spatola vibrante; l'azione della spatola migliora sensibilmente bagnando la superficie, così da garantire un buon contatto fra lo strumento e il materiale. Il macchinario per la produzione di ultrasuoni è molto maneggevole e si presta all'uso su parti difficilmente raggiungibili; tale caratteristica, nonché la notevole precisione che tale tecnica garantisce quando veicolata da operatori esperti e di buona manualità, rende il sistema a ultrasuoni perfetto per interventi di finitura su aree di limitata estensione quali, ad esempio, le parti decorate da rilievi marmorei. Un caso d'impiego di tale tecnologia è il delicato

intervento condotto sull'edicola marmorea del Tempietto sul Clitunno nel 1985 a cura della Soprintendenza per i Beni Ambientali, Architettonici, Artistici e Storici dell'Umbria (Benazzi, 1985).

### *Pulitura con laser*

Per molti versi, il sistema a laser può essere accostato alla tecnologia a ultrasuoni già descritta. Anche in questo caso s'impiega un macchinario di dimensioni ridotte e, pertanto, facilmente spostabile, la tecnica richiede sempre un notevole impegno di manodopera altamente qualificata, ma assicura, nel contempo, un'elevata precisione e un'alta selettività di applicazione.

La prima sperimentazione del laser nel campo del restauro risale agli anni settanta del Novecento, quando si sperimentarono alcune modeste applicazioni limitate al settore della statuaria; nel giro di pochi anni si sono sviluppati strumenti semplici e di facile impiego.

La tecnica si basa sull'uso di una sorgente di radiazioni luminose ad elevata energia che generano nel punto di impatto una temperatura di 4-5.000 °C. Questo calore intenso provoca l'immediata vaporizzazione della materia da asportare, consentendo, teoricamente, di intervenire su strati sottilissimi. Dal punto di vista pratico, la difficoltà principale è consistita nella messa a punto di macchine in grado di contenere entro tempi molto brevi, nell'ordine dei microsecondi, l'emissione del raggio, così da evitare la diffusione del calore attorno al punto colpito e il conseguente danneggiamento di un'area consistente. Le più sofisticate apparecchiature odierne affidano all'elettronica la gestione dell'emissione di impulsi energetici e cercano di collegare, per la precisione nel puntamento, la sorgente laser con una fibra ottica, così da condurre la radiazione nella zona desiderata con il solo spostamento del manipolo ottico, collegato tramite un cavetto, senza dover muovere l'intera apparecchiatura.

Rispetto ai metodi di pulitura meccanica, il laser garantisce una maggiore efficacia di applicazione su materiali decoesi, in quanto può utilizzarsi senza che sia necessario un preconsolidamento superficiale; quest'ultimo, infatti, rende il più delle volte difficoltosa la rimozione dei depositi. Tuttavia, se non correttamente applicata, anche la tecnica laser può produrre risultati insoddisfacenti, ad esempio dando origine a superfici caratterizzate da una fitta "picchiettatura", corrispondente ai punti d'impatto dell'impulso; si determina in tal modo una microfrattura diffusa dello strato esterno della materia antica che può comportare la perdita di tutte le tracce di lavorazione e delle eventuali patine, così come a volte accade con una comune microsabbatura (Torraca, 1995). Ad oggi, la pulitura al laser è utilizzata comunemente sia su superfici lapidee che metalliche come pure sui dipinti murali; ne sono esempi i restauri condotti a Firenze, sia sulle formelle del Campanile di Giotto (2003) che sulla Porta del Paradiso del Battistero (2000-04; Siano, Salimbeni,

2007), nonché a Venezia, sulle superfici dei fronti della Libreria Marciana (2001-03).

### *Biocidi*

Sono definiti biocidi tutti i trattamenti finalizzati all'uccisione o all'arresto della crescita degli organismi viventi. A tale scopo possono rispondere interventi di tipo sia fisico che chimico. Fra i primi si possono annoverare la tecnica a radiazioni o a ultrasuoni, così come la semplice estirpazione manuale. I più diffusi sono però i rimedi di tipo chimico, in grado di rispondere a casistiche molto varie di specie organiche diverse e di condizioni di aggressione.

I biocidi chimici sono di tipo organico o inorganico e presentano formulazioni molto diversificate, che dipendono dal tipo di attacco organico e dall'interazione fra il prodotto e la materia del monumento. Quest'ultima è regolata da un elevato numero di fattori, fra i quali si trovano, oltre alla composizione chimica del composto, la concentrazione della soluzione, il tempo di contatto, le condizioni ambientali (soprattutto espresse da temperatura, umidità ed esposizione all'irraggiamento solare) e le caratteristiche chimico-fisiche del materiale da trattare (Pedemonte, Fornari, 2003). Di particolare importanza è, infine, il controllo della tossicità del prodotto, non solo per gli operatori, ma anche per tutto l'ambiente che circonda il monumento, quasi mai perfettamente confinabile durante e dopo i trattamenti.

Le attuali modalità di applicazione dei biocidi sono molto controllate, per evitare di spargere nell'ambiente eccessive quantità di veleni e per selezionare di volta in volta solo i prodotti specifici per gli organismi da trattare. Si sottolinea, fra l'altro, che sono frequenti i casi di "autoimmunizzazione" delle specie organiche, in grado di raggiungere con il tempo la resistenza a un determinato agente chimico, specialmente se applicato di frequente e in dosi limitate.

Le metodologie sulle quali si basano i prodotti attualmente in commercio sono essenzialmente costituite da: 1. assorbimento del biocida attraverso l'apparato foliare (tramite l'uso di semplici tensioattivi, inoffensivi per l'operatore); 2. assorbimento del biocida attraverso l'apparato radicale (con prodotti distribuiti sulle superfici, applicati a impacco o introdotti per iniezione – FIG. 6.5 –, che raggiungono i depositi di terriccio all'interno delle porosità dei materiali, dove si annidano gli organismi viventi); 3. inibizione dell'attecchimento tramite additivi inseriti nelle malte.

In quest'ultimo caso, al termine delle operazioni di pulitura, le malte di restauro (specialmente nella creazione di bauletti protettivi delle creste murarie) sono miscelate con additivi che ostacolano lo sviluppo di biodeteriogeni; tale sistema non contrasta la deposizione di terriccio ma, semplicemente, ne provoca l'infertilità.

Di recente si è sviluppato un indirizzo di ricerca rivolto a sperimentare l'impiego di enzimi che riescono efficacemente a ostacolare i processi vitali del

FIGURA 6.5

Sermoneta, cantiere-scuola della Specializzazione in Beni Architettonici e del Paesaggio, Università di Roma "Sapienza". Trattamento biocida



Applicazione a siringa di un biocida all'interno dell'apparato radicale di una pianta infestante, precedentemente rimossa tramite estirpazione manuale. La spugna asciuga e tampona gli eventuali percolamenti della soluzione sul paramento lapideo.

microrganismo dannoso per il monumento; la crescita e il comportamento degli enzimi risentono però fortemente dei fattori esterni, soprattutto temperatura e ph dell'ambiente: per tale ragione, nonostante alcuni risultati positivi ottenuti, particolarmente con i licheni, il loro impiego non è ancora diffuso nella pratica comune. I tecnici dell'Istituto Superiore per la Conservazione e il Restauro (ex ICR) hanno ad esempio fatto ricorso alla tecnologia della "rimozione enzimatica" nel corso dell'intervento sui dipinti murali conservati nella Stanza 114 della Domus Aurea (coordinamento di M. P. Nugari, 2005); gli enzimi sono stati chiamati a eliminare i residui delle cellule batteriche lì dove le tecniche di pulitura normalmente adottate non si sono dimostrate efficaci.

Un intervento semplice e diffuso di disinfestazione è quello realizzato sulle superfici lapidee esterne della Torre di Pisa, con la distribuzione a spruzzo e a pennello di un biocida ad ampio spettro di efficacia alla quale è seguita, a distanza di 15 giorni, la spazzolatura delle aree trattate fino alla rimozione de-

gli organismi devitalizzati. Le piante superiori sono state estirpate manualmente, cercando di asportare per quanto possibile l'apparato radicale e avendo cura di non recare danno ai materiali. Al termine delle operazioni di pulitura, le superfici sono state nuovamente irrorate con il biocida, operazione accompagnata da impacchi con biocidi all'interno delle fessure, dove si erano scoperte ricche colonie di biodeteriogeni ancora attive.

Il caso citato della Torre di Pisa ha costituito un interessante esempio di combinazione di tecniche di pulitura diverse, ognuna delle quali selezionata sulla base delle puntuali esigenze di porzioni superficiali anche molto limitate e coordinata con le altre in un delicato controllo complessivo delle lavorazioni in cantiere (D'Elia, Capponi, 2005).

Nel corso del cantiere di progetto qui descritto, le superfici in buone condizioni sono state risciacquate con una soluzione di acqua e tensioattivo (1 parte per 1.000), nebulizzata a spruzzo manualmente o con pistole ad aria compressa (a 2 atmosfere); il trattamento con spazzole in fibra vegetale di media durezza ha poi consentito di rimuovere i depositi di polveri e sostanze organiche incoerenti o debolmente coerenti. Tutte le superfici sono state infine trattate con acqua atomizzata.

Dove necessario, si sono utilizzati impacchi con soluzioni solventi, lasciati agire per tempi diversi (tra 15 e 240 minuti), valutati con l'ausilio di appositi test in base al punto di pulitura scelto e alla natura delle sostanze da rimuovere. I prodotti chimici utilizzati, miscelati in varie soluzioni, sono soprattutto carbonato di ammonio, detersivi non ionici (come il polioossietilene sorbitano monolaurate, 1 parte su 1.000), EDTA 2Na (sale bisodico di acido etilen-di-ammino tetra-cetico) e EDTA 4Na (sale tetrasodico di acido etilen-di-ammino tetra-cetico). Essi sono stati disposti su ispessenti quali polpa di cellulosa, sepiolite o HDK (silice micronizzata).

Per le superfici prive di decorazioni scultoree, in presenza di depositi coerenti di notevole spessore quali croste nere o depositi calcarei, si è fatto ricorso a diverse e numerose tecniche di pulitura meccanica, che hanno utilizzato bisturi o scalpelli, microtrapani, vibro-incisori, microscalpelli a percussione, micromartelletti pneumatici, microsabbiatrici. Queste ultime sono state caricate con inerti leggermente abrasivi, come il calcio carbonato precipitato, il carbonato di calcio sferoidale, l'ossido di alluminio, la polvere di pomice. Per i depositi coerenti che aderivano alle superfici decorate di particolare pregio, come i motivi vegetali dei capitelli, è stata impiegata la strumentazione laser.

La lunga scala interna alla Torre presentava i margini esterni delle pedate ricoperti da uno strato compatto di spessore variabile (da 0,01 a 1 cm), probabilmente composto da miscele di cere e oli; questo è stato rimosso prima meccanicamente e poi con applicazioni ripetute di resine a scambio ionico, che hanno però prodotto risultati parziali; si è pertanto preferito continuare ad assottigliare gli strati di grasso con il solo ausilio dei mezzi meccanici. Sempre le sollecitazioni meccaniche hanno consentito di rimuovere lo strato di gomme

da masticare schiacciate sugli scalini, problema purtroppo frequente nei monumenti soggetti ai maggiori flussi turistici. In questo caso è stato necessario applicare in aggiunta impacchi di ghiaccio preliminari, al fine di ghiacciare la gomma e favorirne il distacco, e impacchi finali per solubilizzare i residui con solventi volatili tipo acetone o trielina.

La campagna di pulitura è stata accompagnata dalla fase di rimozione delle stuccature giudicate inadeguate (per materiale, colore, esecuzione o stato di conservazione). Si è provveduto con particolare attenzione anche alla rimozione dei residui di malta debordanti sulla superficie dei blocchi lapidei, mentre le commessure ancora in buone condizioni sono state solo ridotte nello spessore (D'Elia, Capponi, 2005).

Nei mausolei della necropoli vaticana, il principale problema di pulitura è consistito nella difficile rimozione di strati di terra e sporco resi molto coerenti dalla presenza di incrostazioni carboniche e silicatiche. Anche in questo caso, la rimozione meccanica con strumenti di precisione, come microtrapani e microfresse e, nelle rifiniture, bisturi, si è rivelata la più risolutiva, anche se molto costosa. Per depositi più tenaci sono stati utilizzati anche impacchi a base di carbonati di ammonio su polpa di carta (rimossi dopo 3-4 ore), comunque propedeutici al trattamento con bisturi. Sono state rimosse meccanicamente anche le malte cementizie dei precedenti restauri, spesso debordanti dai giunti. Le cortine erano anche compromesse esteticamente dalla presenza di macchie nere di natura manganitica (minerale proveniente dall'argilla), trattate a loro volta con l'applicazione di compresse di garza imbevute di BDG. Tale complessante neutro acquoso (a base di idrossilammonio cloruro e idrazina idrossido) è altamente selettivo nei confronti dei sali di manganese, che diventano reversibili e si rimuovono con facilità dopo l'applicazione, tramite un semplice risciacquo con acqua demineralizzata (Adamo *et al.*, 1999).

Ripetuti lavaggi con tensioattivo ad ampio spettro biocida sono stati effettuati per contrastare gli attacchi biologici. Diversi trattamenti mirati devono essere però ciclicamente ripetuti negli interventi di manutenzione (sono previsti due cicli di disinfezioni l'anno, in primavera e in autunno). Un'accurata tipizzazione dei microrganismi ha consentito la definizione di biocidi selettivi, opportunamente sottoposti a test: batteri, alghe e attinomiceti sono stati trattati con il Troysan 174, in soluzione con isopropanolo (un alcool) al 5%, i microfunghi con Metatin 70/40, in soluzione con n-ottano (un solvente alcaico puro), al 3%.

L'impiego notturno di lampade germicide a raggi ultravioletti è attualmente in corso di sperimentazione, dovendosi soprattutto controllare i possibili effetti dei raggi UV sui pigmenti pittorici (Gabrielli, Zander, 2007).

La pulitura degli affreschi aretini di Piero della Francesca è stata invece rivolta soprattutto al raggiungimento di una radicale desolfatazione degli intonaci di supporto. L'intervento ha interessato tutta la superficie, ma i trattamenti sono stati differenziati in base alla tecnica pittorica impiegata (buon fre-

sco e tempera grassa) e allo stato di conservazione del dipinto. In corrispondenza delle aree a buon fresco gli impacchi di pasta cellulosica e ammonio carbonato sono stati additivati con sepiolite, così da ridurre la quantità d'acqua e trattenere più in superficie la soluzione attiva. In tal modo è stata anche ridotta la formazione di aloni giallastri dovuti a residui riferibili ai passati interventi. Nelle zone in cui la presenza di pigmenti a base di rame non permetteva il ricorso a composti di ammonio, si sono utilizzate resine a scambio ionico di tipo anionico (con opportuna granulometria e corretto ph), applicate con spatole in plastica su fogli di carta giapponese. In alcuni casi, per mantenere costante l'umidità delle resine e migliorarne la resa, si è sovrapposto a esse per circa un'ora un impacco di pasta cellulosica e acqua deionizzata. Il cielo raffigurato negli affreschi, eseguito con un pigmento a base di azzurrite e bianco di san Giovanni steso direttamente sull'intonaco, è stato pulito, dopo diverse prove, aggiungendo alle resine una piccola percentuale di ammonio carbonato, con buona azione desolfatante (Matteini, Giovannoni, Lazzeri, 2001).

#### 6.2.4. Consolidamento

Il consolidamento superficiale è un complesso di lavorazioni che mira essenzialmente a ristabilire la coesione e la continuità della superficie materica, soprattutto per impedire la penetrazione di acqua e l'ulteriore progressione del degrado; esso viene spesso realizzato ricorrendo a mezzi di natura chimica, per restituire coesione superficiale e resistenza agli strati interni raggiunti dal degrado. Alcuni composti consolidanti proteggono anche dall'acqua e, conseguentemente, dall'insorgenza di meccanismi di degrado, ma l'effetto protettivo non è mai assoluto e persistente, al punto che in alcuni casi si preferisce prevedere protezioni superficiali opportune.

Anche nel consolidamento delle superfici architettoniche, quasi mai si ricorre all'adozione univoca di singole metodiche, ma si preferisce piuttosto selezionare tecniche specifiche per le diverse patologie riscontrate, da applicare spesso in successione sulla stessa opera. Si possono classificare quattro gruppi di tecniche, rispettivamente finalizzate a: 1. ristabilire la coesione nel materiale; 2. risarcire lacune e piccole fessure; 3. incollare parti mobili o staccate e ricomporre frammenti; 4. effettuare iniezioni superficiali (microiniezioni) per incrementare localmente la resistenza e la tenuta della materia.

Si tratta in genere di interventi condotti a scala minuta, che comportano la massima attenzione dell'operatore per ogni dettaglio, anche se impercettibile dalla normale distanza d'osservazione. Tale meticolosità consente l'impiego di minime quantità di consolidante (ben nascosto dietro la superficie oppure steso in strati molto sottili), così da garantire una buona qualità estetica finale del lavoro: si conservano in tal modo in evidenza i segni del tempo sulla superficie

dell'opera e s'incrementa la capacità del materiale di resistere all'aggressione ambientale (Torraca, 1990).

### *Ristabilimento della coesione*

Il ristabilimento della coesione materica comporta i medesimi processi in uso nella fase di preconsolidamento; esso viene condotto come vero e proprio consolidamento su elementi decoesi che non necessitano opere di pulitura, fenomeno peraltro piuttosto raro in architettura. Questo trattamento, anche noto come "consolidamento per impregnazione", è utilizzato su materiale distaccato in granelli non più grandi di pochi millimetri e con fessure di qualche decimo di millimetro. L'alternativa fra l'impiego di consolidanti di natura organica o inorganica tende, negli ultimi anni, a favorire questi ultimi, con una certa propensione, legata a tradizioni culturali diverse, per il silicato di etile o per il bario idrato.

Una tecnologia interessante, ancora in fase sperimentale, prevede l'impiego, come consolidanti di superfici lapidee o intonaci, di dispersioni di nanocalce in alcool iso-propilico. Questo trattamento si rivolge soprattutto alle superfici decorate, dove ha determinato risultati particolarmente efficaci. Il principio in base al quale lavora la miscela con nanocalce non è il potere adesivo del composto veicolato, bensì la capacità delle nano-molecole di idrossido di calcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) di riempire la maggioranza dei pori presenti nel materiale disgregato. Altra caratteristica è la possibilità di lavorare efficacemente anche in presenza di alti tassi di umidità, anzi, contrariamente a quanto accade per i materiali finora in uso, più questo tasso è elevato più la soluzione di nanocalce è in grado di penetrare in profondità, essendo a tutti gli effetti un legante idraulico. In secondo luogo, va considerata la modalità di applicazione, a spruzzo, senza traumatizzare la superficie d'intervento. La dispersione può essere realizzata con varie percentuali d'idrossido di calcio (dal 4 al 10%, anche se sono state sperimentate percentuali decisamente superiori) e l'applicazione viene ripetuta più volte a distanza di qualche ora. L'impiego di prodotti a base di  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  può facilmente determinare lo sbiancamento delle superfici di applicazione, rendendo pericoloso il trattamento delle superfici decorate; l'introduzione dell'alcool iso-propilico consente però il completo avvolgimento delle nanomolecole, favorendone la penetrazione in profondità ed evitando la formazione di fenomeni di carbonatazione sulla superficie trattata. Le nanocalci sembrano pertanto rispondere efficacemente ai requisiti richiesti a un buon consolidante, avendo dimostrato una buona affinità fisico-chimica con il materiale trattato, un'elevata capacità di penetrazione, una distribuzione omogenea all'interno dei pori, la capacità di ridurre solo parzialmente la porosità del materiale, nonché l'assenza di prodotti secondari che potrebbero risultare dannosi, a breve come a medio-lungo termine.



*Reintegrazione di lacune e riempimento di fessure superficiali*

La necessità di ottenere con un consolidamento una superficie materica il più possibile compatta richiede di colmare tutte le soluzioni di continuità esistenti, dalle fessure più minute fino alle cavità più grandi. Nel primo caso si parla di microstuccatura (FIG. 6.6), da realizzarsi con malte pastose, per lo più a base di calce aerea, applicate con semplici spatole e compattate per compressione. In mancanza di grassello ben stagionato, si ricorre spesso all'aggiunta nell'impasto di elementi idraulicizzanti, cemento o calce idraulica, ottenendo così superfici con caratteristiche igroscopiche, che tendono però a rimanere bagnate più a lungo rispetto agli altri materiali, dando origine (ad esempio dopo una pioggia) a mutazioni cromatiche poco gradevoli.

Se il vuoto da suturare è ampio e profondo si opera in due tempi distinti, creando un nucleo interno con un impasto di malta idraulica (preferibilmente

FIGURA 6.6

Sermoneta, cantiere-scuola della Specializzazione in Beni Architettonici e del Paesaggio, Università di Roma "Sapienza". Stuccatura su un intonaco



Applicazione a spatola di una microstuccatura per sigillare le discontinuità fra i lacerti d'intonaco e il paramento murario retrostante. È ben visibile la forte pressione che l'operatore applica sull'utensile per compattare la malta pastosa da stuccatura.

ottenuta con calce e pozzolana o cocciopesto), frammenti di pietra o mattone e uno strato di finitura piuttosto sottile, realizzato, dopo l'indurimento del supporto, con malta di calce aerea e aggregati, selezionati in base alle esigenze di restauro (ad esempio, per l'integrazione di lacune in stucchi antichi, polvere di marmo o di travertino, per richiudere mancanze in elementi decorativi lapidei, polvere della medesima pietra; Torraca, 2002).

L'aspetto cromatico della reintegrazione costituisce di fatto il punto più delicato dell'intervento, anche perché spesso la quantità delle riprese da effettuarsi su superfici lapidee o intonacati di edifici storici è rilevante. Sono necessari una notevole esperienza da parte dell'operatore e un gran numero di prove per ottenere impasti adeguatamente plastici che, una volta asciutti, riprendano il punto di colore della superficie originaria e non debordino sui margini della lacuna. L'integrazione richiede pertanto un elevato impegno manuale, una razionale valutazione dell'esito figurativo dell'intervento, un controllo continuo e puntuale dei risultati, con una conseguente notevole incidenza sui costi dell'intervento. Essa garantisce però buona parte della qualità estetica del restauro sulle superfici e un incomparabile valore protettivo (Torraca, 1990). Nel già citato intervento sulla facciata di S. Andrea della Valle, la scadente qualità del travertino ha richiesto nelle microstuccature l'impiego di malte di grassello ben stagionato e polvere di travertino con poca pozzolana nera e rossa; le cavità più profonde sono trattate con malta idraulica (calce e pozzolana nella proporzione di 1:3 in volume) rifinita in superficie con la miscela sopraindicata. In ogni caso l'impasto è stato attentamente compattato all'atto della posa in opera (Torraca, 2001).

### *Incollaggio di parti mobili o staccate*

Le integrazioni di un'opera possono comportare, oltre alla sutura delle lacune esistenti, la ricomposizione delle parti distaccate, per tale ragione l'attività di censimento e conservazione di tutti gli eventuali frammenti erratici, anche se privi di valenza estetica e di dimensioni ridotte, assume un'importanza primaria. La scelta delle tecnologie e dei materiali con i quali intervenire è in primo luogo dettata dalle sollecitazioni che il giunto dovrà sopportare, ovvero dal peso del pezzo da riaderire e dalla sua posizione. Quando non è richiesta una particolare tenuta sono preferiti leganti inorganici (come le semplici malte "bastarde") o adesivi sintetici di natura termoplastica (ad esempio emulsioni di resina vinilica o acrilica). Se le tensioni in gioco sono considerevoli, è invece necessario ricorrere a un adesivo di tipo strutturale, come le resine sintetiche termoindurenti (in genere resine epossidiche). Questi materiali, dalle ottime capacità di tenuta, presentano il non trascurabile difetto d'ingiallire se esposti alla luce e all'aria, ma sono ancor oggi insostituibili per la loro resistenza meccanica e per la durata, soprattutto se utilizzati in incollaggi sottili e protetti dagli agenti atmosferici da strati di materiale inorganico (Torraca, 1990).

I pezzi lapidei più grandi devono essere in genere impernati all'interno. Anticamente veniva interposto uno strato di piombo fra perno metallico e materiale lapideo, così da favorire l'adesione, ma anche da creare una sorta di "cuscinetto", in grado di assorbire e attutire le deformazioni del metallo. Oggi si cerca di sostituire i metalli comuni, facilmente ossidabili e sensibili alle escursioni termiche (fenomeni di recente osservati anche nell'acciaio inox) con materiali moderni, come titanio o alcune leghe, ottone e resine sintetiche termoindurenti rinforzate con fibre di vetro o carbonio. L'adesione fra barra e pietra è garantita da un incollaggio strutturale in resina epossidica. Il sistema perno-resina-materiale originario è però del tutto irreversibile, a meno dell'adozione di accorgimenti particolari; uno di questi consiste, quando le esigenze meccaniche lo permettono, nel trattare preliminarmente le pareti del foro con una soluzione di Paraloid e cera microcristallina e il perno con sola cera microcristallina, tecnica utilizzata anche nel restauro dell'Apollo del Belvedere (Gabrielli, 1984).

### *Microiniezioni superficiali*

Il progressivo distacco dal supporto di stucchi e intonaci con la creazione di caratteristiche "bolle" vuote, il degrado superficiale tipico nelle pietre porose con tendenza allo sfaldamento, l'apertura di fessure abbastanza profonde, non risanabili con semplici stuccature, sono tutte patologie efficacemente contrastabili con le microiniezioni superficiali, in grado di agire senza asportare, seppur temporaneamente, le parti da consolidare.

La tecnica è stata inizialmente messa a punto dai restauratori di pitture murali con la formulazione di apposite miscele iniettabili che garantissero una penetrazione ottimale e una buona resistenza meccanica; sono state migliorate le caratteristiche della tradizionale miscela con grassello di calce e caseina, mantenendo i requisiti di compatibilità chimica e fisico-meccanica con i materiali originari evitando la formazione di pericolosi sottoprodotti, soprattutto dei sali solubili. Le nuove miscele, costituite da calce idraulica naturale (ottenuta dalla cottura di marne o miscele artificiali di calcare e argilla) con l'aggiunta di opportuni additivi (aeranti o fluidificanti), non sono però in grado di penetrare all'interno delle fessure molto sottili, in quanto contengono sospensioni di particelle solide che, se troppo piccole, determinerebbero effetti di gelatinizzazione (Torraca, 1990). In alternativa, per il trattamento delle fratture inferiori all'ordine del mezzo millimetro, si può efficacemente ricorrere alle iniezioni di resine, scegliendo nell'ambito delle epossidiche se serve un'elevata resistenza meccanica, oppure fra le emulsioni acriliche o i silani (FIG. 6.7).

Nel panorama del restauro del moderno esiste una discreta sperimentazione di materiali cementizi. L'intervento di consolidamento realizzato sul mosaico di Fortunato Depero al Palazzo dei Congressi nel quartiere EUR (Roma, 1992) ha, ad esempio, costituito un importante banco di prova per un nuovo

FIGURA 6.7

Torre di Pisa. Sigillatura con iniezione di resine acriliche delle microfratture sulla superficie delle mensole che collegano i capitelli al corpo murario centrale



L'operatore segue il percorso dell'ago con un tampone di ovatta al fine di asciugare tutte le fuoriuscite, evitandone la deposizione sulla superficie della pietra.

legante idraulico da iniezione denominato “Microlite” che ha consentito la riadesione del mosaico al setto cementizio di supporto (Torraca, 2001).

Le iniezioni, al pari delle stuccature, devono essere effettuate da manodopera specializzata ed esperta, onde evitare dispersioni di miscela al di sotto dello strato da consolidare o in superficie e la conseguente insorgenza di macchie. Un'attenta analisi della superficie (ad esempio tramite semplici iniezioni di acqua) per individuare i punti nei quali potrebbe verificarsi una fuoriuscita della miscela consolidante e un accurato lavoro per la loro sigillatura devono pertanto precedere il trattamento vero e proprio. È inoltre opportuno verificare il risultato finale ottenuto anche tramite la semplice percussione dell'intonaco.

Le fasi di consolidamento e protezione effettuate nella Torre di Pisa sono state precedute da una lunga e attenta sperimentazione dei prodotti esistenti sul mercato tramite la realizzazione di campioni in pietra con caratteristiche simili a quelle del monumento sottoposti a invecchiamento accelerato in came-

ra ambientale e collocati per tre-cinque anni su apposite rastrelliere. I campioni sono stati poi sottoposti alla prova di durezza "Hardrock" e all'analisi delle caratteristiche ottiche, delle eventuali variazioni di luminosità e dei fenomeni di ingiallimento della superficie. I prodotti, testati su due diversi gruppi di provini, consistono in diversi consolidanti, alcuni non idrorepellenti a base di silicato di etile (che si sono meglio distribuiti all'interno del materiale), uno idrorepellente a base di silicato di etile (il più impregnante), uno a base di polimeri acrilici in soluzione (che ha trovato difficoltà di diffusione) e il semplice latte di calce (che non ha sostanzialmente modificato le caratteristiche meccaniche). I consolidanti a base di silicato di etile e di polimeri acrilici hanno dato luogo a ingiallimenti e a limitate riduzioni di luminosità; dopo il periodo di esposizione, comunque, le superfici si presentavano in condizioni migliori rispetto a quelle dei campioni non trattati (D'Elia, Capponi, Santamaria, Torraca, 2005).

Il consolidamento ha poi utilizzato impregnazioni, ripetute da due a cinque volte, di resina acril-siliconica in soluzione e resina acrilica in emulsione. In un capitello particolarmente degradato (identificato con il numero 8) si è sperimentata una tecnica di consolidamento con immersione completa per quattro ore in una miscela di esteri dell'acido silicico e isopropanolo collocata all'interno di una sacca in PVC (FIG. 6.8). Con questo trattamento la pietra ha assorbito 700 ml di consolidante (D'Elia, Capponi, 2005).

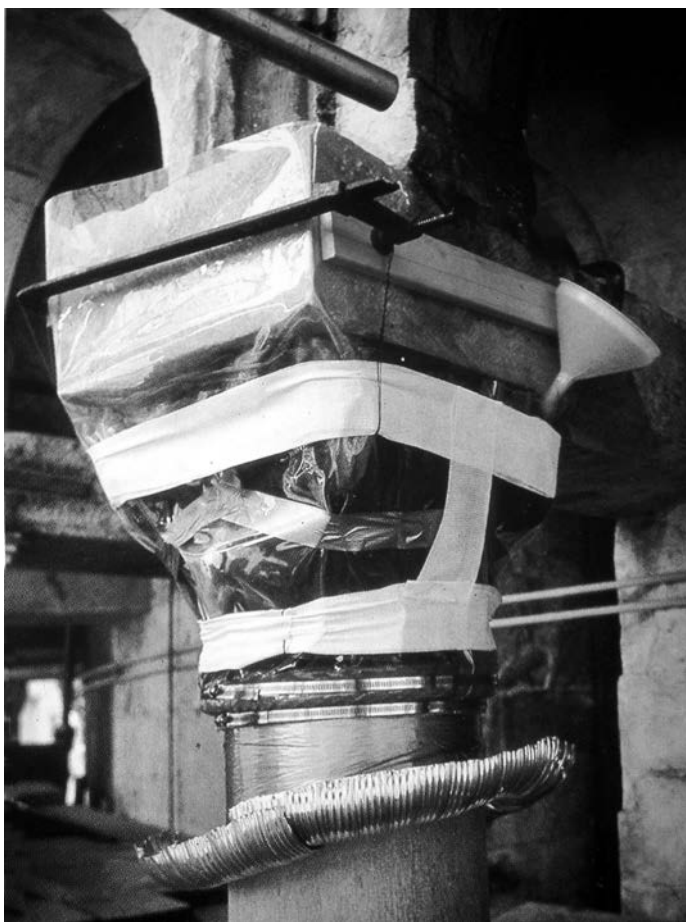
Il ristabilimento dell'adesione dei frammenti più piccoli è avvenuto mediante percolazioni localizzate di resina acrilica in soluzioni con diverse concentrazioni; i frammenti totalmente distaccati e i pezzi più grandi sono stati fatti aderire con applicazioni di resina epossidica e temporanee sigillature in gomma siliconica, così da contenere le fuoriuscite di adesivo. In rari casi sono state utilizzate malte idrauliche da iniezione.

Le stuccature di lacune e lesioni profonde, così come le microstuccature, sono state eseguite con malte di calce idrata stagionata, sabbia di fiume in vari colori e assortimenti granulometrici e polveri di marmo bianche e colorate (TAV. XVIIa). Tali miscele sono state studiate in base alla composizione e alle tonalità del materiale in opera e all'esigenza di non ostacolare la lettura delle precedenti risarciture. Quest'ultimo obiettivo è stato raggiunto lavorando sul punto cromatico, sulla lavorazione superficiale e sui livelli delle reintegrazioni.

Le stuccature del pavimento del loggiato dovevano tener conto della necessità di ottenere uno strato più resistente all'azione del calpestio e hanno fatto ricorso all'impiego di cemento desalinizzato addizionato con sabbia, polvere di marmo e resine acriliche in emulsione, diluite in acqua al 5% (D'Elia, Capponi, 2005).

Le reintegrazioni attuate nei monumenti della necropoli vaticana hanno invece privilegiato l'esigenza del minimo intervento e l'impiego di prodotti organici (Paraloid B72 in soluzione nel tricloretoano), soprattutto a ragione dell'alto tasso di umidità presente negli ambienti. La tendenza del consolidante pre-

FIGURA 6.8  
Torre di Pisa. Consolidamento per impregnazione mediante immersione completa di uno dei capitelli



Lo stato di decoesione particolarmente avanzato ha portato a sperimentare una struttura "artigianale", costituita da una sacca in PVC, per mantenere l'elemento scultoreo immerso nel consolidante il più a lungo possibile.

Fonte: D'Elia, Capponi (2005).

scelto a deteriorare rapidamente, soprattutto se utilizzato in ambienti aggressivi, è bilanciata da una buona valenza protettiva che ne giustifica l'uso se le superfici trattate sono molto ridotte. Anche la selezione del protettivo finale è stata oggetto di particolari approfondimenti e di monitoraggi mirati, che hanno verificato l'effettiva inibizione della fuoriuscita di sali, l'assenza di problemi di condensa, la mancata proliferazione di microrganismi (Adamo *et al.*, 1999).

Nel restauro degli affreschi di Piero della Francesca, il processo di solfatazione è stato definitivamente neutralizzato tramite l'applicazione finale del bario idrato, in grado, parallelamente, di garantire una buona coesione sia negli strati pittorici che nel sottostante intonaco. A tal fine è stata messa a punto una particolare metodologia che ha consentito di evitare percentuali mal distribuite all'interno dell'impacco. La quantità di soluzione idonea per l'uso giornaliero veniva preparata in un contenitore a chiusura stagna, collegato a una pompa a vuoto, allo scopo di facilitare una distribuzione omogenea di sostanza nel volume della pasta cellulosa. In tal modo era anche possibile impedire il contatto con l'aria e con la CO<sub>2</sub> in essa contenuta, eliminando così il rischio di precarbonatazione. Il trattamento a base di bario idrato è stato attentamente calibrato scegliendo di volta in volta percentuali differenti secondo le diverse tecniche pittoriche, soprattutto in funzione della presenza di colori sensibili all'alcalinità.

L'intervento dei laboratori dell'Opificio si è anche dovuto misurare con la presenza di un gran numero di distacchi, più o meno pronunciati, dell'intonaco o della pellicola pittorica, presidiati, all'inizio del Novecento, con l'inserimento di graffe e chiodi metallici. I tecnici hanno curato la messa a punto di tre diversi tipi di miscela da iniezione. Le cavità profonde e i distacchi maggiori sono stati sanati con composti di acqua (1 parte), pozzolana naturale grigia (2 parti), grassello di calce (1 parte), pomice ventilata (0,5 parti) e sabbia fine (0,5 parti); i distacchi di medie dimensioni sono stati trattati con miscele contenenti meno pozzolana (1 parte), mentre nelle lacune più piccole è stata disposta una miscela speciale di acqua deionizzata bi-distillata (8 parti), grassello di calce (1,5 parti), pomice (0,5 parti) e agar agar (addensante, 2,5%).

Nelle cavità maggiori, la miscela è stata applicata in sito previo l'adattamento del foro, la sua pulitura, l'imbibizione con un composto di acqua deionizzata e glicerina e una lieve pressione finale (Matteini, Giovannoni, Lazzeri, 2001).

#### 6.2.5. Protezione

Le opere di protezione sono finalizzate a ritardare il degrado materico futuro. Parte dei sistemi di protezione è identificabile con le opere di ordinaria manutenzione, perlopiù rivolte a riattivare o a correggere i normali presidi della fabbrica contro gli agenti atmosferici (i sistemi di smaltimento delle acque piovane di tetti e spioventi, la realizzazione di copertine o scossaline metalliche atte a proteggere oggetti e cornici e, più in generale, le finiture dei giunti, vulnerabili soprattutto in corrispondenza di due materiali diversi). Quando si opera su manufatti particolarmente vulnerabili all'azione delle acque meteoriche, come la terra cruda, l'attenzione agli elementi di protezione architettonica è indispensabile per evitare i fenomeni di dilavamento diretto, di ruscellamento e di ristagno in prossimità delle murature, in grado di compromettere irreversibilmente la sopravvivenza del bene.

Un'altra famiglia di interventi protettivi comprende i trattamenti delle superfici architettoniche con prodotti in grado di creare uno schermo difensivo senza causare eccessivi danni dal punto di vista estetico. Tali materiali dovrebbero essere il più possibile idrorepellenti e permeabili al vapore acqueo, resistenti alla radiazione solare, privi di sottoprodotti pericolosi per il materiale da proteggere, reversibili e durevoli (Pedemonte, Fornari, 2003).

Già in passato si usava disporre strati protettivi "di sacrificio" in fase di chiusura dei lavori o per interventi con una prevalente funzione di "ravvivamento": i prodotti erano molto vari e con diversa efficacia e variavano dalla cera d'api all'antica *ganosis* (miscela di oli e cera), ai semplici scialbi di calce con materiali organici.

Oggi esistono sul mercato prodotti diversi, come le cere microcristalline, i saponi insolubili (ad esempio lo stearato di alluminio), le resine sintetiche (acriliche o siliconiche), i fluopolimeri. La scelta fra questi materiali è sempre complessa, sia perché ognuno di essi presenta qualche inconveniente, sia per la vasta casistica delle applicazioni possibili, dove le caratteristiche dell'opera condizionano notevolmente l'efficacia finale dei trattamenti. L'applicazione di questi prodotti, poi, determina in buona parte l'aspetto finale delle superfici restaurate: i protettivi trasparenti possono infatti generare un innalzamento di tono, noto anche come "effetto bagnato", possono ingiallire velocemente oppure attenuarsi o, ancora, favorire l'accumulo di pulviscolo in superficie, probabilmente a causa di fenomeni elettrostatici (Torraca, 1990). Gli stessi prodotti, però, riducono notevolmente l'effetto *scattering*, dovuto al riflesso di luce bianca da parte delle piccole asperità superficiali. Tale capacità costituisce un sistema molto efficace e poco invasivo di contrasto degli sbiancamenti dovuti all'erosione.

I materiali poco porosi rispondono meglio all'applicazione dei film protettivi, mentre la disposizione di protettivi idrorepellenti su superfici molto porose produce strati facilmente penetrabili da parte dell'acqua; nell'interfaccia fra la materia antica e il protettivo si possono poi creare condizioni ideali per l'attivazione di un nuovo degrado, quali accumulo di acqua e alte temperature.

In generale, la vita utile di questi trattamenti è breve e varia dai due-tre ai dieci-quindici anni, a seconda delle condizioni ambientali e del numero di applicazioni. Se si desidera prolungare gli effetti positivi della protezione, il trattamento protettivo deve essere ripetuto ma, al di là dei problemi gestionali e di costo collegati, occorre considerare la scarsità di conoscenze sugli effetti generati dall'accumulo degli strati con i reiterati cicli manutentivi.

I tradizionali scialbi, i protettivi utilizzati nel passato su ogni tipo di superficie, sono oggi tecnicamente ammessi su intonaci e stucchi. Essi comportano evidenti problemi di natura estetica e storica (annullamento della patina presente sulla fabbrica, eccessiva omogeneizzazione degli strati superficiali, cancellazione delle tracce diacroniche impresse sui materiali e così via), pur presentando il vantaggio di possedere la stessa natura del materiale da pro-



teggere e assicurando una durata superiore a quella dei protettivi trasparenti. L'applicazione esclusiva dello scialbo su superfici in cui la finitura antica è scomparsa o è fortemente danneggiata è stata consigliata per limitare l'impatto innovativo e conservare congiuntamente le finiture antiche residue (Torraca, 1990).

I protettivi utilizzati sulla Torre di Pisa sono stati scelti fra diversi prodotti testati nei laboratori dell'ICR e *in situ* (come microemulsioni siliconiche in acqua, resine poli-metil-silossaniche in soluzione, esteri dell'acido silicico, alchilalcolossilani). È stata infine scelta una resina poli-metil-silossanica in soluzione in base alle caratteristiche cromatiche e di idrorepellenza; essa è stata diluita in solvente al 4% per le superfici verticali e al 10% per le superfici orizzontali, direttamente esposte all'acqua piovana (D'Elia, Capponi, 2005; TAV. XVIIb).

Nel restauro sul monumento equestre a Marco Aurelio (Roma), i tecnici dell'ICR hanno condotto test di laboratorio (mediante stesura su lastre bronzee ed esposizione a diversi cicli di invecchiamento) su numerosi prodotti commerciali, ma nessuno di essi rispondeva efficacemente alle esigenze di progetto. La ricerca è stata allora finalizzata all'individuazione di più protettivi fra loro abbinabili e in grado di creare un sistema sufficientemente efficace e resistente all'invecchiamento. Un primo strato di resina polimerica ha la funzione di proteggere direttamente la superficie metallica (consolidando al contempo i lacerti di foglia d'oro) senza essere frequentemente asportata. Lo strato più esterno, in cera microcristallina modificata e inibita, è completamente reversibile e ha lo scopo di "proteggere il protettivo" con la possibilità di essere asportato e sostituito durante le periodiche operazioni di manutenzione (da svolgersi ogni 3-4 anni) senza rischiare di arrecare danni alla statua (Giavarini, Santarelli, 1996).

Nel recente intervento condotto sulle sostruzioni della Domus Tiberiana a Roma si è fatto ricorso all'impiego di vegetazione per proteggere le deperibili creste murarie in tufo e sabbie limose, riprendendo il sistema inglese detto *soft wall capping*. Si è così nel contempo assicurata la vocazione ambientale del sito realizzando uno strato protettivo non dannoso, facilmente manutenibile e, soprattutto, in grado di ridurre la quantità d'acqua scaricata a valle dallo strato sommitale (Filetici, Rambelli, Torraca, 2005).

Dalla disamina dell'intera gamma dei meccanismi di degrado e delle patologie che ne derivano, si evince come l'insorgere di molte di esse sia frutto dell'azione aggressiva e ineluttabile, ma anche involontariamente "abbellitrice" del tempo (Carbonara, 1990b). Già nell'arco di qualche decennio, qualora l'opera non venga con continuità sottoposta a interventi di manutenzione, l'integrità delle superfici architettoniche può risultare seriamente compromessa. Gli attuali orientamenti teorici pongono l'accento su come il trattamento delle superfici non possa essere isolato dalla logica complessiva del restauro e debba cercare di garantire la conservazione della materia autentica, anche se semi-degradata, avvalendosi fra l'altro di tecnici restauratori altamente qualificati. Va infine ricordato che le opere di restauro sono esse stesse caratterizzate dal-

l'intrinseca labilità propria del costruito; anche per questo, ogni intervento di restauro andrebbe sempre associato a un rigoroso piano di manutenzione da rispettare nel tempo, per contenere i futuri effetti del degrado e dilazionare il più possibile nel tempo i futuri restauri.

# Tecnologie per l'uso della fabbrica

di *Mauro De Meo*

## 7.1

### Introduzione

Nella cronaca recente, si osserva una certa insistenza, soprattutto da parte di alcune associazioni private, sull'opportunità di rimuovere dalle fabbriche storiche dispositivi inseriti in epoca moderna per facilitarne la fruizione; questi vengono infatti ritenuti eccessivamente invasivi e, in fin dei conti, profondamente lesivi dei caratteri storico-artistici delle architetture. Tali polemiche evidenziano la difficoltà di conciliare due aspetti apparentemente antitetici del restauro dei monumenti: quello culturale, che spinge alla conservazione di opere criticamente riconosciute quali testimonianze materiali uniche e irripetibili, qualificate da particolari valori storici ed estetici, e quello pratico, che vuole innanzitutto scongiurare l'abbandono e l'incuria dei beni tramite mirate attribuzioni funzionali; queste ultime, una volta assecondata la compatibilità con le vocazioni espresse dall'edificio, dovrebbero garantire in aggiunta (secondo una strategia di natura politica che si sta progressivamente imponendo, non sempre con le migliori conseguenze) l'acquisizione di vantaggiose ricadute in termini economici e sociali.

È evidente come questi presupposti richiamino, in specie, uno dei più delicati nodi connessi alla problematica del riuso dell'edilizia storica, ossia la necessità di adeguamento impiantistico e tecnologico. L'adozione di attrezzature e dispositivi finalizzati a una fruizione dell'edificio ampliata, in sicurezza e, per quanto possibile, completa o, per lo meno, congruente con la sua consistenza architettonica e artistica, così come l'adeguamento agli attuali standard di benessere e igiene, dovrebbero in via prioritaria assecondare, sia pure nel rispetto della normativa vigente, le istanze proprie del restauro architettonico; in primo luogo, dunque, tutto quanto si rende necessario per conservare, rivelare e perpetuare il bene storico-artistico oggetto d'intervento, in considerazione soprattutto dei suoi valori figurativi, oltre che materiali. Per tale ragione è stata sottolineata, nel campo dell'adeguamento tecnologico, l'importanza d'una compatibilità estetica, prima ancora che tecnica e fisico-chimica, fra nuovo e antico (Carbonara, 1997, 2001b). Uno dei principali nodi della questione consiste, infatti, nella capacità di conciliare le prescrizioni di legge in materia, per

loro natura spesso rigide e vincolanti (come necessariamente richiede, per esempio, la normativa antincendio), nonostante le previste possibilità di deroga e le molte cautele per la salvaguardia del patrimonio oggetto di tutela, con le ragioni d'una qualificata formatività architettonica, cui dovrebbe sempre mirare un buon progetto di restauro. Viceversa, il panorama degli adeguamenti tecnologici dell'edilizia storica, soprattutto se priva di connotazioni monumentali, appare segnato da interventi che privilegiano le sole necessità impiantistiche e funzionali e rivela, così, una carenza di metodo che s'è risolta, nei casi migliori, nel semplice rispetto dei criteri di reversibilità e compatibilità, trascurando, però, le questioni figurative; non mancano poi veri e propri atti di vandalismo, compiuti a scapito dei caratteri architettonici, tipologici, costruttivi e, non ultimi, strutturali dell'edificio storico. Il problema dell'adeguamento tecnologico e impiantistico, così come ogni altro aspetto pratico legato al riuso delle fabbriche storiche, deve dunque necessariamente passare attraverso un serio impegno progettuale fondato sui metodi propri del restauro architettonico generalmente inteso, ossia su un lungo e accurato lavoro di lettura e interpretazione storico-critica del manufatto, capace di confrontarsi con i vincoli imposti dalla natura stessa del fabbricato e di conciliare, in una forma esteticamente qualificata, le esigenze del riuso con quelle eminentemente conservative.

Oltre alle problematiche di carattere generale connesse all'inserimento degli impianti tecnici negli edifici storici, nello spazio del presente contributo si affronteranno metodologie e scelte progettuali relative, in specie, alla prevenzione e protezione antincendio e al superamento delle barriere architettoniche, in ragione sia della loro inevitabile incidenza sull'aspetto della fabbrica, sia della loro attualità in materia di sicurezza e salute nei luoghi di lavoro.

## 7.2

### **Impianti tecnici e problemi di rapporto con l'edilizia storica**

La maggior parte delle strutture in elevato e dei sistemi voltati presenti nell'architettura storica è realizzata con l'assemblaggio di pezzi lapidei o laterizi, disposti e legati a formare elementi funzionali alla statica dell'edificio, quali pilastri, contrafforti e soprattutto setti murari continui – d'ambito o di spina – e volte di forme geometriche diverse, adibite alla copertura di ambienti o a sostenere scale e strutture a sbalzo. Laddove visibili, gli apparecchi costruttivi tradizionali possono inoltre essere analizzati, sotto il profilo della cosiddetta filologia muraria, quali documenti materiali in grado di rivelare sia le antiche pratiche di cantiere, in uso in determinati ambiti geografici e cronologici, sia le stratificazioni e le trasformazioni che hanno segnato la vicenda costruttiva della fabbrica (Fiorani, 1994; Della Torre, 1996). Le valenze strutturali e documentarie delle murature antiche invocano dunque un rispetto e un'attenzione che sembrano scontrarsi proprio con la natura perlopiù distruttiva – se disinvoltamente concepita – dei lavori di adeguamento impiantistico per il riuso

degli edifici storici. In altre parole, se l'inserimento di nuovi impianti, con le relative canalizzazioni e apparecchiature, può avvenire, nel campo del semplice recupero edilizio di preesistenze prive di requisiti storico-artistici e monumentali, tramite l'apertura, sia pure non troppo disinvolta, di tracce e fori nelle pareti, tali procedure distruttive – dunque non reversibili – dovrebbero di regola essere evitate in presenza di edifici di valore storico-artistico o, comunque, laddove le murature costituiscano la struttura portante dell'edificio. Scassi a mano, esecuzioni di tracce, perforazioni e aperture in breccia, demolizioni, irrigidimenti impropri, tamponature e aggiunte di sovraccarichi che alterino lo schema strutturale dell'edificio sono operazioni che, nell'ambito del restauro, andrebbero evitate a favore di tecniche d'intervento più caute e coerenti con le ragioni conservative prima richiamate (Pasta, 1982). I progressi tecnologici e l'inserimento nel mercato di nuovi materiali e prodotti consentono oggi di escogitare soluzioni calibrate sulle specifiche esigenze poste dall'edilizia storica. Queste impongono, in base al principio del minimo intervento, di contenere l'adeguamento tecnologico entro le reali necessità di fruizione della fabbrica e, si diceva, di condurre i lavori nel rispetto dei noti criteri operativi del restauro, in primo luogo volgendo l'attenzione verso la ricerca di vecchi impianti e canalizzazioni, il più delle volte da salvaguardare per ragioni storiche, ma spesso ancora utilizzabili tramite adattamenti e revisioni (Fiorani, 2001). Come dimostra l'intervento in palazzo Altemps a Roma (Scoppola, Vordemann, 1998), ricerche storiche, indagini archeologiche e ispezioni possono inoltre far luce sulla presenza di cavedi, intercapedini e altri eventuali punti del monumento «a debole “valenza storica”» (Carbonara, 2001b, p. 13), quali, per esempio, riempimenti e rinfianchi delle volte, facilmente sfruttabili per il passaggio di nuove canalizzazioni. Accorgimenti di questo tipo consentono, peraltro, di evitare la disposizione di fodere murarie, controsoffittature e pavimenti sopraelevati, la cui adozione può apparire sconveniente in ambienti caratterizzati da precisi rapporti geometrico-proporzionali o finiture di particolare pregio. Una strada ugualmente valida può, infine, ravvisarsi nella scelta di lasciare a vista gli impianti, purché progettati con un design accurato ed esteticamente compatibile con la preesistenza.

### 7.3

#### **Prevenzione e protezione antincendio**

Il problema della messa in sicurezza degli edifici contro il rischio d'incendi riveste una particolare importanza relativamente alle fabbriche storiche, poiché queste richiedono provvedimenti che tutelino al tempo stesso gli utenti e gli oggetti che vi si conservano, spesso di notevole interesse artistico e culturale (basti pensare all'entità dei danni sofferti dalla cappella della Sacra Sindone a Torino, dal teatro veneziano della Fenice e, proprio recentemente, dalla Reggia sabauda a Moncalieri, ancora presso Torino). L'attenzione rivolta a tali aspetti è infatti testimoniata non solo da una normativa robusta e assai vinco-

lante, relativa soprattutto agli edifici pubblici, ma anche dalla ricca letteratura esistente, che annovera fra gli altri diversi articoli di carattere generale (apparsi nei periodici “Antincendio” e “Sicurezza”) e utili sintesi (Callocchia, 1991, 2005; Marinelli, 1996 e, per gli aspetti più propriamente connessi al riuso dell’edilizia storica, Zarfati, 2001a). I sistemi di protezione antincendio, analogamente ad altre categorie di impianti, possono distinguersi in passivi e attivi. I primi si riferiscono ad accorgimenti e materiali che entrano a far parte delle caratteristiche costruttive e architettoniche del fabbricato e comprendono, nella fattispecie, l’impiego di elementi resistenti al fuoco secondo la classificazione REI, una ragionata distribuzione delle attività che si svolgono nell’edificio, la limitazione dei cosiddetti carichi d’incendio, la predisposizione di vie di fuga e luoghi sicuri, la compartimentazione dell’immobile in zone delimitate da pareti e serramenti – se necessario muniti di meccanismi di autochiusura – e l’adozione di scale esterne di sicurezza, ovvero protette e a prova di fumo. Tale quadro, seppur sintetico e puramente indicativo, evidenzia che l’apparato di provvedimenti adibiti alla protezione antincendio passiva può incidere fortemente sull’aspetto e l’articolazione planivolumetrica dell’edificio, sia nel caso d’una progettazione *ex novo*, sia soprattutto nel campo dell’adeguamento impiantistico delle preesistenze, per la limitazione della libertà creativa indotta. In un edificio storico il raggiungimento di livelli di sicurezza sufficienti tramite protezione passiva potrebbe non risultare possibile; in tal caso, piuttosto che attuare provvedimenti che snaturino l’architettura e l’originalità della fabbrica, sarà preferibile adottare misure che, a intervento ultimato, ne regolino il flusso delle utenze o limitino la capienza degli ambienti. Fra i sistemi passivi di più difficile attuazione negli edifici storici si pone, in specie, la creazione di vie di fuga, che prevedono percorsi con lunghezza e larghezza adeguata, il più possibile lineari e ben segnalati, la presenza di finiture e di arredi non infiammabili e, soprattutto, la disposizione di uscite e scale di sicurezza, le cui caratteristiche sono regolamentate da specifiche normative antincendio.

I sistemi “attivi” consistono, invece, nei dispositivi di rilevazione, allarme e spegnimento degli incendi. Circa questi ultimi, le specificità degli edifici storici, soprattutto se decorati e arredati con finiture e opere di pregio – tappezzerie, mobili antichi, prodotti di oreficeria, stucchi, quadre ecc. – richiedono una particolare attenzione nella scelta delle sostanze estinguenti, non potendosi sempre utilizzare getti d’acqua (espressamente vietati, dal D.M. 20 maggio 1992, n. 569, per i locali degli edifici di valore storico artistico destinati a musei, gallerie, esposizioni e mostre che conservino materiali danneggiabili dall’acqua, ma inspiegabilmente consentiti, senza riserve, dal D.P.R. 30 giugno 1995, n. 418, per edifici storico-artistici che ospitano biblioteche e archivi; Centi, De Santis, 2005), peraltro assolutamente sconsigliabili anche in presenza di impianti elettrici attivi. Tali dispositivi di protezione si rendono comunque utili laddove non sia possibile arrivare a un livello ottimale di protezione passiva senza apportare alterazioni allo *status quo* dell’edificio in contrasto con le ragioni conservative. Attraverso un’adeguata dotazione impiantistica “attiva” è

in tal modo possibile attribuire all'edificio quel livello di «sicurezza equivalente» (introdotto dalla norma sperimentale CEI 64-15, relativa agli «impianti elettrici negli edifici pregevoli per rilevanza storica e/o artistica») in grado, comunque, di garantire la maggiore protezione dal rischio d'incendi. Rientra nelle misure di protezione attiva anche la gestione della sicurezza tramite la predisposizione di appositi piani d'emergenza e d'intervento, previsti dalle due disposizioni legislative sopra citate. L'importanza di tali misure risiede, principalmente, nell'impossibilità di scongiurare totalmente il rischio d'incendio anche in presenza di un'adeguata protezione passiva; la predisposizione dei sistemi attivi di sicurezza antincendio, da realizzarsi in funzione della forma degli ambienti e del tipo d'impianto previsto, deve per tale ragione garantire – come previsto per legge per gran parte delle attività solitamente connesse al riuso dell'edilizia storica (si vedano le sopracitate disposizioni di legge, rispettivamente agli artt. 9 e 8) – il tempestivo rilevamento e l'estinzione del fuoco nel più breve tempo possibile, per limitarne al massimo le conseguenze. A seconda della consistenza del fabbricato, i rilevatori automatici di calore o preferibilmente di fumo, puntiformi o lineari, possono innescare segnalazioni di allarme locali o periferiche, ossia indirizzate a un'apposita centrale di controllo, cui fanno capo i dispositivi automatici di rilevamento, in ogni caso da integrare con sistemi d'allarme manuali. I sistemi lineari, in particolare, sono piuttosto adatti per gli ambienti di grandi dimensioni, soprattutto se alti, e applicabili anche a parete, dunque assai vantaggiosi per la salvaguardia di volte e soffitti. I rilevatori, ad ogni modo, devono essere disposti in tutti gli ambienti delle zone sottoposte a controllo, fatta eccezione per i servizi igienici, sempre in alto se sensibili al fumo; nelle sale molto alte se ne può prevedere un'installazione aggiuntiva a una quota intermedia. La disposizione dei rilevatori deve infine tener conto della presenza di eventuali impianti di climatizzazione ad aria, che potrebbero influire negativamente sulla capacità di rilevamento del fumo. La gestione della sicurezza implica, ancora secondo il D.M. 569/1992, art. 11, la predisposizione di un'opportuna segnaletica (comprensiva di piante d'orientamento da esporre a tutti i livelli dell'edificio, di semplice lettura e corredate dall'indicazione di vie di esodo, mezzi di estinzione, dispositivi di arresto degli impianti, quadro dei sistemi di rilevazione dei fumi e di allarme, localizzazione di eventuali locali ad alto rischio) e di piani di emergenza da attuare, in caso di pericolo, con l'ausilio del personale addetto. Questi piani prevedono naturalmente anche l'immediato ma ordinato sgombero dei fruitori dell'edificio, tempestivamente avvisati da segnalatori ottico-acustici d'allarme (previsti dall'art. 9 del citato D.M.), l'arresto degli impianti tecnici che possano costituire pericolo o interferire con le operazioni di spegnimento, l'intervento dei soccorsi e il loro accoglimento da parte di personale in grado di fornire informazioni precise sull'evento. L'estinzione tempestiva degli incendi negli edifici può essere affidata a sistemi automatici di spegnimento collegati agli impianti di allarme e studiati in modo da non risultare dannosi per persone e oggetti di valore storico-artistico, ma certamente indispensabili per la sicurezza

di ambienti a elevato carico d'incendio o per compensare l'eventuale inadeguatezza della protezione passiva. Tra i tipi d'impianto automatico esistenti, i più indicati per le attività solitamente connesse al riuso dell'edilizia storica risultano quelli a pioggia, ad anidride carbonica e a gas estinguente. Il primo necessita di una rete di distribuzione idrica antincendio, unicamente adibita a tale scopo e contraddistinta da determinati valori di portata minima al minuto, pressione e tempo d'erogazione minima, variabili a seconda delle attività (cfr., per le relative prescrizioni legislative, il D.M. 30 novembre 1983, il D.M. 20 maggio 1992, n. 569, art. 9, e il D.P.R. 30 giugno 1995, n. 418, art. 8), e di appositi *sprinklers*, ossia erogatori – disposti naturalmente in posizione elevata negli ambienti da salvaguardare – la cui apertura è determinata dall'aumento della temperatura ambientale. Una maggiore cautela d'uso contraddistingue l'impianto automatico di spegnimento ad anidride carbonica, poiché questo, che agisce per soffocamento delle fiamme, non può essere adottato in ambienti dove sia prevista la presenza umana (Callocchia, 2005). Più indicato ai casi che ci interessano è, invece, l'impianto a gas estinguenti, non dannosi per l'uomo, né per l'ambiente, ma soprattutto innocui nei confronti di materiali facilmente danneggiabili. La distribuzione dei gas negli ambienti, attivabile anche manualmente, avviene, analogamente agli altri due impianti, tramite una rete di tubazioni alimentata da bombole o serbatoi e provvista di valvole e dispositivi di estinzione, nella fattispecie a ugelli. Nell'impianto antincendio recentemente installato nel Teatro alla Scala di Milano (2002-04; arch. R. Zanetta), la scelta dei sistemi di spegnimento e delle sostanze estinguenti – a secco o ad acqua, a schiuma ad alta espansione, a gas inerte, a lama diluvio d'acqua, a idranti o a nebulizzazione – è stata calibrata sulle specificità dei diversi ambienti da proteggere (platea, *foyer*, gallerie, palcoscenico, sipario, fossa della torre scenica, sottotetto, locali tecnici, sottopalco; Dell'Acqua, 2005; Bettati, 2005; Nigro, 2005). I sistemi automatici di protezione antincendio devono inoltre essere integrati con estintori mobili, portatili o carrellati, attivabili manualmente, nonché d'installazione facile e indipendente dalle caratteristiche architettoniche dei fabbricati, fermo restando il rispetto della specifica normativa. Questa prevede, per gli edifici storico-artistici destinati a musei, gallerie, esposizioni e mostre o a biblioteche e archivi (oggetto, si ricorda, dei già citati D.M. 569/1992 e D.P.R. 418/1995; nella fattispecie, rispettivamente, agli artt. 9 e 8), la disposizione di un estintore con prefissata capacità estinguente ogni 150 mq di superficie di pavimento, in posizione ben visibile, segnalata e facilmente accessibile. Il decreto interministeriale 10 marzo 1998 (pubblicato in attuazione di quanto prescritto nell'art. 13 del noto D.Lgs. 19 settembre 1994, n. 626 sulla sicurezza nei luoghi di lavoro) precisa inoltre, all'allegato v, la quantità e i tipi di estintori da adottare in base alla superficie, alla classe di incendio e al livello di rischio connesso alle attività che si svolgono negli ambienti da salvaguardare; in ogni caso, la distanza da percorrere per raggiungere gli estintori, da sottoporre a manutenzioni periodiche, non deve essere superiore a 30 m.

Rientra nell'ambito della dotazione impiantistica antincendio d'un edificio



anche la rete d'illuminazione d'emergenza, che entra automaticamente in funzione quando venga a mancare o sia volutamente interrotta, per questioni di sicurezza, l'erogazione di energia elettrica. Tale impianto, alimentato da una sorgente autonoma di energia, deve garantire, per almeno un'ora, l'individuazione e un'adeguata illuminazione delle vie di esodo, sufficiente se superiore a 5 lux misurati sul pavimento. Affinché l'illuminazione dei percorsi di fuga non risulti compromessa dal loro prevedibile affollamento in caso d'incendio, gli apparecchi illuminanti e i segnali di emergenza devono essere disposti a un'altezza non inferiore a 2 metri, ma nemmeno troppo elevata, per evitare che siano oscurati dal fumo.

Gli impianti attivi per la protezione antincendio non pongono, in genere, particolari difficoltà d'installazione, poiché le linee di collegamento dei rilevatori e la rete distributiva delle sostanze estinguenti presentano canalizzazioni di sezione contenuta. L'adozione degli *sprinklers*, perlopiù invasivi nelle architetture storiche, può essere evitata cercando di garantire un livello di sicurezza equivalente tramite sistemi alternativi di protezione; alla Galleria Borghese di Roma, per esempio, la difesa antincendio è stata attuata limitando l'accesso al pubblico e integrando la compartimentazione degli ambienti, particolarmente accurata e di grande qualità, con estintori mobili e rilevatori automatici.

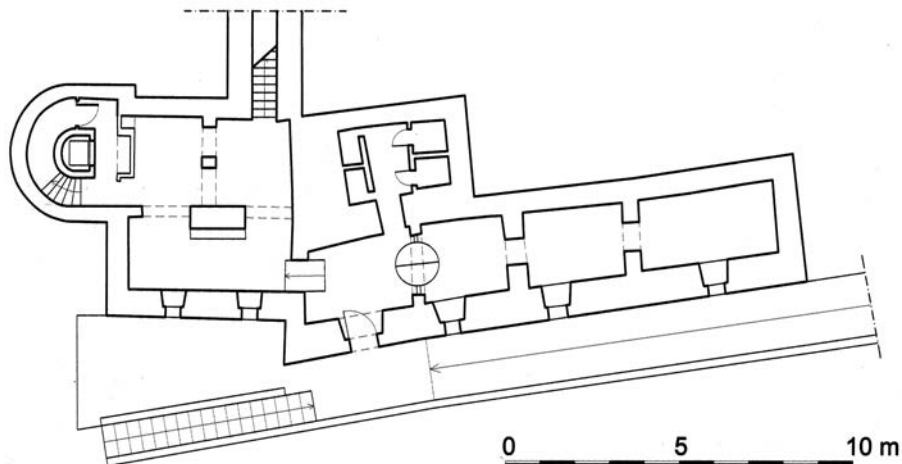
Tra i fattori responsabili degli incendi negli edifici si annoverano anche le scariche atmosferiche. I sistemi di protezione da tali eventi naturali, prescritti dai più volte richiamati D.M. 569/1992 e D.P.R. 418/1995 e dalla norma CEI 64-15, dipendono dalle caratteristiche architettoniche e costruttive e dall'ubicazione geografica del fabbricato da proteggere, in rapporto specialmente alla natura del terreno, all'orografia e al numero medio annuale di fulmini registrato nella zona per chilometro quadrato (riportato, per i comuni italiani, dalla norma CEI 81-3). Gli impianti di protezione dalle scariche elettriche atmosferiche permettono di scongiurare sia gli incendi provocati dai fulmini "diretti", intercettati dalla struttura stessa dell'edificio, sia quelli innescati da sovratensioni sugli impianti causate da fulmini "indiretti", ossia caduti nelle immediate vicinanze del fabbricato. Tali impianti, contrassegnati dalla sigla LPS (*Lightning Protection of Structures*), consistono in una schermatura reticolare dell'edificio costituente, di fatto, una "gabbia di Faraday" in grado di raccogliere e trasportare l'elettricità verso opportuni dispersori a terra. Difficilmente in un edificio storico la gabbia di raccolta e scarico, costituita da una rete di conduttori elettrici disposta sulle coperture e lungo le facciate, potrà essere distribuita con l'ampiezza e la regolarità geometrica richieste dai parametri di riferimento (ubicazione del sito, altezza e proporzioni del fabbricato, grado di sicurezza cercato), poiché, per rispettare le istanze conservative, dovrà piuttosto assecondare la volumetria e le membrature del fabbricato, restando il più possibile mimetizzata lungo cornici e aggetti. A tal riguardo, si specifica che possono essere sfruttati, come rete di raccolta e scarico, anche impianti metallici adibiti ad altro scopo, quali gronde e discendenti, purché questi risultino perfettamente continui e non interessati da fenomeni di degrado.

## 7·4

**Impianti per il superamento delle barriere architettoniche**

Le fabbriche storiche esibiscono soprattutto, quale principale impedimento alla loro piena accessibilità, la presenza di scale il più delle volte non conformi alle esigenze attuali, poiché la loro fruibilità può essere solo migliorata con dispositivi antisdrucchiolo, corrimano e adeguati impianti d'illuminazione, ma non estesa a tutti i gradi di diversa abilità. Le barriere architettoniche presenti nell'architettura storica sono principalmente scale, ma anche larghezze inadeguate di percorsi e vani o, più generalmente (secondo le definizioni riscontrabili all'art. 1 del D.P.R. 24 luglio 1996, n. 503), «ostacoli fisici» per chi presenti capacità motoria ridotta o impedita oppure per una comoda e sicura utilizzazione degli spazi. Gli interventi di adeguamento dell'edificio per orientare persone con ridotte capacità sensorie possono spesso rientrare agevolmente nell'ambito della dotazione impiantistica passiva, in analogia e più facilmente della prevenzione antincendio; essi possono essere dunque risolti attraverso l'installazione di rampe rispettose delle pendenze e delle dimensioni indicate dalla normativa tecnica (si ricorda che per l'edilizia storica sono ammesse deroghe che consentono di aumentare lievemente – dall'8 al 12% – la pendenza massima delle rampe, purché queste non superino i 3 metri di lunghezza). Tuttavia, qualora non sia possibile apportare modifiche simili ai preesistenti percorsi orizzontali o verticali, ovvero l'installazione di rampe risulti impossibile (per eccessiva lunghezza necessaria o per lo sconveniente impatto visivo; Berti, 2001), l'apparato impiantistico può essere integrato da dispositivi di natura più propriamente tecnologica, quali ascensori, servoscale e pedane elevatrici, facilitando l'accesso non solo ai portatori di *handicap*, ma anche ad anziani, bambini, accompagnatori di neonati in carrozzina ecc. L'inserimento di impianti meccanici nell'edilizia storica risulta tuttavia particolarmente delicato e deve essere sostenuto da una ragionata e accorta progettazione, per evitare di produrre danni estetici e strutturali: per tali ragioni, la normativa (cfr., in specie, il già citato D.P.R. 503/1996, art. 19) prevede la possibilità di deroghe quando l'eliminazione di ostacoli alla piena accessibilità si scontri con una «impossibilità tecnica connessa agli elementi strutturali o impiantistici». Quando «le opere di adeguamento costituiscono pregiudizio per valori storici ed estetici», si devono prevedere soluzioni alternative, anche solo provvisoriale, quali «attrezzature d'ausilio e apparecchiature mobili non stabilmente ancorate alle strutture edilizie», purché il loro carattere di provvisorietà non abbia ricadute negative sulla qualità dei materiali utilizzati e sulle ragioni conservative. L'installazione di ascensori, quando possibile, appare risolutiva per il superamento delle barriere architettoniche, ma allo stesso tempo anche fortemente connessa alle problematiche di compatibilità, visiva e strutturale, cui prima s'accennava. È infatti piuttosto rara, nell'ambito dell'edilizia storica, la disponibilità di cavedi di ampiezza sufficiente a ospitare il vano corsa di una cabina

FIGURA 7.1  
Castelnuovo di Farfa (Rieti). Pianta di palazzo Perelli, allestito a Museo dell'Olio della Sabina

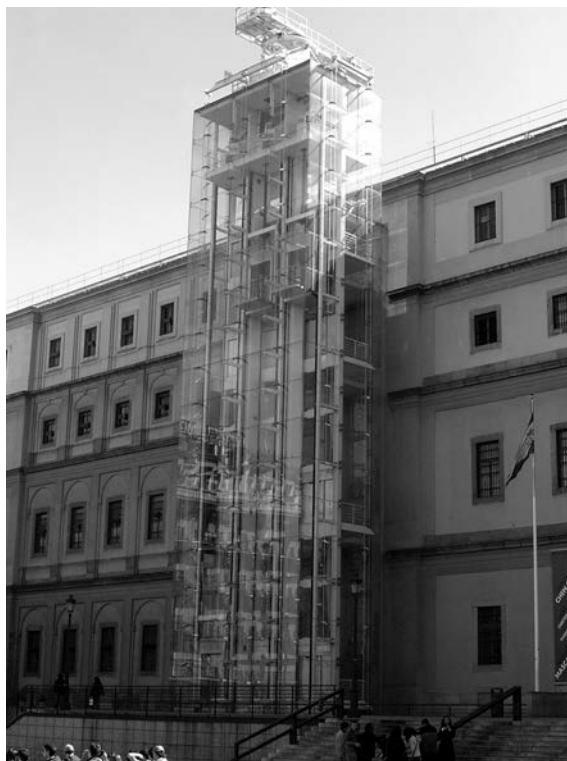


Il percorso verticale, comprensivo di scale e ascensore, trova alloggio in un preesistente corpo absidato dell'edificio. Rielaborazione da grafico di progetto; archh. M. Benedetti, S. Di Martino, M. Morante.

ascensore, la quale, per risultare in regola con la normativa (D.M. 14 giugno 1989, n. 236), dovrebbe essere profonda almeno 120 cm e larga 80. Nel rinascimentale Palazzo della Loggia a Brescia è stato possibile sfruttare, a questo scopo, un antico corpo scala staccato dall'edificio, oggi collegato a questo da un passaggio sopraelevato coperto (Arengi, 1998). Analogamente, nel borgo sabino di Castelnuovo di Farfa (Rieti), un collegamento verticale, comprensivo di ascensore, è stato installato nell'edificio che oggi ospita il Museo dell'Olio sfruttando un volume absidato che percorreva verticalmente l'intero corpo di fabbrica (1990-94; archh. M. Benedetti, S. Di Martino, M. Morante; FIG. 7.1).

In alternativa, essendo sconsigliabile il taglio o, peggio, l'eliminazione di volte e solai – nonostante i diversi casi riscontrabili (esemplificativo, a tal riguardo, è l'ascensore inserito nel Convento aquilano di S. Maria di Collemaggio, oggi sede del Conservatorio di Musica) – il vano corsa dell'ascensore può trovare alloggio negli spazi interni ai corpi scala, laddove esistenti e sufficientemente ampi, come dimostrano i molti esempi, riscontrabili, in specie, nei palazzi per appartamenti del XVIII-XX secolo. La medesima pratica di adeguamento è stata seguita, naturalmente, sin dalla prima comparsa degli ascensori: si ricorda l'impianto ancora esistente inserito, all'inizio del Novecento, nel berniniano scalone quadrato di palazzo Barberini, fra i primi dispositivi romani. L'ascensore storico del Vittoriano, sempre a Roma, è stato invece parzialmente modificato con la sostituzione del sistema motore – dal tipo a funi a quello con cilindro oleodinamico –, ma la cabina originale è stata conservata

FIGURA 7.2  
Madrid, Centro culturale Reina Sofia



Il moderno ascensore in acciaio e vetro, installato sulla facciata posteriore dell'edificio, si pone sul piano dell'attualità espressiva d'un palese confronto fra antico e nuovo.

Foto di C. Vetrugno.

ed è stato inoltre affiancato da nuovi inserimenti moderni, nel vuoto d'una scala elicoidale interna e all'esterno dell'edificio (Cherubini, Porzio, 2001).

In taluni casi, l'installazione di nuovi collegamenti verticali meccanizzati ha perseguito il criterio di un'esibita attualità espressiva, con la disposizione di ascensori di design moderno in aderenza alle facciate esterne – solitamente posteriori ovvero interne a corti e chiostrine – dell'edificio oggetto di adeguamento impiantistico. L'esito di tali interventi, certamente di forte impatto visivo e perciò alle volte oggetto di critiche e contestazioni, dipende dalla capacità del progetto di restauro di adeguarsi correttamente alle specificità dei singoli casi, sia pure istituendo un audace confronto fra antico e nuovo. Questo è mostrato in tutta la sua evidenza, per esempio, dalle due torri-ascensore in acciaio e vetro poste sulla facciata posteriore del Centro culturale Reina Sofia di Madrid (FIG. 7.2) e dal collegamento verticale installato nel Colosseo per

FIGURA 7.3

Roma, Colosseo. Ascensori oleodinamici installati dietro ai tre arconi di collegamento del poderoso sperone ottocentesco di R. Stern, in modo da ridurne l'impatto visivo sul monumento



allargarne l'accessibilità del percorso di visita; in quest'ultimo caso, tuttavia, s'è preferito mimetizzare l'intervento nascondendo il vano corsa dell'ascensore, sempre in acciaio e vetro, dietro il poderoso sperone ottocentesco in mattoni (2001; arch. P. Meogrossi; FIG. 7.3).

Differenti finalità caratterizzano, invece, l'ascensore installato nell'ottocentesca Mole Antonelliana di Torino, in occasione del suo recente adattamento a Museo Nazionale del Cinema (FIG. 7.4).

Qui il progetto ha previsto, al posto d'un precedente impianto risalente agli anni sessanta del secolo scorso, la sistemazione d'una semplice cabina panoramica; questa è stata sospesa nel vuoto racchiuso dalla cupola a sesto fortemente rialzata e rende oggi accessibile la terrazza posta alla base della slanciata lanterna. L'ascensore, guidato solo da quattro funi in acciaio tese verticalmente, è stato dunque concepito privo d'un vero e proprio vano corsa, poiché questo, con il proprio volume, avrebbe inutilmente enfatizzato l'asse centrale della cupola lungo il quale si dispone l'impianto, avrebbe limitato la pa-

FIGURA 7.4  
Torino, Mole Antonelliana. Plastico del progetto di restauro, allestimento museale e adeguamento impiantistico



Sono visibili la rampa elicoidale adibita a percorso espositivo e l'ascensore installato lungo l'asse verticale della cupola per consentire l'accesso alla lanterna.

norma della cabina, che, in tal modo, assume la configurazione di elemento architettonico mobile, e avrebbe infine alterato sensibilmente la spazialità libera dell'ampia sala interna. Il garbato segno tecnologico, palesemente moderno ma certo più coerente con l'audace e innovatrice struttura della cupola di quanto non siano le concessioni dell'apparato decorativo al gusto eclettico dell'epoca, costituisce così un delicato e dinamico fulcro verticale che si rapporta al movimento elicoidale ininterrotto della nuova rampa in legno e acciaio posta lungo le pareti della sottostante aula quadrangolare (1996-99; arch. G. Gritella, A. Bortolotti). Nel restauro del Palazzo Ducale dei Gonzaga

FIGURA 7.5  
 Ascensori per edifici presistenti. Soluzione elettrica priva di locale macchine (a sinistra) e tipo idraulico tradizionale (a destra; ditta CEAM)

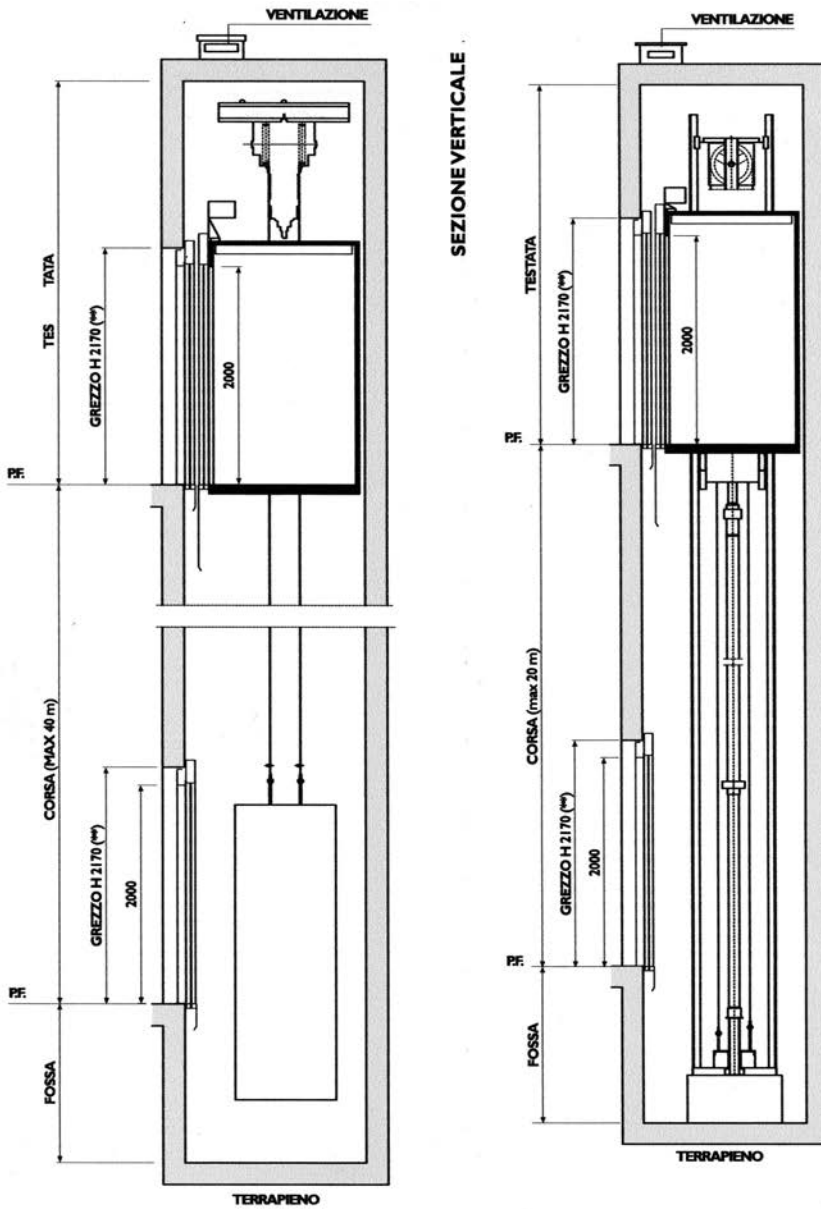


FIGURA 7.6

Roma, area archeologica dei Fori imperiali. Pedana elevatrice protetta da vano metallico tamponato in vetro, installata nel Foro di Traiano per allargarne l'accessibilità



a Guastalla (Reggio Emilia), adattato a Museo del Po e Biblioteca comunale, infine, la zona di alloggio degli ascensori, sempre in acciaio e vetro, è prossima allo scalone principale ed è stata scelta anche per le compromissioni subite nel passato (2003-05; archh. M. Carmassi, G. Carmassi).

Gli ascensori adottati per il superamento delle barriere architettoniche devono presentare porte scorrevoli ad apertura automatica, pulsantiere e placche di riconoscimento dei piani con numerazione in rilievo e scritte tradotte con il sistema *Braille* e segnalazioni integrate da dispositivi sonori; dev'essere inoltre assicurata la perfetta complanarità fra la cabina e il pianerottolo d'accesso. Si ricorda, infine, che gli apparati tecnologici da impiegare nell'ambito del restauro, oltre a essere poco invasivi, dovrebbero produrre le minori sollecitazioni possibili alle strutture in cui si inseriscono; pertanto, in rapporto alla problematica degli ascensori, questi dovrebbero preferibilmente essere di tipo oleodinamico, peraltro meno ingombranti per il più contenuto sviluppo dell'extracorsa e l'assenza del contrappeso, o addirittura privi di locale macchine, come quelli prodotti dalle ditte Schindler (Arengi, 1998), Kone e CEAM (FIG. 7.5), ovvero conformi al modello "Overfit", con argano posto alla testata del



FIGURA 7.7  
 Abbazia di Casamari (Frosinone)



Il sistema passivo adottato per allargare l'accessibilità alla chiesa, nella fattispecie rappresentato dalla rampa parzialmente nascosta dal muro visibile a sinistra, è integrato dalla disposizione d'una pedana elevatrice atta al raggiungimento della quota di calpestio della chiesa.

Foto di D. Fiorani.

vano. Nei lavori alla Galleria Borghese di Roma l'aggiornamento dell'ascensore con un nuovo impianto oleodinamico, in luogo del tradizionale a fune, ha consentito di adibire il cavedio d'alloggio del vecchio contrappeso alla distribuzione verticale di nuove canalizzazioni impiantistiche.

Per superare dislivelli contenuti, di norma, entro 4 metri, il decreto ministeriale citato prevede, in alternativa agli ascensori, l'uso di piattaforme elevatrici, costituite da una semplice pedana mobile, in senso verticale, con velocità non superiore a 0,1 m/s, talora all'interno d'un vano corsa di sicurezza (FIG. 7.6).

Le dimensioni minime della piattaforma, munita di due accessi protetti da cancelletti, sono le stesse previste per gli ascensori, ma il suo impiego appare particolarmente indicato negli interventi di adeguamento in ragione del minore ingombro del vano corsa, privo di fossa, extracorsa e sala macchine, e della disponibilità in commercio di modelli diversi, con o senza vano proprio, ovvero con struttura autoportante, installabile anche senza ancoraggi alle murature dell'edificio (FIGG. 7.7-7.8).

Seppur consigliati, dalla normativa vigente, per coprire dislivelli contenuti, la corsa di tali apparecchi può giungere, nonostante lo svantaggio della bassa velocità, fino a 10-12 metri; in questi casi, tuttavia, la loro installazione, talora a collegare

FIGURA 7.8  
 Abbazia di Casamari (Frosinone). Sistema per favorire l'accessibilità del complesso



*a*) Rampa di collegamento fra il sagrato della chiesa e la quota della pedana elevatrice. La struttura permette la visibilità di alcuni resti archeologici presenti in prossimità dell'edificio. *b*) Pedana elevatrice esterna installata per superare la barriera architettonica costituita dalla scalinata d'accesso alla chiesa abbaziale.

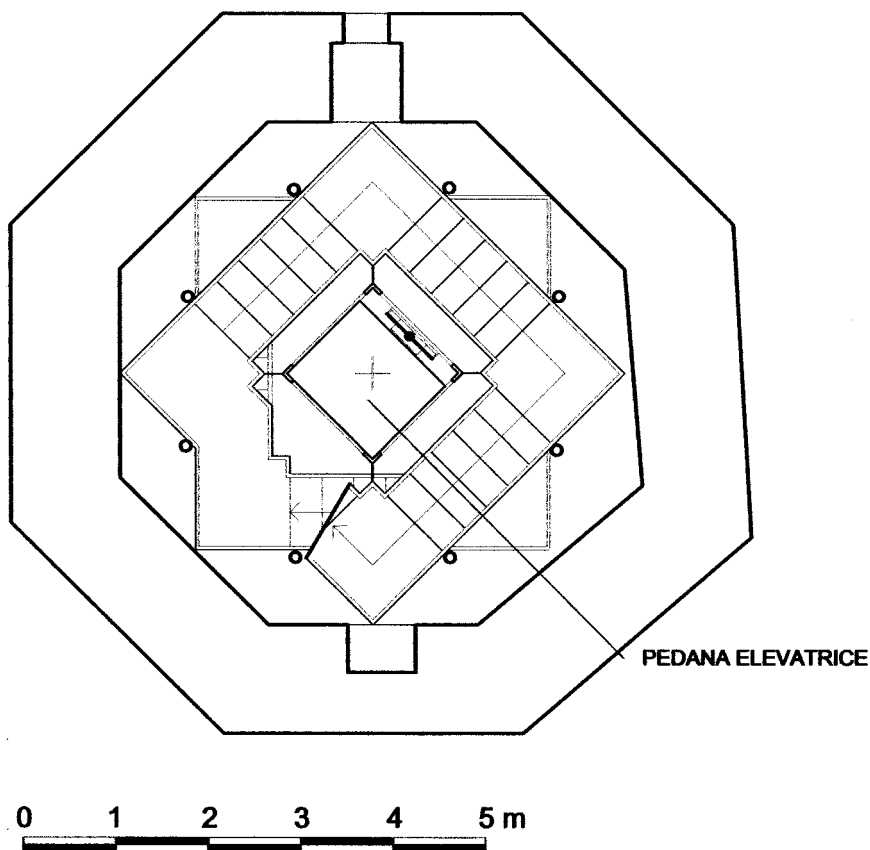
Foto di D. Fiorani.

piani differenti d'un edificio, necessita, per questioni di sicurezza, d'una vera e propria cabina e di un vano corsa, che rendono l'impianto più simile a un ascensore che a una pedana elevatrice, come dimostra l'adeguamento funzionale della torre medievale di Valentano (Viterbo; archh. D. R. Pozzi, R. Ilari, FIG. 7.9).

Nell'edificio, a pianta ottagonale, è stata infatti inserita una pedana elevatrice alta circa 12 metri, adeguatamente protetta e circondata da rampe di scale a costituire un blocco quadrato che consente l'accessibilità alla terrazza di copertura della torre, appartenente all'antica Rocca Farnese (Pozzi, Ilari, Properzi, 1999).

Fra i dispositivi tecnologici atti al superamento dei dislivelli si segnala infine il servoscala, consistente ancora in una pedana mobile, in questo caso lungo un binario metallico cingolato che segue le scale dell'edificio. Tale mezzo, consentito per legge laddove non sia possibile risolvere in altro modo il superamento delle barriere architettoniche, sempre, preferibilmente, per dislivelli contenuti entro 4 metri, è azionato da un motore elettrico alloggiato nella piattaforma stessa ed è contraddistinto da una serie di dispositivi di sicurezza previsti dalla specifica normativa (D.M. 14 giugno 1989, n. 236, art. 8.1.13, cui si rimanda anche per le prescrizioni tecniche relative alle piattaforme ele-

FIGURA 7.9  
Valentano (Viterbo), Rocca Farnese. Pianta ottagonale del mastio medievale



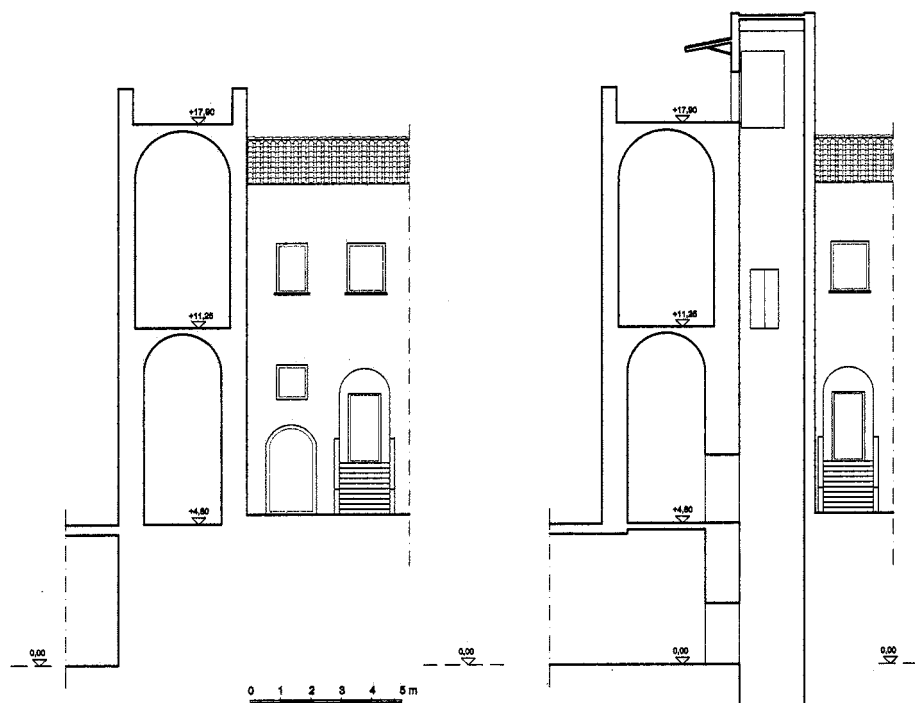
Il collegamento verticale meccanico, ottenuto con l'installazione d'una piattaforma elevatrice in un vano metallico tamponato con il vetro, rimane integralmente nascosto all'interno della fabbrica.

Rielaborazione da grafico di progetto; archh. D. R. Pozzi, R. Ilari.

vatrici). L'impiego del servoscala, in ragione del suo non trascurabile impatto visivo, può tuttavia apparire inidoneo a contesti storico-artistici di particolare pregio estetico, oltre che risultare talora ingombrante in caso di evacuazione rapida dell'edificio. L'installazione di tale meccanismo sull'ampio scalone al piano terra del Vittoriano, fino a raggiungere la quota di partenza dell'ascensore, illustra efficacemente un caso di perfetta compatibilità fra le istanze della funzione allargata e quelle della sicurezza antincendio.

Il tema della piena accessibilità è stato di recente esteso anche alla scala urbana; nei centri storici, la presenza di dislivelli, percorsi con pendenze ac-

FIGURA 7.10  
Tivoli (Roma), villa d'Este. Sezione trasversale del palazzo *ante* e *post operam*, in corrispondenza del nuovo ascensore collocato in un cortile secondario della fabbrica



Rielaborazione da grafico di progetto; Soprintendenza per i Beni Architettonici del Lazio; consulenza arch. F. Vescovo.

centuate, pavimentazioni sconnesse o semplicemente incompatibili con le sedie a ruote e l'assenza di marciapiedi costituiscono i problemi più evidenti. Fra i diversi interventi, talora limitati a specifiche e circoscritte zone monumentali del centro urbano, si ricordano qui, per l'importanza assunta dai collegamenti verticali e inclinati meccanizzati, gli esempi della piazza Grande di Gubbio (Sette, 1998) e dei centri storici di Jesi (Ancona) e Bergamo (la cosiddetta Bergamo Alta), il primo raggiungibile grazie a un impianto di scale mobili, inserito all'interno di palazzo Battaglia, l'altro tramite funicolare.

Un interessante sistema di accessibilità allargata è, infine, quello predisposto per la visita di villa d'Este a Tivoli (Roma; Soprintendenza per i Beni Architettonici del Lazio; consulente arch. F. Vescovo), dove il tema dell'adeguamento degli edifici, anche in questo caso ottenuto tramite il consueto, ma ragionato, inserimento di un ascensore all'interno di un cortile secondario del palazzo (FIG. 7.10), s'integra con un sistema di trasporto su gomma tramite

l'impiego di piccoli mezzi elettrici per la fruizione del vasto giardino, caratterizzato da dislivelli collegati da rampe e cordonate, a volte adattate con circoscritti aggiustamenti delle pendenze e modifiche della pavimentazione.

## 7.5

**Altre misure di adeguamento per la sicurezza**

La messa in sicurezza d'un edificio storico, oltre a comprendere, principalmente, i dispositivi tecnologici già visti per la prevenzione e protezione antincendio e la fruizione allargata, può anche passare attraverso una serie di provvedimenti che riguardano aspetti comunque non secondari in rapporto al suo riuso o all'attribuzione di nuove funzioni. Il caso sicuramente più comune riguarda l'adeguamento degli impianti elettrici, attualmente regolato dalla già richiamata norma CEI 64-15, introdotta, in Italia, per adattare e adeguare alle esigenze dell'edilizia storico-artistica quanto già disciplinato dalla precedente normativa sugli impianti elettrici generalmente intesi. Tale norma, proprio in ragione della sua particolare attenzione alle istanze poste dal riuso delle preesistenze, consente, in presenza di vincoli di tutela, di utilizzare anche vecchi impianti non rispondenti agli attuali standard di sicurezza previsti dalla legge 5 marzo 1990, n. 46 (*Norme per la sicurezza degli impianti*), purché non alloggiati in strutture combustibili, eventualmente compensando il rischio esistente con provvedimenti di altra natura, in grado di assicurare il livello di sicurezza equivalente. In assenza di impianti preesistenti, o qualora questi non fossero più utilizzabili, l'installazione di nuovi condotti e apparecchiature dovrebbe avvenire, come si diceva inizialmente, evitando al massimo interventi di natura distruttiva, possibilmente sfruttando aperture e canali già esistenti e cornici in grado di mimetizzare i cavi. La qualità dell'intervento dipenderà come sempre dalla capacità di escogitare di volta in volta, sulla base di un attento studio della consistenza architettonica e dei prodotti sul mercato, la soluzione più rispettosa del bene sottoposto all'intervento. A questo proposito si ricorda, per esempio, che le canalizzazioni a vista possono realizzarsi con fili conduttori rivestiti in rame o con il tipo a cordoncino intrecciato ispirato dalle vecchie condutture isolate tramite canapa, esteticamente gradevoli e resistenti al fuoco. È inoltre possibile far ricorso alle cosiddette strutture inamovibili – ossia supporti non fissati alle murature dell'edificio, ma ugualmente bloccati nel movimento grazie a determinate caratteristiche di forma e peso – quali elementi a sostegno dei nuovi sistemi di canalizzazione; in diversi casi, tali strutture possono ospitare anche apparecchi illuminanti e dispositivi antintrusione.

L'impiego di questi ultimi nel campo del restauro è oggi facilitato da un'ampia disponibilità di sistemi diversi di rilevamento e allarme, anche se i modelli privi di fili, pur se meno invasivi, appaiono per ora poco rispondenti alle esigenze di sicurezza richieste dagli edifici di valore storico-artistico, soprattutto se destinati a museo o a galleria d'arte. Per questi casi si rendono necessari anche i sistemi di videosorveglianza, in grado di monitorare costan-

temente ambienti e aree da proteggere attraverso un circuito chiuso di telecamere ad alta risoluzione opportunamente disposte e collegate a centrali di commutazione e videoregistratori. Anche la videosorveglianza è stata recentemente estesa alla scala urbana, come dimostra il moderno e articolato sistema in fibra ottica predisposto dalla Polizia municipale, a partire dal 2001, per la prevenzione contro atti di vandalismo sul patrimonio artistico di Firenze (2007).

## 7.6 Conclusioni

La casistica e le problematiche affrontate nel corso di questa breve trattazione dimostrano come, sin dalla prima comparsa dei dispositivi atti a facilitare l'aggiornamento, la trasformazione o il semplice riuso delle preesistenze architettoniche, in specie a partire dagli anni della seconda rivoluzione industriale, le operazioni di adeguamento tecnologico e impiantistico abbiano riguardato indifferente l'edilizia di base come le emergenze architettoniche, il tessuto urbano come le fabbriche a carattere storico-artistico, attraverso interventi che vanno dal semplice adeguamento degli impianti elettrici all'installazione di sistemi antincendio, fino all'aggiunta di moderni ascensori, celati all'interno di spazi idonei o palesemente esibiti nella loro attualità espressiva. Gli interventi illustrati dimostrano, dunque, che il comune obiettivo dell'adeguamento tecnologico può essere perseguito attraverso approcci diversi, talora antitetici, nessuno dei quali, in assoluto, più valido dell'altro, i cui esiti dipendono dalla qualità del rapporto istituito con la fabbrica storica. Una rapida valutazione di ciò che spesso si riscontra visitando monumenti e centri storici, soprattutto in ambiti periferici e non solo nel nostro paese, denota, al contrario, un'assenza di metodo sintomatica di quanto ancora resti da fare per sensibilizzare in tal senso non solo i progettisti, ma anche le committenze, le imprese edili, le amministrazioni e gli stessi organi di tutela, nella convinzione che solo da un confronto costruttivo fra le diverse parti coinvolte possano scaturire interventi rispettosi di opere che ci sono state consegnate dal passato e che è nostro dovere trasmettere al futuro nel migliore dei modi possibili.

# Glossario

**Analisi penetrometrica statica o dinamica** La prova penetrometrica statica (CPT: *Cone Penetration Test*) misura la resistenza offerta dal terreno all'infissione di una punta conica d'acciaio spinta da un martinetto meccanico. La punta avanza per tratti di 10 cm individuando resistenze in avanzamento (Rp), laterale (Rl) e totale del terreno che vengono rilevate in continua per mezzo di trasduttori elettrici. La prova penetrometrica dinamica (SPT: *Standard Penetration Test*) misura il numero dei colpi necessari (NSPT) per infiggere il campionatore per una certa lunghezza sotto un maglio dal peso predefinito. La prova SPT consente solo misurazioni discontinue, ma è meno costosa della prova CTP e può essere effettuata in qualunque terreno, anche ad alte profondità. (AP)

**Analisi termodifferenziale (DTA) e analisi termogravimetrica (TGA)** Le due indagini, spesso eseguite insieme, si compiono su un microcampione di materiale prelevato dall'opera e sottoposto a riscaldamento graduale fino a 1.000°C, valutando rispettivamente le conseguenti variazioni di temperatura e di peso determinate dalle trasformazioni chimiche e fisiche prodotte (emissione o assorbimento di calore). Il risultato è espresso da grafici caratterizzati da picchi corrispondenti alle trasformazioni chimico-fisiche avvenute, poiché ogni sostanza presenta un profilo caratteristico (subisce trasformazioni in condizioni costanti). La DTA consente di riconoscere i materiali con componenti organici (come leganti e vernici), che emettono calore bruciando e danno origine a grafici ben riconoscibili, mentre i materiali inorganici (malte e ceramiche) solitamente si decompongono assorbendo calore. (CB)

**Archeomagnetismo** Si basa sulla variazione nel tempo della direzione del campo magnetico terrestre, registrato su argille cotte al momento del loro riscaldamento per fenomeni di magnetismo termorimanente (TRM) e su altri materiali per magnetizzazione detritica (DRM) o chimica (CRM). La direzione del campo magnetico varia a seconda della regione, per cui bisogna stabilire zona per zona l'andamento delle variazioni secolari, misurando campioni locali indisturbati dal momento della cottura; la curva di riferimento che si ottiene consente di datare opere in argilla cotta o di circoscrivere i risultati ottenuti dalla termoluminescenza. (FL)

**Atomizzazione, nebulizzazione** Tecnica di pulitura che impiega acqua ridotta in gocce di diametro molto ridotto (fra 80 e 120 µm per la nebulizzazione, inferiore a 80 µm per l'atomizzazione). Appositi "atomizzatori" (o "nebulizzatori") alimentano cannule (da 6 a 24 per ogni apparecchio) facilmente orientabili in grado di generare una nube d'acqua che avvolge la superficie da trattare. Diminuendo la dimensione della singola goccia si ottiene un notevole aumento della superficie di contatto e, conseguentemente, del potere solvente ed emolliente dell'acqua; inoltre, la ridotta quantità di liquido

emessa (pochi ml al secondo nell'atomizzazione) determina la diminuzione dell'effetto bagnante e l'assenza di azione meccanica. La distanza fra gli ugelli va commisurata all'ampiezza del getto in modo da ottenere una bagnatura uniforme. È necessario porre molta attenzione nella scelta dell'acqua che alimenta il sistema in relazione al materiale sul quale si opera e alla tipologia di degrado. (LC)

**Calcimetria** Determinazione del contenuto di carbonato di calcio (sotto forma di calcare o di calcite) in un materiale lapideo effettuato su un campione prelevato dall'opera e ridotto in polvere. Il metodo della calcimetria (o "Dietrich-Fruhling") misura l'attacco dell'acido cloridrico sul materiale calcareo, attraverso la valutazione gas-volumetrica della CO<sub>2</sub> sviluppata (cfr. NORMAL 32/89). Si usa per caratterizzare i manufatti lapidei, valutare il loro stato di conservazione e determinare il rapporto legante/aggregato nelle malte storiche. (CB)

**Carbonio 13** La quantità di isotopi stabili del carbonio e dell'ossigeno è legata alla zona di provenienza del materiale: marmi giunti da ambiti geologici e storia metamorfica diversi possono presentare particolari rapporti di C<sub>13</sub>/C<sub>12</sub> e O<sub>18</sub>/O<sub>16</sub> che, affiancati a dati di natura archeologica e ad analisi autoptiche, nonché ad altre tecniche d'indagine di tipo petrografico e/o geochimico (che valutano forma, dimensioni, tessitura dei cristalli di calcite, tipo di minerali accessori), forniscono informazioni confrontabili con i database redatti per le varie località estrattive e permettono di identificarle con un buon grado di attendibilità. (FL)

**Carbonio 14** Tecnica di datazione assoluta basata sul decadimento del carbonio 14, isotopo radioattivo del carbonio che si dimezza ogni 5.730 anni; è applicabile a reperti contenenti composti organici di origine vegetale o animale. L'uso di questa tecnica può rivelarsi inefficace o fuorviante se l'oggetto ha subito alterazioni dovute al fuoco o a percolamenti di liquidi. (FL)

**Carotaggio** Tecnica di campionamento basata sul prelievo da elementi strutturali o terreni, tramite appositi strumenti dotati di corone taglienti, di saggi di forma cilindrica: questi possono essere sottoposti ad analisi di vario tipo, come prove chimico-fisiche, meccaniche, stratigrafiche, mineralogiche per verificare resistenza, provenienza, stato di conservazione e datazione assoluta (FL). Il prelievo di piccole carote di legno (diametro minimo 5 mm, massimo 30 mm), in particolare, si avvale della "trivella di Pressler", strumento formato da un cilindro in acciaio ad alta resistenza filettato al bordo per agevolare la penetrazione, da un impugnatura in acciaio e da un estraattore con copertura al teflon. Il materiale prelevato consente lo studio dendrocronologico dei legni antichi. (AD)

**Cromatografia** Tecnica di separazione di un composto basata sulla migrazione differenziata delle sostanze da separare attraverso due fasi tra loro immiscibili; essa permette d'isolare i diversi componenti per identificarli singolarmente. I meccanismi di separazione possono essere diversi; in generale si parla di cromatografia in fase liquida (come la cromatografia ionica o a scambio ionico) e cromatografia in fase gassosa (o gas-cromatografia). (CB)

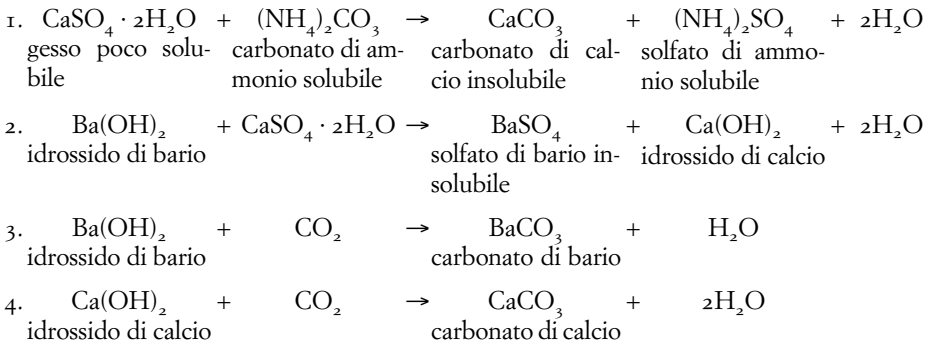
**Cromatografia ionica** Permette di separare e di riconoscere, tramite uno strumento apposito (cromatografo HPCL), i componenti a carattere ionico di una miscela (componenti dei sali), formati da ioni negativi e ioni positivi. L'indagine si esegue su un campione disciolto in soluzione; i risultati possono essere espressi da diagrammi ("cromatogramma") o tabelle che rivelano le quantità di ioni presenti (in "unità equivalenti" piuttosto che in mg/l, poiché i pesi degli atomi sono differenti). Ioni negativi sono ad



esempio solfati, cloruri, nitrati; ioni positivi sono sodio, calcio, magnesio, potassio. In tal modo si possono analizzare i prodotti di degrado sulle murature (efflorescenze e subflorescenze), misurando la quantità di sali presenti nei campioni, mentre l'identificazione dei tipi di cristallo richiede l'analisi XRD. (CB)

**Dendrocronologia** Tecnica di datazione assoluta che si basa sul confronto fra gli anelli di accrescimento visibili in una sezione lignea e le apposite curve regionali elaborate in base agli accrescimenti subiti dal fusto degli alberi nel corso del tempo. (FL)

**Desalinizzazione** Si serve di un trattamento con idrossido di bario e si accompagna al consolidamento di pitture murali solfatate e decoese. Dopo una prima applicazione a impacco su polpa di carta con carbonato d'ammonio, si procede con l'impiego d'idrossido di bario. Nella prima fase il solfato di calcio si trasforma in solfato di ammonio, che, essendo più solubile, viene parzialmente estratto (cfr. formula 1). Nella seconda fase, grazie alla reazione con l'idrato di bario, i solfati di calcio residui vengono trasformati in solfato di bario, del tutto insolubile (cfr. formula 2), e non più soggetto a migrazioni e cristallizzazioni. L'idrossido di bario in eccesso, poi, infiltratosi nelle porosità del materiale, reagisce con l'anidride carbonica e si trasforma in carbonato di bario (cfr. formula 3), compatibile con il carbonato di calcio del dipinto; esso esercita un'azione consolidante, ulteriormente rafforzata dal carbonato di calcio generato dall'idrossido di calcio (cfr. formula 4). (SR)



**Diffattrometria ai raggi x (XRD)** Analisi qualitativa per l'identificazione delle sostanze cristalline che compongono i materiali; si esegue su microcampioni, finemente macinati per essere investiti da raggi x. Lo spettro di diffrazione viene riprodotto in grafici, caratterizzati da una serie di picchi in base ai quali si riconoscono le sostanze cristalline contenute nei campioni. Ogni sostanza cristallina (materiali lapidei, naturali e artificiali, i metalli, i pigmenti, ma anche i sali e i prodotti di corrosione) determina infatti uno spettro di diffrazione "tipico", che dipende dalla particolare disposizione degli atomi. La radiazione emessa da materiali vetrosi o resinosi con struttura disordinata e amorfa (come la silice e l'allumina amorfe nei leganti idraulici, le pomice vetrose nelle pozzolane, i prodotti consolidanti o protettivi a base di silicati) non è invece identificabile. (CB)

**Elettrosmosi** Tecnica di risanamento che, in una muratura con umidità di risalita, inverte il flusso di molecole d'acqua generato dalla differenza di potenziale fra parete umida e terreno (derivante dall'organizzazione delle molecole d'acqua aderenti alla

superficie idrofila dei materiali nel muro). La differenza di potenziale tende a trasportare l'acqua dal polo positivo (terreno) al polo negativo (struttura muraria), mentre l'elettrosmosi inverte le due polarità. L'elettrosmosi "passiva" (detta anche "a corto circuito") determina il trasferimento d'acqua tramite l'infissione di elettrodi nel terreno (barre metalliche inserite in appositi pozzetti) e nella muratura (sonde di rame connesse da un conduttore); questi sono collegati fra loro con aste di rame e generano in tal modo un corto circuito. L'elettrosmosi "attiva" prevede invece la creazione di due circuiti, anodico sul muro e catodico nel terreno, attraverso l'inserimento di elettrodi collegati a una centralina d'alimentazione che eroga corrente continua a bassa tensione. (SR)

**Endoscopia** Tecnica diagnostica che permette d'ispezionare condotti e piccole cavità con sonde provviste di telecamera o macchina fotografica o costituite da fibre ottiche approfondendo la conoscenza dell'edificio in punti inaccessibili alla visione diretta, come in strutture di fondazione, solai nascosti da false volte, intercapedini e sovrapposizioni dovute al succedersi di vari eventi costruttivi. (FL)

**Fluorescenza a raggi x (XRF)** Consente d'identificare gli elementi chimici (atomi) costitutivi di un campione, analizzando la frequenza e l'intensità della loro emissione di radiazione x dovuta a eccitazione atomica ("fluorescenza x caratteristica"), elaborata in un apposito grafico. L'analisi può essere condotta anche con strumentazione portatile e senza prelievo di materiale, ma lo spettro XRF che ne deriva riguarda solo determinati punti sulla superficie. La radiazione caratteristica emessa può essere rivelata in funzione della sua lunghezza d'onda (WD-XRF: *wave dispersive*) o della sua energia (ED-XRF: *energy dispersive*, fornita dalla strumentazione portatile, più utilizzata per identificare i pigmenti nelle pitture murali o per studiare i prodotti di alterazione superficiale); una particolare applicazione della XRF è realizzata anche con la sonda EDS nei microscopi elettronici a scansione. (CB)

**Fluorescenza ultravioletta (UV)** Tecnica d'indagine non invasiva (non richiede prelievo di materiale) utilizzata per analizzare le superfici, per esempio allo scopo d'individuare le sostanze organiche presenti nei dipinti murali; queste, infatti, se sottoposte a radiazione ultravioletta emettono una fluorescenza visibile. Nel restauro pittorico è in tal modo possibile distinguere le parti eseguite "a fresco" dai ritocchi o da successive riprese a tempera, così da consentire l'impiego di metodi di pulitura diversi. L'indagine UV può essere elaborata in un'immagine fotografica oppure può effettuarsi puntualmente tramite spettroscopio. Non sempre, però, una mancata fluorescenza deriva dall'assenza di sostanze organiche: alcuni pigmenti possono infatti estinguere la radiazione anche in presenza di sostanze organiche. (CB)

**Gas-cromatografia con spettrometro di massa (GC-MS)** Tecnica d'indagine microstrutturale che combina le proprietà del gas-cromatografo di separare le miscele, con quelle dello spettrometro di riconoscere e quantificare le sostanze. Aiuta a identificare con precisione le sostanze organiche presenti nei dipinti murali, come nei falsi affreschi. Si basa su un microprelievo di un campione dell'opera, solitamente dopo una prima individuazione tramite fluorescenza UV. (CB)

**Impacchi** Tecnica di pulitura in grado di mantenere a lungo una soluzione acquosa a diretto contatto con la superficie da trattare, grazie all'uso di appositi materiali di supporto quali polpa di carta, carbossimetilcellulosa o argille altamente assorbenti (sepioli-

te, attapulgite ecc.). Dopo un attento sgrassaggio della superficie, l'ispessente, già imbevuto di soluzione attiva, viene manualmente steso sul monumento (avendo cura di ottenere una perfetta adesione) per uno spessore di 2-4 cm e lasciato agire per un tempo predeterminato tramite appositi tasselli di pulitura. La rimozione dell'impacco deve essere preferibilmente effettuata a pasta ancora umida al fine di evitare danni alla superficie (specialmente se decorata); segue un lavaggio finale con acqua distillata per eliminare eventuali residui. A seconda del tipo di soluzione utilizzata, gli impacchi possono avere azione pulente, assorbente o biocida e presentano spesso un ruolo di coadiuvante accanto ad altri trattamenti. La tecnica è molto economica, ma deve essere applicata con cautela in più stesure e controllata costantemente con misurazione del ph nel corso della sua azione. (LC)

**Impregnazione** Tecnica di consolidamento finalizzata al recupero della coesione fra i granuli del materiale trattato. L'impregnazione del consolidante può seguire modalità differenti: dal passaggio a pennello o a siringa a quello a spruzzo (come avviene con le nanocalci), dall'assorbimento tramite impacco fino all'immersione totale del pezzo nella soluzione contenente il principio attivo. (LC)

**Indagini soniche e ultrasoniche (con metodi sonici per il legno)** Metodi di controllo basati sulla generazione di onde elastiche a bassa o ad alta frequenza (soniche o ultrasoniche) in un punto della struttura, attraverso la percussione con appositi strumenti o con trasduttori elettrodinamici. Si misura in genere il tempo impiegato dall'impulso per coprire la distanza fra il punto di emissione e quello di ricezione e si calcola di conseguenza la velocità di trasmissione nel mezzo di spessore conosciuto; questa risulterà maggiore nei mezzi omogenei solidi e minima nell'aria. L'attrezzatura impiegata sulle murature è costituita da un oscilloscopio che analizza e registra le forme d'onda generate da un martello strumentato e rilevate da un accelerometro posizionato sul punto di ricezione. In base alla posizione dei punti di emissione e ricezione la tecnica può essere "diretta" o "per trasparenza" (punto di ricezione sul lato opposto e ortogonale a quello di emissione), "di superficie" (entrambi i punti sono allineati sullo stesso lato), "radiale" (i punti sono posizionati su facce adiacenti). Per il legno, la tecnica più usata misura onde meccaniche in direzione parallela alla fibratura; essa utilizza apparecchi del tipo "Sylvatest" (che valuta il modulo di elasticità attraverso la registrazione del tempo di trasmissione), il "Pundit" e lo "Stress Wave Timer" (un martello elettronico che individua vuoti o parti interne deteriorate). (AD)

**Magnetometria (o magnetoscopia)** Tecnica non distruttiva finalizzata all'individuazione di corpi metallici all'interno di murature, strutture in concrezione o calcestruzzo e terreni. Le apparecchiature, utilizzate *in situ*, sono in grado di determinare, sfruttando le proprietà dei campi magnetici, una differenza di potenziale fra le estremità del conduttore, che si caricano con segno opposto. Tale differenza di potenziale ( $e$ ) è funzione dell'intensità ( $I$ ) del campo magnetico, della lunghezza ( $l$ ) del conduttore e della velocità ( $v$ ) con cui questo si muove nel campo magnetico stesso, secondo la relazione  $e = v \times l \times I$ . La tensione terminale del conduttore in movimento si ottiene sottraendo alla differenza di potenziale ( $e$ ) la caduta di tensione determinata dal passaggio di corrente indotto collegando le estremità del conduttore a un circuito esterno. È così possibile rilevare andamento ed eventuali deformazioni di tubi impiantistici, la presenza di armature metalliche nel cemento armato, eventuali elementi metallici inseriti all'interno di muri e volte. (MDM)

**Metodi elettrici per la misura del contenuto d'acqua (metodo conduttimetrico, metodo capacitivo e metodo a microonde)** Consentono di calcolare il contenuto d'umidità sulla base delle variazioni subite in presenza d'acqua dalle proprietà elettriche dei materiali, quali la conducibilità elettrica (metodo conduttimetrico), la resistenza elettrica (metodo capacitivo) e le caratteristiche di assorbimento delle microonde elettromagnetiche (metodo a microonde). Conducibilità elettrica e costante dielettrica sono misurate trasmettendo corrente elettrica nel materiale o nel componente edilizio attraverso due elettrodi connessi a un generatore e a uno strumento di lettura. Nel primo metodo, elettrodi ad aghi di diversa lunghezza permettono di misurare il contenuto d'umidità sia in superficie che in profondità; nel secondo, elettrodi a piastra consentono di eseguire misurazioni all'interno di strati sottili e perfettamente lisci (soprattutto intonaci, stucchi e affreschi, non danneggiabili), previa opportuna taratura dei valori rilevati; il metodo a microonde calcola invece con un rivelatore di attenuazione le variazioni d'intensità delle microonde elettromagnetiche emesse da un generatore e fornisce risultati la cui attendibilità dipende dalle caratteristiche della parete (di spessore inferiore a un metro e con superfici a vista perfettamente piane e parallele), dalla lunghezza d'onda impiegata (quindi dal tipo di generatore) e dalla temperatura. La presenza dei sali solubili all'interno della struttura può condizionare i due primi sistemi, che si prestano comunque a un largo impiego, perché basati su strumenti di facile applicazione, economici e rapidi. (BM)

**Metodo al carburo di calcio** Viene utilizzato per conoscere il contenuto d'acqua all'interno di un materiale e si basa sulla misurazione della pressione esercitata dal gas acetilene che si sviluppa per reazione chimica dell'umidità presente nel materiale con il carburo di calcio contenuto all'interno di un contenitore metallico a tenuta. È possibile risalire al contenuto d'acqua facendo uso di tabelle di calibratura in dotazione dello strumento. L'attendibilità delle misure ottenute dipende dalle modalità di preparazione e lavorazione del campione, che deve essere ridotto in polvere; i sistemi di controllo delle condizioni termogravimetriche presenti in laboratorio consentono di giungere a risultati migliori, in quanto evitano perdite del contenuto d'acqua del materiale per evaporazione. Lo svolgimento delle misure sul campo è comunque possibile tramite l'impiego di un'economica strumentazione portatile e offre il vantaggio di fornire dati puntuali e immediati. (BM)

**Metodo ponderale** Fornisce la misura puntuale del contenuto percentuale di umidità all'interno di una struttura muraria in base al confronto fra peso del campione prelevato (peso umido) e peso del campione essiccato all'interno di appositi forni (peso secco). Esso consente la determinazione esatta del contenuto d'acqua dei campioni, poiché l'attendibilità dei risultati dipende quasi esclusivamente dalle modalità di acquisizione e di conservazione del materiale, e può essere esteso alla conoscenza della distribuzione verticale e in profondità della quantità d'acqua nella parete tramite la realizzazione di più prelievi mirati. (BM)

**Metodo termico (o della conduttività al calore)** Consiste nella misura indiretta del contenuto d'acqua presente in un materiale o in un componente edilizio a seguito di riscaldamento indotto su di essi e in base alle variazioni subite dalla loro conduttività termica. Due sonde termiche, collocate a opportuna distanza, rilevano l'aumento di temperatura (che è funzione del tempo e della distanza tra le sonde); in base alla relazione di Fourier è quindi possibile, conoscendo la misura del tratto attraversato dal flusso di calore e il gradiente termico fra le due parti rilevate, risalire al valore della conduttività termica del materiale, che aumenta al crescere del contenuto d'acqua. Il

metodo è utilizzato su materiali sottili (come le finiture murarie) e fornisce risultati poco precisi per via delle disomogeneità strutturali e materiche. È tuttavia di facile gestione e può essere effettuato con strumenti portatili. (BM)

**Microiniezioni** Tecnica di consolidamento basata su iniezioni di apposite miscele (calce idraulica naturale additivata con aeranti e fluidificanti) in grado di colmare le cavità presenti all'interno del materiale o lungo i margini di contatto fra strati non omogenei. La lavorazione deve essere eseguita da manodopera esperta, al fine di evitare la formazione di sottoprodotti dannosi e la dispersione del materiale iniettato; semplici iniezioni preliminari con acqua consentono d'individuare e di sigillare preventivamente le possibili vie di fuga della miscela. Per verificare il risultato finale è sufficiente una leggera percussione della superficie consolidata. (LC)

**Misure deformometriche e controllo delle giaciture** Il movimento e l'eventuale progredire nel tempo di una lesione possono essere misurate con il deformometro, un micrometro o estensimetro di precisione (trasduttore), dotato di una barra di riferimento in metallo speciale "invar" in grado di rilevare, con una lettura diretta consentita da un quadrante graduato, uno spostamento fra due punti della struttura fino al centesimo o al millesimo di millimetro (a seconda del grado di precisione). I deformometri sono di tipo meccanico o elettronico, a seconda del trasduttore che viene impiegato per la misura. Il controllo di giaciture orizzontali (come la distanza fra pareti opposte) o verticali (nei pilastri) è consentito da estensimetri automatici, costituiti da un filo di "invar" teso fra i due estremi della muratura. La misura, manuale o automatica, delle variazioni di verticalità (come nella rotazioni di pilastri o torri) può essere valutata con pendoli dritti, con un sistema che si basa su una massa sospesa e sul principio del filo a piombo. (AD)

**Monitoraggio strutturale (statico e dinamico)** Sistema di controllo statico che misura le deformazioni nel tempo di una struttura interessata da importanti quadri fessurativi e, nel contempo, determina possibili correlazioni con eventi esterni (come variazioni di temperatura o eventi meteorologici particolari), attraverso l'installazione diretta di trasduttori di spostamento (ad esempio posti a cavallo fra lesioni), trasduttori di spostamento a filo (solitamente in direzione verticale), sensori di temperatura (per il controllo dei parametri climatici). La rete di strumentazione viene completata da un sistema di acquisizione dati, collegata con cavi multipolari, e da un modem GSM per la trasmissione dei dati e la gestione degli allarmi. Le prove dinamiche sono finalizzate al controllo della risposta della struttura a vibrazioni ambientali (determinate da vento, sisma, traffico veicolare, eccitazioni indotte da campane) o forzate (prodotte da sistemi di martellamento locale o da vibrodine) rilevate da una rete di accelerometri installati su punti significativi e collegati a una centralina digitale di acquisizione. L'analisi spettrale permette di estrarre parametri in termini di frequenza, forme modali e smorzamento caratteristici della risposta locale e globale della costruzione. (AD)

**Olografia** Tecnica fotografica basata su principi fisici e ottici che consentono d'impressionare su fotogrammi un'immagine tridimensionale virtuale prodotta dall'intersezione tra fasci laser riflessi contemporaneamente dall'oggetto analizzato e da uno specchio. In allestimenti museali o installazioni di altro tipo, consente di suggerire la presenza di apparati scultorei o architettonici (ad esempio originariamente disposti in quel contesto), aiutando a valutarne l'inserimento nello spazio, le relazioni visive, le volumetrie. (FL)

**Osservazione al microscopio elettronico a scansione (SEM) con microsonda analitica (EDS)** L'osservazione di frammenti di materiale con ingrandimenti molto forti (fino a 400.000x), caratterizzati da una perfetta definizione e profondità di campo, viene consentita analizzando le superfici dei campioni investite da fasci di elettroni anziché di luce (come nel microscopio ottico). I materiali conduttori di elettricità, come i metalli, permettono osservazioni ottimali; per tale ragione i campioni di altre sostanze devono essere preventivamente rivestiti da un sottile film conduttore (solitamente oro o grafite), trattamento che rende incolore l'immagine osservata al monitor. Il SEM consente di osservare la struttura cristallina del materiale, le eventuali alterazioni subite, nonché il livello di penetrazione – e, quindi, l'efficacia – di consolidanti e protettivi. Solitamente l'osservazione al SEM viene associata alle microanalisi con sonda EDAX o EDS, che forniscono la composizione chimica del materiale, per singoli punti, tramite spettrometria a raggi x; tale tecnica è ad esempio utilizzata per analizzare i prodotti di degrado superficiale o per identificare i pigmenti negli strati pittorici. (CB)

**Osservazioni al microscopio ottico (sezione sottile, sezione lucida, *cross section*)** Le osservazioni in microscopia ottica possono essere eseguite su frammenti di materiale direttamente prelevato dall'opera ed esaminato oppure su sezioni appositamente preparate, a seconda del tipo di indagine da eseguire. Nel primo caso, un campione dell'opera allo stato naturale (ma anche di possibili prodotti di alterazione biologica, come alghe e batteri) può essere ingrandito (da 2,5 a 200x) con uno stereomicroscopio a luce incidente e studiato nella morfologia attraverso diverse immagini tridimensionali. Le osservazioni possono essere diversamente compiute, tramite microscopio ottico in luce polarizzata, sul materiale preparato in sezioni sottili trasparenti (luce trasmessa) o sezioni lucide opache (luce riflessa). La sezione sottile è una lamina di materiale (spessore circa 30 (m) posta tra due vetrini che, attraversata da una luce filtrata attraverso appositi polarizzatori (a Nicol paralleli o incrociati), consente d'identificare i minerali, quindi il materiale lapideo naturale o miscelato in conglomerati, attraverso l'osservazione delle caratteristiche cristalline (forma, dimensioni, indici di rifrazione, colore ecc.). La sezione lucida viene realizzata inglobando un frammento di materiale in una resina trasparente e osservandone la morfologia con luce riflessa; se il frammento viene sezionato in senso trasversale, la sezione è detta *cross section* e consente di osservare, in particolare, la struttura di un materiale che presenta stratificazioni (come un intonaco o una pellicola pittorica). In questo modo, l'osservazione al microscopio permette di definire gli spessori degli strati, la loro adesione, le successioni stratigrafiche delle coloriture, le alterazioni superficiali e la presenza di prodotti di finitura. (CB)

**Porosimetria** Test che studia la porosità, dovuta a configurazione naturale o a fenomeni di degrado, nei campioni di materiale da costruzione (pietre, mattoni, malte ecc.). Per conoscere la distribuzione dei pori a seconda del loro diametro, i provini vengono immersi nel mercurio e sottoposti a pressioni crescenti; un porosimetro a mercurio misura quindi la quantità di mercurio che entra nei pori alle diverse pressioni. Il mercurio non è attratto dalle pareti dei pori dei materiali; ne consegue che il loro diametro sarà tanto più piccolo quanto più aumenta la pressione esercitata. Le indagini porosimetriche sono anche utili per studiare le modificazioni indotte sui materiali dall'applicazione di consolidanti e protettivi di restauro. (SR)

**Prove di compressione con martinetti piatti** Consente la determinazione dello stato di sforzo strutturale mediante il rilascio tensionale provocato da un taglio orizzontale eseguito su una muratura; il rilascio è segnalato della riduzione della distanza tra i

margini superiore e inferiore del taglio. L'inserimento di un sottile martinetto piatto (di forma rettangolare o semicircolare) all'interno della muratura consente di ripristinare la distanza misurata prima del taglio tramite un graduale aumento della pressione. La variazione di distanza fra punti a cavallo del taglio è misurata con un estensimetro prima e dopo il taglio e durante l'aumento di pressione nel martinetto piatto. La relazione di equilibrio da soddisfare nell'applicazione della prova è data da  $S_f = K_j K_a P_f$ , con  $S_f$  = valore di sforzo calcolato,  $K_j$  = costante adimensionale di taratura del martinetto ( $< 1$ ),  $K_a$  = costante adimensionale data dal rapporto area del martinetto / area del taglio ( $< 1$ ) (il calcolo di  $K_j$  e  $K_a$  è descritto nelle ASTM C 1196, 1991),  $P_f$  = pressione nel martinetto corrispondente all'annullamento dello spostamento provocato dal taglio. Per determinare le caratteristiche di deformabilità, dopo aver scaricato il martinetto già inserito nella muratura, si esegue un altro taglio parallelo al primo e viene introdotto un secondo martinetto (a circa 40-50 cm di distanza dal primo). Sulla superficie delimitata dai due piatti si applica uno sforzo monoassiale, mentre trasduttori direttamente applicati sulla muratura registrano gli spostamenti in direzione verticale e orizzontale. (AD)

**Prove di durabilità (o di invecchiamento accelerato)** Sono finalizzate alla valutazione degli effetti prodotti dall'invecchiamento naturale su materiali da costruzione e all'eventuale verifica dell'efficacia di trattamenti protettivi e consolidanti. I campioni di materiale sono sottoposti in laboratorio a cicli accelerati di degrado gelo-disgelo e secco-umido, nonché a cicli termici in atmosfera aggressiva con presenza di  $SO_2$  e di ricristallizzazione salina. Una cella climatica, munita di una camera a tenuta stagna per valutare l'incidenza sul materiale di atmosfera inquinata con  $SO_2$ , riproduce le diverse condizioni termiche e idrometriche. Prove d'invecchiamento particolari (anche dette "xenotest") impiegano un'apparecchiatura con lampade allo xeno che emettono radiazioni ultraviolette e infrarosse; un'ora di esposizione corrisponde a circa 50-70 ore di esposizione alla radiazione solare naturale a mezzogiorno, nel mese di giugno e in condizioni di cielo terso. (BM)

**Prove dilatometriche** Sono prove da effettuarsi *in situ* e da affiancare alle indagini di laboratorio, al fine di determinare le caratteristiche di un terreno, soprattutto se costituito da materiali poco coerenti. Consentono di valutare la variazione della deformabilità di un terreno in relazione alla profondità e vengono eseguite con il "dilatometro piatto di Marchetti", formato da una lama piatta d'acciaio affiancata da una sottile membrana circolare dello stesso materiale che viene deformata con l'aria compressa. La lama viene conficcata verticalmente nel terreno tramite le aste di una sonda o con un penetrometro statico e, ogni 20 cm, la membrana viene dilatata orizzontalmente misurando i valori delle pressioni necessarie rispettivamente a gonfiare la membrana fino a raggiungere il terreno circostante e a spingere quest'ultimo di 1 mm. Le misure vengono effettuate in superficie con una centralina manometrica di controllo collegata alla punta attraverso un cavetto elettropneumatico ad alta pressione inserito nelle delle aste cave del dispositivo di spinta. Le prove dilatometriche forniscono, al variare della profondità, parametri diversi, quali la resistenza a taglio non drenata, il modulo edometrico, nonché un'indicazione di tipo stratigrafico. (SR)

**Prove "d'impronta" nel legno (metodo Janka, metodo Brinell, metodo Turrini e Piazza)** Consentono di determinare il modulo di elasticità di un elemento ligneo, misurando, solitamente in laboratorio, la durezza superficiale. La UNI ISO 3350 definisce il "metodo Janka", che misura la forza necessaria (espressa in Newton) per far penetrare una sfera di diametro 11,284 mm per una profondità pari al suo raggio, uti-

lizzando un punzone con un'estremità emisferica (raggio di 5,642mm) sotto la spinta di un carico progressivamente crescente; raggiunta la profondità di 5,642 mm, si effettua la lettura del carico applicato. Il "metodo Brinell" (definito dalla norma francese NF B 551-126/76), simile al precedente, misura il diametro dell'impronta lasciata da una sfera di acciaio di 10 mm sottoposta a un carico crescente fino a un valore prefissato; il rapporto fra il carico applicato e la superficie dell'impronta lasciata, espresso in MPa, fornisce il valore della durezza "Brinell". Di recente è stato messo a punto il cosiddetto "metodo Turrini e Piazza", dal nome dei suoi ideatori, che valuta il modulo elastico E tramite una correlazione con la forza R ( $E = 350R^{0.5}$ ), necessaria per imprimere di 5 mm una punta sferica di acciaio di 10 mm nella superficie laterale del legno. (AD)

**Prove dinamiche su legno (con Pylodin, con penetrometro "Wood Pecker")** Test impiegati per valutare la densità del legno mediante l'impiego di strumenti che "sparano" un perno cilindrico contro la superficie dell'elemento e misurano la profondità di penetrazione. Uno strumento molto usato è il "Pylodyn", costituito da un sistema a molla analogo agli sclerometri per calcestruzzo e da un perno di acciaio di lunghezza massima 110,2 mm e diametro variabile fra 2 e 3 mm. Il penetrometro "Wood Pecker" è formato da uno sclerometro per calcestruzzo, dotato di una cuffia d'acciaio aggiunta all'asta di percussione, che sostiene un puntale in acciaio temprato rettificato a sezione circolare (diametro 2,5 mm). La prova viene eseguita facendo penetrare il puntale con cinque colpi consequenziali e misurando la profondità di penetrazione con un apposito sistema di rilevazione. (AD)

**Prove di permeabilità** Consentono la misura della permeabilità dei materiali all'acqua sia in fase liquida che in fase di vapore e possono essere finalizzate alla verifica dell'efficacia di trattamenti impermeabilizzanti. Comprendono: a) prove di assorbimento capillare, eseguibili sia in laboratorio (dove il campione viene imbibito con acqua deionizzata e pesato più volte per misure la quantità d'acqua assorbita in funzione del tempo e per unità di superficie) sia *in situ* (tramite strumenti come la "scatola di assorbimento", che misura la permeabilità del materiale in condizioni di pressione idrostatica costante, o come il "tubo di assorbimento", che lavora in pressione variabile); b) prove di assorbimento per immersione (con immersione completa del campione in acqua); c) prove di permeabilità a bassa pressione (simulando l'assorbimento del materiale in condizioni di pioggia battente tramite un dispositivo a gravità per l'applicazione di acqua distillata e misurazioni ripetute della quantità di acqua assorbita per unità di superficie); d) prove di permeabilità al vapore (eseguite su campioni posti a chiudere una cella di misura contenente sul fondo uno strato di acqua deionizzata misurando con pesate successive la quantità d'acqua che fluisce attraverso il campione per unità di superficie). (BM)

**Prove di "resistenza alla trapanatura" nel legno** Sono test in grado di fornire la "resistenza alla trapanatura" impiegando trapani strumentati. La resistenza alla trapanatura viene stimata in modo indiretto, misurando l'energia che viene assorbita per consentire l'avanzamento della punta a velocità costante. Il "Resistigraph" o il "Densitomat", simili a trapani e dotati di due motori elettrici che attuano il movimento rotatorio della punta, consentono la registrazione dell'energia che si deve imprimere a una trivella per la perforazione attraverso la misura della corrente assorbita dai due motori. Il *Decay Detting Drill 200* fornisce invece la registrazione grafica della velocità d'avanzamento della punta nel legno con una pressione costante. (AD)

**Prove di resistenza nel legno (uso del cacciavite, estrazione di un chiodo o di una vite)** Sono prove dirette sul legno. La prima consiste nell'infiggere (con l'ausilio di



un martello) un cacciavite o un punteruolo nel materiale, saggiando la resistenza offerta alla penetrazione (il legno degradato offre meno resistenza all'infissione). La seconda viene eseguita facendo penetrare un chiodo o avvitando una vite e saggiando successivamente la capacità di estrazione. La forza di estrazione viene misurata impiegando celle di carico dinamometriche collegate ad appositi indicatori numerici. (AD)

**Prove fisiche su campioni di terreno (peso specifico, contenuto d'acqua, analisi granulometrica, limiti di consistenza)** Servono a caratterizzare le componenti solide del terreno per elaborare indicazioni circa il suo comportamento meccanico. Il terreno è composto da particelle solide e da vuoti riempiti da liquidi (solitamente acqua) e gas di varia natura. Ognuna delle tre fasi (solida, liquida e gassosa) è rappresentata da un determinato volume che, messo in relazione con il proprio peso, permette di ricavare alcuni parametri rappresentativa del terreno in esame. Tra questi, i più importanti sono il "peso dell'unità di volume" o "peso specifico naturale" ( $g$ ), definito come rapporto fra il peso totale del campione (compresa l'acqua) e il suo volume totale. Se il terreno è saturo, si analizza il "peso di volume saturo" ( $g_{sat}$ ); se invece è asciutto, il "peso di volume secco" ( $g_d$ ). Il "peso specifico dei grani" ( $G_s$ ) è infine definito dal rapporto fra peso specifico dei componenti solidi ( $g_s$ ) e peso specifico dell'acqua ( $g_w$ ). Per determinare il contenuto d'acqua in un campione occorre sottrarre dal suo peso allo stato naturale con quello misurato dopo l'essiccazione in forno. In relazione al contenuto d'acqua ( $w$ ), un terreno può avere un comportamento fluido, plastico, semisolido e solido cui può essere associata una certa risposta del terreno alle sollecitazioni. Il contenuto di acqua che separa il passaggio dal solido al semisolido è detto "limite di ritiro" ( $w_R$ ) e viene determinato per progressivo essiccamento di un provino fino a che, misurando il volume, questo non subisce ulteriori riduzioni. Il passaggio dallo stato semisolido a quello plastico si valuta attraverso il "limite di plasticità" ( $w_P$ ), definito come il contenuto d'acqua corrispondente al formarsi delle prime screpolature su cilindri di terreno, di dimensioni standard, fatti rotolare su una lastra di vetro. Infine, nel passaggio dallo stato plastico a quello liquido, si parla di "limite di liquidità" ( $w_L$ ), misurato per mezzo dell'"apparecchio di Casagrande", costituito da una coppella, al cui interno viene posto il terreno impastato con acqua, collegata a un meccanismo di caduta. Il limite di liquidità è pari a quel contenuto di acqua tale per cui il solco tracciato con apposita spatola sulla terra si richiude in 25 battute. I tre limiti, detti "di Atterberg", consentono una classificazione del terreno in relazione alla sua consistenza valutata in base all'indice di consistenza  $I_c = (w_L - w)/(w_L - w_P)$ . La classificazione dei terreni si serve poi della valutazione della granulometria, che esprime la distribuzione percentuale dei grani di dimensioni diverse in un campione di terra e che viene misurata con il vaglio di campioni in una successione di setacci a maglie sempre più strette dall'alto verso il basso. (SR)

**Prove fisiche sui materiali** Sono necessarie sia durante lo studio dei materiali costituenti l'opera, sia nella successiva fase di analisi delle interazioni fra il monumento e i prodotti di trattamento. Per la completa caratterizzazione di un materiale sono ormai disponibili numerosi test, da svolgere *in situ* come in laboratorio, più o meno distruttivi. Ripetendo più volte tali analisi su provini trattati e non, esposti per vari intervalli di tempo nelle reali condizioni ambientali del monumento o invecchiati artificialmente in camera ambientale, si ottengono dati preziosi riguardo all'efficacia dei materiali. Il metodo sperimentale consente una valida risposta sia per la valutazione di nuove tecnologie, sia per la verifica dell'impatto di una specifica lavorazione (ad esempio le varie tipologie di pulitura) applicate in un dato contesto. (LC)

**Prove *in situ* su murature (sclerometrica, penetrometrica, *pull-out test*)** Sono tecniche di penetrazione superficiale che consentono di ricavare informazioni sulla resistenza e la durezza del materiale. L'uso dello sclerometro a pendolo permette di stimare la durezza superficiale del materiale (rilevata attraverso l'altezza del rimbalzo di una massa battente interna allo strumento), che può essere in qualche modo correlata alla sua resistenza. Le prove penetrometriche, eseguibili con diverse apparecchiature, si basano su correlazioni tra la profondità di penetrazione di sonde e le proprietà meccaniche del materiale. La penetrazione dinamica aiuta a caratterizzare le malte: essa misura la resistenza opposta da un ricorso di malta, orizzontale o verticale, alla penetrazione d'una punta d'acciaio normalizzata, infissa con successive percussioni di una massa lasciata cadere con angolazione prefissata. A intervalli regolari si misura il numero di colpi effettuati e, tramite uno strumento di precisione, l'avanzamento della punta. La resistenza a compressione viene stimata per confronto con tabelle comparative e normalizzate. La prova di estrazione (*pull-out test*) stima la resistenza del calcestruzzo *in situ* in base alla forza necessaria per estrarre un tassello a espansione posizionato nel calcestruzzo indurito, mediante opportuna correlazione. L'estrazione del tassello avviene mediante un martinetto oleodinamico collegato a un circuito idraulico pressurizzato e la pressione di estrazione viene letta su un manometro. Questa tecnica viene impiegata anche su mattoni e pietre e, più raramente, su giunti di malta sufficientemente spessi. (AD)

**Prove meccaniche su campioni di muratura** Individuata una zona rappresentativa della muratura, viene prelevato un provino tramite una sonda a rotazione munita di corona diamantata (80-100 mm); per ottenere risultati attendibili è necessario lavorare su campioni sufficientemente integri e, preferibilmente, prelevati secondo l'asse di sollecitazione. In laboratorio, il provino può essere sottoposto a una prova "di compressione monoassiale", consistente nell'applicare una sollecitazione crescente fino a rottura, mediante la quale si traccia il diagramma delle deformazioni e si ricava il valore del carico ultimo. Nella "prova di taglio diretta", il campione, sottoposto a una compressione  $N$  costante lungo l'asse verticale, viene sollecitato nella parte superiore con una forza orizzontale crescente fino a determinare lo scorrimento rispetto a quella inferiore; si calcola così lo spostamento orizzontale in funzione di  $N$ . La prova a trazione diretta consiste nell'applicare un tiro su entrambe le facce del provino fino a determinare la tensione di rottura a trazione. Quest'ultima può essere ricavata anche con la "prova a trazione indiretta", in cui la trazione agisce sul piano orizzontale ed è ottenuta indirettamente, ovvero come effetto della pressione esercitata sulle due basi del provino. (AP)

**Prove meccaniche su campioni di terreno** La "prova edometrica" (o "prova di compressione a espansione laterale impedita") viene effettuata applicando una pressione verticale (pari a circa 0,05 kg/cmq per 5 secondi) a un campione saturo (al quale è permesso di drenare da una o da entrambe le basi) e misurando le deformazioni verticali del provino; la variazione di volume è in rapporto con il suo contenuto d'acqua. Il tracciamento della curva "cedimenti-log(tempo)" fornisce informazioni sulla capacità del terreno di subire riduzioni di volume in seguito all'aumento dello sforzo normale e permette di ricavare i parametri  $c_v$  (coefficiente di consolidazione primario: si ricava portando la pressione finale fino a 4 volte maggiore di quella di consolidazione) e  $c_a$  (coefficiente di compressione secondaria). Questo tipo di analisi permette di ottenere il coefficiente di compressibilità ( $a_v$ ), il modulo edometrico ( $E_{cd}$ ), indice di compressione ( $cc$ ), di ricomprensione ( $Cr$ ), di rigonfiamento ( $Cs$ ), la pressione di consolidazio-

ne ( $\sigma'_{vo}$ ) e il coefficiente di permeabilità (K). La “prova di compressione a espansione laterale libera” può essere effettuata solo su terreni coesivi. Viene applicata una compressione al provino (a incrementi di carico costanti o a velocità di deformazione costante) fino al raggiungimento di una deformazione assiale pari al 20%. Dal diagramma “pressioni-deformazioni” è possibile ricavare il modulo elastico iniziale, secante e a rottura. La “prova triassiale” consiste nel portare a rottura il provino soggetto ad una  $\sigma'_v$  crescente e mantenendo quella di contenimento costante, in condizioni drenate (con variazione del volume del provino) o non drenate (si misurano contestualmente anche le pressioni neutre  $u$ ). Altre prove possono essere effettuate agendo anche sul valore della pressione orizzontale ( $\sigma_h$ ; mantenendo costante  $\sigma_v$ , oppure imponendo incrementi di  $\sigma_h$  e  $\sigma_v$  secondo determinati rapporti). La prova permette di ottenere coesione, angolo di attrito interno e limite alla rottura per scorrimento. La “prova di taglio diretto” permette di ricavare la resistenza al taglio in relazione alla pressione verticale applicata; consiste nell'imporre una traslazione orizzontale a velocità costante della parte inferiore della scatola contenente il provino. (AP)

**Prove pacometriche o magnetoscopiche** L'indagine consente di rilevare la presenza di elementi a bassa trasparenza, come i metalli nella muratura, grazie all'impiego di onde elettromagnetiche molto penetranti emesse da un pacometro. La prova sfrutta le proprietà magnetiche dei metalli: un forte conduttore (come le armature del cemento armato, le zanche di ancoraggio, i tiranti o i capichiave nei muri), sottoposto a un campo d'induzione magnetica, dissipa una certa quantità di potenza in funzione della sua resistività  $e$ , quindi, delle sua geometria. Lo strumento è costituito da una sonda generatrice del campo e da una centralina che misura la potenza dissipata dall'oggetto metallico per effetto dell'induzione magnetica indotta dalla sonda. Mediante conversioni automatiche, lo strumento è in grado di fornire in tempo reale la sezione dei metalli rilevati. (AD)

**Prove scissometriche (*vane test*)** Tecnica d'indagine che consente di determinare il valore di coesione in un terreno coesivo saturo (ad esempio argilloso) mediante lo studio della resistenza al taglio del fondo di un foro a cui è applicata una sollecitazione torsionale impressa da una particolare paletta (*vane*). La prova consiste nell'infiggere nel terreno la paletta dotata di quattro lame ortogonali e nel misurare il valore dello sforzo di torsione necessario per portare a rottura il terreno facendo ruotare il dispositivo. Tale rotazione prosegue per alcuni giri fino al completo rimaneggiamento del terreno, misurando la resistenza al taglio residua dopo grandi deformazioni. Nella normativa ASTM D 2573 vengono riportate le prescrizioni per una corretta esecuzione della prova. (AD)

**Pulitura a ultrasuoni** Tecnica che si serve di una sorgente meccanica in grado di emettere onde sonore di frequenza superiore al *range* dell'udibile. Un elemento metallico vibrante collocato su un flessibile trasmette le onde al materiale attraverso un velo d'acqua steso sulla superficie. Gli ultrasuoni producono sollecitazioni di compressione e decompressione in grado di agire efficacemente su depositi e concrezioni che avvolgono la superficie da trattare. La tecnica è molto precisa, ma richiede l'impiego di una manodopera altamente qualificata. (LC)

**Pulitura enzimatica** Tecnica recente che agisce efficacemente in presenza di sostanze organiche e biodeteriogeni come i licheni. Il procedimento si basa sulla capacità degli enzimi di inibire lo sviluppo del microrganismo o, se utilizzati successivamente ad altri processi di pulitura, di rimuoverne i residui. L'attività degli enzimi (proteine in grado di ridurre l'energia di attivazione dei processi chimici) è fortemente condizionata dai

fattori ambientali (luce, temperatura, ph, umidità), particolarità che ne limita le possibilità di applicazione. (LC)

**Pulitura jos** Tecnica di pulitura meccanica nella quale, attraverso la creazione di un vortice di tipo elicoidale, l'abrasivo giunge all'impatto con la superficie secondo traiettorie tangenziali, garantendo così un'azione delicata, graduabile e selettiva. Utilizza una pressione d'esercizio molto bassa (0,1-1 bar) e un'ampia gamma d'inerti, organici (come gusci di noce, noccioli di pesca, pula di riso ecc.) o inorganici (carbonato di calcio, polvere di vetro ecc), con granulometria fra i 5 ed i 300 µm e durezza compresa fra 1 e 4 della scala *Mohs*. Il sistema può utilizzare, se opportuno, una modesta quantità di acqua (da 1 a 30 l/h a seconda del diametro dell'ugello impiegato) miscelata all'aria compressa. (LC)

**Pulitura laser** La tecnica utilizza l'elevata quantità d'energia che un raggio laser è in grado di veicolare sugli strati superficiali della materia. Il raggio, emesso a impulsi di durata differente (da pochi nanosecondi ad alcune decine di microsecondi) e posizionato sulle frequenze dell'infrarosso, è generato da un apposito macchinario (contenente sorgenti laser diverse) e condotto da una fibra ottica a un emettitore facilmente orientabile. Con un impulso di alcuni microsecondi si attiva il cosiddetto "effetto fototermico", che porta istantaneamente la temperatura a valori altissimi (4-5.000 °C) nel punto colpito, determinando la vaporizzazione della materia e la conseguente rimozione stratigrafica per pochi micron di superficie. Con impulsi di pochi nanosecondi, il processo di ablazione avviene, invece, grazie all'effetto fotomeccanico, dovuto alle onde meccaniche cariche di energia che investono lo strato esterno della materia polverizzandolo rapidamente. In questo caso è però molto più elevato il rischio di provocare danni irreversibili alla materia, che può essere incisa da indesiderate "picchiettature". Il laser è teoricamente in grado di garantire, con una bassa invasività, un completo controllo e una massima selettività della pulitura. (LC)

**Radar e georadar** Consente l'individuazione di vuoti e soluzioni di continuità nelle murature grazie alla propagazione di onde elettromagnetiche, variabile in base alle proprietà elettriche (costante dielettrica e conducibilità elettrica) dei materiali; l'alta capacità riflettente dell'acqua, che ostacola la penetrazione delle onde, permette, ad esempio, d'individuare sacche di umidità. Sulle superfici verticali, l'analisi delle riflessioni di onde elettromagnetiche trasmesse ad alta frequenza consente di localizzare soluzioni di continuità dovute a lesioni o alla presenza di tamponature, mentre sul terreno permette d'individuare fondazioni e murature ricoperte, reperti archeologici e vuoti (come le cisterne). L'esecuzione di questa procedura può avvenire con il metodo *down-hole*, che impiega un'antenna rice-trasmittente all'interno di un foro cilindrico, o con il *cross-hole*, che indaga la porzione di terreno compresa fra due fori diversi, nei quali vengono rispettivamente inseriti un'antenna trasmittente e una ricevente. (AD)

**Radiografia** Tecnica fotografica basata sull'uso dei raggi x (raggi Rontgen); la radiazione elettromagnetica è in parte assorbita e in parte riflessa dagli elementi attraversati e la diversa risposta fornita consente in tal modo di guardare all'interno di un corpo. La capacità di penetrazione dei raggi dipende dalla loro lunghezza d'onda, mentre l'intensità dell'assorbimento varia con la densità del materiale: materiali più assorbenti producono immagini più chiare. La radiografia può essere ad esempio utilizzata per verificare la presenza di elementi in cemento armato nascosti nelle strutture (murature, colonne pilastri). (FL)

**Resine scambiatrici di ioni** Le resine a scambio ionico (di tipo anionico o cationico) sono costituite da una matrice polimerica a granulometria sottile (inferiore a 100 *mesh*) che ingloba gruppi funzionali acidi o basici capaci di acquisire o rilasciare ioni. Gli impacchi, impastati con acqua e applicati a contatto con la superficie da pulire, attivano uno scambio fra gli ioni labili della resina e gli ioni (negativi o anioni, positivi o cationi) dello strato da eliminare. Le resine di tipo cationico sono molto efficaci nell'eliminazione delle incrostazioni di origine calcarea; quelle di tipo anionico vengono prevalentemente utilizzate per l'eliminazione dei prodotti nati per solfatazione (gesso). Sono prodotti piuttosto costosi, ma la loro azione lenta li rende facilmente modulabili e appropriati per superfici di particolare pregio. (LC)

**Riflettografia infrarossa a colori** Tecnica d'indagine prevalentemente utilizzata per i dipinti, che vengono illuminati con una sorgente di radiazione nel vicino infrarosso (banda dello spettro elettromagnetico che va dall'estremo visibile rosso fino a una lunghezza d'onda di circa 2,5  $\mu\text{m}$ ), costituita generalmente da lampade alogene a incandescenza; un sistema di rilevazione registra la radiazione riflessa dell'oggetto, eliminando con appositi filtri la radiazione visibile retrodiffusa. Tale lettura consente d'individuare le fasi di elaborazione dell'opera, i pentimenti, l'impiego di particolari tecniche e pigmenti, l'eventuale presenza di disegni preparatori, i precedenti interventi di restauro. I segni al di sotto della superficie pittorica sono però visibili all'infrarosso solo se i materiali e il film pittorico risultano trasparenti alle sue lunghezze d'onda. La riflettografia restituisce anche immagini "in falso colore", tali da permettere d'individuare pigmenti indistinguibili nel visibile ma diversi nella banda spettrale nell'infrarosso poiché chimicamente diversi. L'indagine può essere ripresa con macchine fotografiche, telecamere digitali o scanner per riflettografia IR, utilizzando comunque sempre una sorgente apposita (lampade a incandescenza) in grado d'illuminare uniformemente la superficie esaminata con luce prevalentemente diffusa. (SR)

**Sabbatura, microsabbatura e idrosabbatura** Le tecniche di pulitura meccanica che fanno uso di abrasivi proiettati a pressione contro la superficie da trattare possono sfruttare come vettore sia l'aria che l'acqua. I parametri in gioco sono la pressione di esercizio (variabile da 1 a 200 atm), la durezza dell'abrasivo utilizzato (sulla scala *Mohs*), il diametro (da 20 *mesh* a 120 *mesh*) e la forma dei granuli dell'abrasivo, la distanza fra gli ugelli e la superficie, nonché il tempo di applicazione. I trattamenti più violenti, capaci di coprire superfici molto ampie nella giornata di lavoro e pertanto poco costosi, possono danneggiare gravemente le superfici, specialmente se costituite da materiali teneri. La microsabbatura avviene con pressioni inferiori alle 3 atm, abrasivi a grana fine (attorno a 100 *mesh*) e di durezza paragonabile a quella del materiale da trattare (molto spesso s'impiegano polveri della stessa pietra) o di poco superiore. L'idrosabbatura utilizza come fluido-vettore l'acqua, limitando in tal modo la produzione di polveri (e i rischi per gli operatori) e riducendo considerevolmente gli effetti negativi legati al calore disperso dall'abrasione. (LC)

**Scanner laser** Strumento di rilievo che consente di acquisire digitalmente oggetti tridimensionali sotto forma di nuvole di punti, ottenendo una descrizione geometrica discreta. La densità della nuvola è proporzionale alla risoluzione impostata e alla precisione dello strumento, che varia con la tecnologia adoperata: lo scanner laser triangolare lavora con continue operazioni di intersezione in avanti e sulla base di due punti noti al suo interno, individua la posizione di un terzo punto, sulla superficie dell'oggetto, tramite la misura delle distanze e degli angoli; l'apparecchio a tempo di volo

impiega una sorgente di luce pulsata di cui viene misurato il tempo di andata e ritorno dalla superficie degli oggetti; infine, quello a ritardo di fase (o “celerimetrico”) si basa sul cambiamento indotto nella radiazione luminosa dall’incidenza con la superficie da rilevare. (FL)

**Spettrometria, spettroscopia, spettrofotometria** La spettroscopia è lo studio e la misura di uno spettro, cioè di una radiazione luminosa o elettromagnetica. Lo strumento che permette di misurare uno spettro viene chiamato spettrometro, spettrografo o spettrofotometro; in particolare, quest’ultimo termine si riferisce a uno strumento per la misura dello spettro elettromagnetico. La spettrofotometria (o spettroscopia in riflettanza) è una tecnica analitica qualitativa e quantitativa che, mediante lo spettrofotometro, permette il riconoscimento e la quantizzazione di una sostanza in base al suo spettro di assorbimento della luce. La radiazione a cui viene sottoposto il materiale può essere visibile, ultravioletta (UV) o infrarossa (cfr. *Spettroscopia infrarossa*). (CB)

**Spettrometria di massa** Indagine qualitativa e quantitativa di metalli e leghe metalliche, basata sulla lettura del frazionamento subito dai rapporti isotopici degli elementi naturali a causa di processi chimici e fisici. Gli atomi degli elementi vengono ionizzati, accelerati e fatti passare, in ambiente vuoto, attraverso le espansioni polari di un elettromagnete, in modo che ogni isotopo, subendo deflessioni diverse in base alla massa, segua una direzione differente dagli altri. La tecnica si basa sulla misurazione dell’intensità degli isotopi che, usciti dal magnete, incidono in regioni separate nello spazio. Con un rivelatore è così possibile leggere l’andamento – detto “spettro di massa” – del numero di ioni al variare della loro posizione d’impatto. Attraverso tale tecnica, effettuabile su campioni opportunamente lavorati, è possibile condurre anche analisi qualitative di alcune sostanze organiche solitamente usate in campo artistico, come leganti, adesivi ecc. (MDM)

**Spettrometria di massa ultrasensibile (AMS)** Quando la sensibilità della misura di rapporti isotopici è molto elevata e non misurabile tramite la spettrometria di massa convenzionale, è possibile ricorrere a un metodo più sofisticato, detto “spettrometria di massa ultrasensibile”, che consente un notevole ampliamento del campo d’indagine. Tale tecnica analitica, nota anche come spettrometria di massa con acceleratore (AMS), permette una misurazione ultrasensibile dell’abbondanza di isotopi rari, generalmente radionuclidi a vita media lunga, sia primordiali, sia cosmogenici. Questo tipo di spettrometria trova la sua applicazione più nota nella tecnica di datazione radiocarbonica, tramite la misurazione del rapporto isotopico fra gli isotopi  $^{14}$  e  $^{12}$  del carbonio, e può essere condotta su campioni anche molto piccoli. (MDM)

**Spettroscopia infrarossa (FTIR)** Analisi ottica, di tipo qualitativo e semiquantitativo, basata sul fenomeno fisico della risonanza; si effettua su campioni di materiali solidi per identificarne le sostanze contenute, organiche e inorganiche. Una radiazione infrarossa contenente una serie continua di frequenze, trasmessa attraverso un materiale, perde energia nelle cosiddette “bande di assorbimento”, ossia negli intervalli delle frequenze capaci di far vibrare determinati gruppi di atomi intercettati. In base a tale principio, la tecnica prevede il passaggio della radiazione infrarossa attraverso campioni di materiali in polvere, eventualmente mescolati, se troppo piccoli, con polveri di sostanze non assorbenti nei confronti di tale radiazione; successivamente, l’analisi tramite spettroscopio – il cui modello più aggiornato, al quale si fa riferimento, è contraddistinto dalla sigla FTIR – consente di separare le diverse frequenze e di misurare la loro intensità. Le bande di assorbimento che si evidenziano nello “spettro FTIR” devono essere confrontate con quelle di riferimento per identificare le sostanze contenute

nel provino. La compresenza nello stesso campione di sostanze organiche e inorganiche (frequente nei materiali da costruzione) rende l'identificazione più difficile. L'analisi FTIR può essere condotta anche misurando la perdita di energia della radiazione infrarossa riflessa da un materiale in corrispondenza delle sue bande di assorbimento; tale modalità non necessita il prelievo di campioni, non è distruttiva, ma risulta anche meno precisa, a causa della ridotta capacità di assorbimento selettivo da parte dei gruppi di atomi. Il metodo basato sulla lettura per riflessione può peraltro avvalersi d'una strumentazione portatile, particolarmente utile nelle analisi di dipinti murali.

(MDM)

**Spettroscopia raman** Come la spettroscopia FTIR per riflessione, sfrutta la capacità delle radiazioni infrarosse di rivelare le sostanze presenti in un determinato materiale anche senza estrarne campioni. In questo caso, però, le radiazioni infrarosse osservate sono emesse per dispersione e non per riflessione da gruppi di atomi colpiti da raggi laser. Il sistema, non distruttivo, presenta il vantaggio di essere applicabile su superfici assai ridotte, ampie anche un solo micron, e può avvalersi di strumentazioni portatili. Risulta particolarmente utile per l'analisi del degrado superficiale dei materiali. (MDM)

**Tecniche di resa fotografica multispettrale** Le pellicole sensibili ai raggi infrarossi (IR, radiazioni termiche con lunghezza d'onda fra 0,7 e 1 micrometro) spontaneamente emessi dai corpi permettono di restituire l'"immagine termica" dell'oggetto, fornendo informazioni su materiali, stato di conservazione, presenza di vegetazione non ancora visibile in superficie, stato fessurativo. Dati simili sono forniti anche dalla fotografia per fluorescenza ultravioletta, in cui l'oggetto, sollecitato con radiazioni elettromagnetiche ultraviolette, produce emissioni per fluorescenza nel campo del visibile: l'emissione dipende dal contributo degli strati più esterni dell'opera e contribuisce a chiarirne le caratteristiche. Si tratta di metodi particolarmente usati per l'esame di manufatti pittorici con l'"indagine riflettografica": la parziale trasparenza alla radiazione IR rende visibili particolari nascosti dallo strato pittorico, come disegni preparatori ed eventuali pentimenti. (FL)

**Termografia** Consente il rilievo delle radiazioni emesse dalle strutture all'interno del campo dell'infrarosso e si basa sul principio fisico che tutti i corpi aventi una temperatura superiore allo zero assoluto emettono energia in funzione della temperatura superficiale, a sua volta dipendente dalla conducibilità termica e dal calore specifico del materiale. L'indagine si avvale di una camera a infrarossi che rileva le radiazioni termiche emesse sotto forma di onde elettromagnetiche e le trasforma in segnali elettrici, a loro volta convertiti in immagini. Il segnale viene successivamente elaborato dall'unità di rivelazione, che restituisce il termogramma, ovvero una mappa grafica delle temperature resa in tonalità di grigio in cui è possibile differenziare le aree con la stessa temperatura, utilizzando la funzione isoterma, dalla quale si può passare a una rappresentazione convenzionale a colori. Le apparecchiature utilizzate per l'indagine termografica sono solitamente collegate a sistemi di registrazione e di riproduzione fotografica delle immagini che consentono di seguire l'evoluzione nel tempo del campo termico. In alcuni casi non è possibile far affidamento sull'emissione di un corpo soggetto solo a irraggiamento naturale ("termografia passiva") e si rende necessario massimizzare il flusso termico facendo ricorso a sistemi di sollecitazione termica (stufe o convettori; "termografia attiva"). L'immagine termografica evidenzia le eterogeneità esistenti nella distribuzione termica superficiale di una struttura in relazione al tipo di materiale, alla presenza di vuoti e di umidità; il campo di applicazione della tecnica è

pertanto molto vasto e può riguardare la diagnostica per i problemi da umidità e da dissesti statici o la conoscenza delle caratteristiche materiche e costruttive nascoste di una parete (materiali e componenti edilizi, vuoti, vani tamponati, stratigrafia muraria di paramenti intonacati ecc.). (BM)

**Termoluminescenza (TL)** Tecnica di datazione assoluta che si basa sulla proprietà di quarzi e feldspati contenuti nei laterizi d'incamerare energia in seguito all'irraggiamento naturale: portando il materiale a una temperatura di qualche centinaio di gradi, questa energia ha la possibilità di liberarsi sotto forma di luce; la sua misurazione consente l'individuazione piuttosto precisa del periodo in cui il laterizio è stato prodotto. (FL)

**Tomografia x** Analogamente alla TAC (tomografia assiale computerizzata) utilizzata in campo medico, la tomografia è una tecnica radiografica che consiste nell'irraggiamento d'un corpo con raggi x di diametro minimo emessi perpendicolarmente al suo asse di rotazione. Nel restauro è utilizzata per le radiografie di oggetti tridimensionali. I dati ottenuti dalle radiografie effettuate da angolature diverse sono poi rielaborati da specifici software che restituiscono graficamente un'immagine tridimensionale dell'oggetto, evidenziandone la geometria interna ed eventuali intrusioni o diversità di materiali. (MDM)

**Tricromia in falso colore** Tecnica d'indagine non invasiva particolarmente utile a evidenziare eventuali ridipinture su superfici policrome. Il metodo, che rientra nel gruppo delle "spettroscopie d'immagine" (basate sull'elaborazione di acquisizioni multispettrali nelle lunghezze d'onda del visibile e delle bande IR e UV), impiega due componenti del visibile e una dell'infrarosso (per cui è nota anche come "infrarosso falso colore") per restituire un'immagine tricromatica del campione analizzato, attraverso la quale è possibile localizzare e riconoscere i materiali in esso contenuti. Le complesse riprese fotografiche su pellicola, tradizionalmente impiegate per la tricromia in falso colore, sono state ormai definitivamente rimpiazzate da tecniche di acquisizione digitale, di uso più facile ma responsabili, se non accuratamente applicate, di errori di valutazione che rendono tale procedura non molto affidabile in rapporto, soprattutto, al riconoscimento di pigmenti pittorici non sensibilmente differenziati. (MDM)

**Ultravioletto riflesso** Si tratta d'una tecnica spettroscopica introdotta per risolvere il problema del difficile discernimento di alcuni pigmenti pittorici tramite la tricromia in falso colore. L'ultravioletto riflesso, che rientra nell'ambito delle cosiddette "tecniche fotografiche speciali", basate sulla conversione in immagini fotografiche di fenomeni ottici provocati da radiazioni ultraviolette o infrarosse, sfrutta la capacità dei corpi di riflettere le radiazioni UV in modo differenziato a seconda delle sostanze di cui è composto. L'immagine ottenuta con le radiazioni UV riflesse, fissata su pellicola o tramite tecniche digitali, e due componenti della stessa immagine riprodotta con luce visibile, vengono poi rielaborate e ricomposte in una tricromia distinta da un buon grado di selettività. (MDM)



# Riferimenti bibliografici

- A Guide to the Archival Care of Architectural Records. 19th-20th Centuries* (2000), International Council on Archives, Section on Architectural Records, Paris.
- ACCARDO G. (1998a), *Controllo microclimatico e misura delle variazioni dello stato di conservazione*, in Marabelli, Pandolfi, Prisco, Spampinato (1998), pp. 105-23.
- ID. (1998b), *La Carta del Rischio e il sisma: per un piano di prevenzione nazionale*, in *Gli interventi sul Patrimonio Monumentale ed Artistico dopo il sisma nell'Umbria e nelle Marche*, Atti del Seminario (Roma, 22-23 giugno 1998), Accademia Nazionale dei Lincei, Roma.
- ID. (2000), *La schedatura conservativa: esperienze dell'ICR in relazione alla Carta del Rischio*, Atti del primo seminario nazionale sulla catalogazione (Roma, 24-26 novembre 1999), ICCD, Roma, pp. 34-45.
- ID. (2002), *Modelli digitali 3D per la Scultura*, in "Bollettino ICR", 5, pp. 82-98.
- ID. (2004), *Sullo stato di conservazione*, in "Bollettino ICR", 8-9, pp. 4-22.
- ACCARDO G. et al. (1992), *Monitoraggio ambientale: analisi e tecniche strumentali di intervento sul territorio*, in 3<sup>a</sup> Conferenza internazionale sulle prove non distruttive, metodi microanalitici e indagini ambientali per lo studio e la conservazione delle opere d'arte (Viterbo, 4-8 ottobre 1992), BetaGamma, Viterbo, vol. 2, pp. 863-79.
- ACCARDO G. et al. (2003), *Risk Map: a Project to Aid Decision-Making in the Protection, Preservation and Conservation of Italian Cultural Heritage*, in J. H. Townsend et al., *Conservation Science 2002*, Atti del convegno (Edinburgh, May 22-24, 2002), Archetype Publications, London, pp. 44-9.
- ACCARDO G., CACACE C. (2003), *Indagine microclimatica: diagnosi e risanamento*, in Bianchi (2003), pp. 203-20.
- ACCARDO G., CACACE C., RINALDI R. (1986), *Ipotesi fisiche per la conservazione degli ambienti ipogei*, in Biscontin (1986), pp. 655-71.
- IDD. (1987), *Misura degli scambi termici ed igrometrici tra materiale tufaceo ed aria nel caso di ambienti ipogei*, in Bureca, Laurenzi Tabasso, Palandri (1987), pp. 101-8.
- IDD. (1988), *La tomba dei rilievi in Cerveteri: applicazione della metodologia microclimatica*, in *Etruria meridionale. Conoscenza, conservazione, fruizione*, Atti del convegno (Viterbo, 29/30 novembre-1<sup>o</sup> dicembre 1985), Quasar, Roma, pp. 131-6.
- IDD. (2005), *Il Sistema Informativo Territoriale della carta del Rischio*, in "Arkos", VI, 10, pp. 43-52.
- ACCARDO G., CORDARO M. (1978), *Criteri per la memorizzazione di dati riguardanti lo stato di conservazione di alcune classi di beni culturali*, in *First International Conference on Automatic Processing of Art History Data and Documents* (Pisa, 4-7 settembre 1978), Scuola Normale Superiore di Pisa, Pisa, pp. 1-11.

- ACCARDO G., GIANI E., RINALDI R., SECCARONI C. (1996), *Indagine microclimatica ambientale*, in Testa (1996), pp. 401-5.
- ACCARDO G., VIGLIANO G. (1989), *Strumenti e materiali del restauro: metodi di analisi, misura e controllo*, Kappa, Roma.
- ADAM J. P. (1984), *L'arte di costruire presso i romani: materiali e tecniche*, Longanesi, Milano.
- ADAMO F. et al. (1999), *Interventi di restauro sulle superfici in laterizio*, in Sperandio, Zander (1999), pp. 80-4.
- AGHEMO C. et al. (1992), *L'umidità ascendente nelle murature. Proposta di protocolli per la caratterizzazione igrometrica di una parete e per il collaudo di un intervento di risanamento*, in "Recuperare", XI, 2, pp. 130-1.
- AGHEMO C., ALFANO G. (1992), *L'umidità ascendente nelle murature. Tecniche di intervento*, in "Recuperare l'edilizia", XI, 2, pp. 124-9.
- AGHEMO C., CIRILLO E., D'AMBROSIO F. R., ALFANO G. (1991), *La misura dell'umidità nelle pareti degli edifici*, in "Recuperare", X, 7, pp. 580-3.
- AGHEMO C., CIRILLO E., FATO I., FILIPPI M. (1991), *L'umidità nelle murature. Una metodologia di indagine*, in "Recuperare", X, 7, pp. 574-9.
- AGHEMO C., DUTTO M. G., FILIPPI M., TINIVELLA R. (1995), *Verifica delle condizioni ambientali nel Museo Egizio di Torino*, in Conferenza nazionale sulle prove non distruttive. Monitoraggio, diagnostica, 8° Congresso nazionale dell'AIPND (Torino, 17-19 ottobre 1995), s.n.t., pp. 746-56.
- AGOSTI G., ANGELOTTO D., TOMMASELLO B. (2004), *Il restauro di manufatti in vetro e cristallo di rocca*, in "OPD restauro", 16, pp. 122-30.
- ALBINI R., MASTROPASQUA P., ZIZOLA C. (2003), *Dalla "scoperta" degli affreschi al restauro degli anni Venti*, in Tamanti (2003a), pp. 209-27.
- ALESSANDRINI G., FABBRI B. (a cura di) (2000), *Laterizi e terrecotte architettoniche: la conoscenza per la conservazione*, Atti della IV giornata di archeometria della ceramica (Milano, 21 marzo 2000), University Press, Bologna.
- ALESSANDRINI G., PASETTI A. (1995), *Elenco ragionato delle raccomandazioni NORMAL (al 31.12.94)*, in "TeMa", 3, pp. 37-47.
- IDD. (2004), *L'elenco ragionato delle norme UNI-NORMAL*, in "Arkos", 5, 6, pp. 66-70.
- ALESSANDRINI G., PASETTI A., SANSONETTI A. (2000), *I graffiti e le superfici architettoniche: problematiche conservative*, in "Arkos", 1, 1, pp. 32-41.
- ALFANO G., D'AMBROSIO F. R., RICCIO G. (1999), *Diagnosi sull'umidità. Valutazione quantitativa*, in "TeMa", 2, pp. 8-14.
- ALMESBERGER D., RIZZO A., RADIVO G., RIZZO M. (2006), *Palazzo di Diocleziano a Spalato. Diagnosi dello stato di conservazione del Peristilio e primi interventi di restauro*, in "Recupero e conservazione", 67, pp. 48-51.
- ALVA A. (1983), *Rilevamento e diagnosi del quadro fessurativo*, in Ballandi et al. (1983), pp. 203-6.
- AMBROSI A., TATASEO M. (2003), *Analisi agli elementi finiti: torre di Nocera Umbra*, in Rocchi (2003).
- AMICO A., AMICO G. (1999), *Progettare con la sicurezza antincendio senza barriere architettoniche: raccordo ed armonizzazione della normativa antincendio con la normativa per l'eliminazione delle barriere architettoniche*, Flaccovio, Palermo.
- AMOROSO G. G. (1995), *Il restauro della pietra nell'architettura monumentale*, Flaccovio, Palermo.
- ID. (1996), *Materiali e tecniche nel restauro*, Flaccovio, Palermo.

- AMOROSO G. G., CAMAITI M. (1997), *Scienza dei materiali e restauro*, Alinea, Firenze.
- ANDALORO M. (a cura di) (2007), *La pittura medievale a Roma 312-1431: atlante. Percorsi visivi*, Jaca Book, Milano.
- APPOLONIA L. *et al.* (2000), *Sistemi innovativi di indagine e diagnosi assistita*, in “Ricerca e futuro”, Bollettino del CNR, 18 (<http://www.area.fi.cnr.it/r&f/n18/index.htm>).
- ARAMINI F., CAPOGROSSI F. (1988), *Messa a punto di nuove tecniche di luce radente e loro impiego nella fotogrammetria di dipinti murali*, in 2ª Conferenza internazionale sulle prove non distruttive, metodi microanalitici e indagini ambientali per lo studio e la conservazione delle opere d'arte, Atti del convegno (Perugia, 17-20 aprile 1988), Preprints ICR-AIPND, Roma, sez. 1/5.
- ARCANGELI S., AUGELLI L. (1987), *Le patologie da condensa*, EdilStampa, Roma.
- ARCOLAO C. (2008), *La diagnosi nel restauro architettonico. Tecniche, procedure, controlli*, Marsilio, Venezia.
- ARENGHI A. (1998), *Gli apparecchi elevatori. Criteri di scelta, nuove proposte e stato della normativa*, in “TeMa”, 1, pp. 69-78.
- ID. (a cura di) (2000), *Edifici storici, turismo, utenza ampliata. La gestione dell'accessibilità nelle città d'arte*, New Press, Como.
- ARENGHI A. (2001), *Sicurezza e accessibilità: difficoltà e soluzioni*, in “TeMa”, 1, pp. 44-7.
- ARGAN G. C. (1976), *Il governo dei beni culturali*, in G. Spadolini, *Beni culturali. Diario interventi leggi*, Vallecchi, Firenze, pp. 195-200.
- ARIAS C. (1988), *L'archeomagnetismo*, in Francovich, Parenti (1988), pp. 455-75.
- ARNOLD D. *et al.* (eds.) (2006), VAST 2006. *The 37th CIPA International Workshop Dedicated on E-Documentation and Standardisation in Cultural Heritage* (Nicosia, Cyprus, October 30-November 4, 2006), Archaeolingua, Budapest.
- ART 05 (2005), *8th International Conference on Non-Destructive Investigations and Microanalysis for the Diagnostics and Conservation of the Cultural and Environmental Heritage*, Atti del convegno (Lecce, 15-19 maggio 2005), AIPND, Italian Society for Non-Destructive Testing Monitoring Diagnostics, Brescia.
- ARTINI E. (1941), *Le rocce: concetti e nozioni di petrografia*, Hoepli, Milano.
- ASTI P. (1994), *Barriere contro l'umidità*, BE-MA, Milano.
- ID. (1996), *Umidità e condense. La prevenzione, la diagnosi, il risanamento*, BE-MA, Milano.
- AVETA A. (1996), *Tecniche per il restauro. Problemi di umidità negli edifici monumentali*, Arte Tipografica, Napoli.
- AVETA A., MONACO L. M. (2007), *Consolidamento delle strutture in legno. Diagnostica e interventi conservativi*, Edizioni Scientifiche Italiane, Napoli.
- AVORIO A., BORRI A., CORRADI M. (2002), *Ricerche per la ricostruzione: iniziative di carattere tecnico e scientifico a supporto della ricostruzione*, DEI, Roma.
- BADY J.-P. (1985), *Les monuments historiques en France*, PUF, Paris.
- BAGLIONI P. *et al.* (2005), *Salt Crystallization in Porous Materials: PhysicoChemical Aspects and Effects of Anti-Scaling Additives*, in “Science and technology for cultural heritage”, 13, pp. 27-36.
- BALDI P. (1986), *Storia del monumento e metodologia del progetto di conservazione*, in Biscontin (1986), pp. 633-50.
- BALDI P., CARLUCCI R., RICCI M. (1998), *Il modello iconometrico: la documentazione nella Carta del Rischio*, in Marabelli, Pandolfi, Prisco, Spampinato (1998), pp. 65-71.

- BALDI P., CORDARO M., MELUCCO VACCARO A. (1987), *Per una Carta del Rischio del patrimonio culturale: obiettivi, metodi e un piano pilota*, in A. Clementi, F. Perego (a cura di), *Memorabilia: il futuro della memoria*, Laterza, Roma-Bari, pp. 371-88.
- BALDINI U. (1978-81), *Teoria del restauro e unità di metodologia*, 2 voll., Nardini, Firenze.
- BALLANDI R. *et al.* (1983), *Recupero edilizio 2: rilevamento e diagnostica*, Ente Fiere Bologna, Bologna.
- BANCHIERI D., DE MARCHI M., ARMOCIDA G. (a cura di) (2003), *L'edilizia storica lombarda: materiali e tecniche, metodi di rilevamento e di intervento*, Atti delle giornate di studio (Ispra, 17 maggio 1997, 26-28 novembre 1998), Nicolini, Gavirate.
- BARACCHINI C. *et al.* (2005), *SICAR: un sistema per la documentazione georeferenziata in rete*, in G. Biscontin, G. Driussi (a cura di), *Sulle pitture murali: riflessione, conoscenze, interventi*, Atti del convegno di studi (Bressanone, 12-15 luglio 2005), Arcadia Ricerche, Venezia, pp. 735-47.
- IDD. (2007), *Verso un sistema unico di riferimento per la documentazione di restauro: storia e sviluppi di SICAR w/b*, in Clini, Lancioni, Quattrini (2007), pp. 84-9.
- BARBET A., MINIERO P. (1999), *La villa San Marco a Stabia*, Edizioni Centre Jean Bérard, Napoli.
- BARTOLI G., GUIDI G. F. (1999), *Un impiego della termovisione e dell'indagine microclimatica per il rilievo dell'umidità*, in "TeMa", 3, pp. pp. 47-57.
- BARTOLOMUCCI C. (2003), *La documentazione su base informatica per la conoscenza e la conservazione programmata del patrimonio culturale*, in "Materiali e Strutture", n.s., 1, 2, pp. 163-74.
- EAD. (2004a), *Santa Maria di Collemaggio: interpretazione critica e problemi di conservazione*, Palombi, Roma.
- EAD. (2004b), *Una proposta di "cartella clinica" per la conoscenza e la conservazione programmata del patrimonio culturale*, in "Arkos", v, 5, pp. 59-65.
- EAD. (2005), *I sistemi informativi per il monitoraggio e la conservazione programmata: alcune applicazioni di una "cartella clinica" per i monumenti*, in P. Croveri, O. Chiantore (a cura di), *Patrimonio monumentale. Monitoraggio e conservazione programmata*, Atti del workshop (La Venaria Reale, Torino, 25 novembre 2005), Nardini, Firenze, pp. 100-5.
- EAD. (2008), *Nuovi metodi per la documentazione*, in Carbonara (2008), vol. 2, pp. 105-40.
- BASILE G. (1989), *Che cos'è il restauro*, Editori Riuniti, Roma.
- ID. (2001), *Giotto. Cappella degli Scrovegni. Restauro. Il progetto*, ICR, Quaderno 0, Roma.
- ID. (a cura di) (2003), *Il restauro della Cappella degli Scrovegni. Indagini, progetto, risultati*, Skira, Milano.
- BECONCINI M. L., BENNATI S., SALVATOR W. (2001), *Structural Characterisation of a Medieval Bell Tower: First Historical, Experimental and Numerical Investigations*, in Lourenço, Roca (2001), pp. 431-44.
- BEER P., PALLOTTA G. (2003), *Ponte medioevale – Apecchio, Pesaro*, in Rocchi (2003).
- BELL T., BEVAN A. (eds.) (2004), *A Survey of GIS Standards for the English Archaeological Record Community*, A Report on Behalf of English Heritage, Oxford ArchDigital, Oxford.
- BELICINI A., LAMANNA L. F. (1998), *L'umidità nelle murature*, Carocci, Roma.

- BELLINI A. (a cura di) (1986), *Tecniche della conservazione*, Franco Angeli, Milano (2<sup>a</sup> ed. 1990).
- BELLINI A. *et al.* (2005), *Che cos'è il restauro?*, da un'idea di B. P. Torsello, Marsilio, Venezia.
- BELLUCCI R. *et al.* (1985), *Le indagini conoscitive e il restauro: alcune considerazioni*, in "Kermes", II, 6, pp. 3-9.
- BELTRAME D. (1995), *L'intervento di pulitura e la "grande dimensione" delle superfici dell'architettura*, in Biscontin, Driussi (1995), pp. 33-41.
- BENAZZI G. (1985), *I dipinti murali e l'edicola marmorea del Tempio sul Clitunno*, Ediart, Todi.
- BENEDETTI S. (2000), *Il restauro della facciata di San Pietro tra comprensione storico-critica e progetto*, in "Kermes", XIII, 37, pp. 11-9.
- BENNICI A., CACACE C., GERARDI G. (1992), *Tecniche informatiche per l'elaborazione dei dati microclimatici acquisiti con centralina automatica. Esempio di applicazione nel caso del Duomo di Todi*, in 3<sup>a</sup> Conferenza internazionale sulle prove non distruttive, metodi micronalitici e indagini ambientali per lo studio e la conservazione delle opere d'arte (Viterbo, 4-8 ottobre 1992), BetaGamma, Viterbo, pp. 898-912.
- BENSO S., OMET C. (1995), *Documentazione multimediale per la conservazione ed il restauro di beni culturali*, in "Materiali e strutture", 5, pp. 54-74.
- BEOLCHINI G. C., MILANO L., ANTONACCI E. (2007), *Definizione di modelli per l'analisi strutturale degli edifici in muratura. Analisi dei meccanismi di collasso in edifici esistenti in muratura*, in *Repertorio dei meccanismi di danno, delle tecniche di intervento e dei relativi costi negli edifici in muratura*, ITC-CNR, L'Aquila, pp. 115-232.
- BERNABEI M. (2005), *Ricerche dendrocronologiche in Trentino: la chiesa dei SS. Ippolito e Cassiano a Castello Tesino* (TN), in Tampone (2005), pp. 24-8.
- BERNARDI A., BECHERINI F. (2003), *Microclima e conservazione delle vetrate antiche nell'ambito del progetto europeo "Vidrio"*, in "Bollettino geofisico", XXVI, 1-2, pp. 123-32.
- BERTAGNIN M. (1999), *Architetture di terra in Italia: tipologie, tecnologie e culture costruttive*, Edicom, Monfalcone.
- BERTI M. (2001), *Adeguamento tecnologico e normative*, in Carbonara (2001a), vol. 1, pp. 285-349.
- BERTI P., GENTILE M. (1990), *Santa Maria Novella 1990: il restauro e le nuove architetture della stazione*, Alinari, Firenze.
- BESANA D. (2005), *Tecniche innovative di indagine tra conoscenza e progettazione*, in Calvi *et al.* (2005), pp. 53-108.
- BETTATI M. (2005), *Così la fossa scenica è sicura e protetta*, in "Antincendio", 1, pp. 31-3.
- BEVILACQUA F., CAUZZI D., GIOVANNUCCI VIGI B., PINNA D. (2004), *La Porta dei Mesi della Cattedrale di Ferrara. Il restauro delle formelle lapidee conservate nel Museo della Cattedrale*, in "Kermes", XVII, 55, pp. 25-38.
- BEVILACQUA M., GORI SASSOLI M. (a cura di) (2006), *La Roma di Piranesi: la città del Settecento nelle Grandi Vedute*, Artemide, Roma.
- BIANCHI A. (a cura di) (2003), *Il restauro della Cripta di Anagni*, ICR-Artemide, Roma.
- BIANCHI P. (1994), *Umidità nei fabbricati*, BE-MA, Milano.
- BIANCHINI P. *et al.* (1999), *Sette secoli di manutenzione programmata per la conservazione dei paramenti lapidei della Cattedrale di Santa Maria del Fiore in Firenze*, in Biscontin, Driussi (1999), pp. 231-42.

- BINDA L. (a cura di) (2005), *Dalla conoscenza e dalla caratterizzazione dei materiali e degli elementi dell'edilizia storica in muratura ai provvedimenti compatibili di consolidamento*, Atti del workshop (Milano, 16-17 dicembre 2004), DIS, Politecnico di Milano, Milano.
- BINDA L. et al. (2001), *Procedure per la determinazione del danno strutturale negli edifici storici a struttura muraria: tecniche di indagine per la diagnosi ed il controllo dell'intervento*, in S. Pesenti (a cura di), *Il progetto di conservazione: linee metodologiche per le analisi preliminari, l'intervento, il controllo di efficacia*, Alinea, Firenze, pp. 93-198.
- IDD. (2004), *Indagini sulla consistenza dell'edilizia storica, sul danno pregresso e sull'efficacia degli interventi svolta su quattro centri campione in Umbria*, in *L'ingegneria sismica in Italia*, Atti dell'XI congresso nazionale (Genova, 25-29 gennaio 2004), Anidis, Genova, pp. 1-12.
- IDD. (2005), *Investigation on Structures and Materials of the Castle of Avio (Trento, Italy)*, in C. A. Brebbia, A. Torpiano (eds.), *Structural Studies, Repairs and Maintenance of Heritage Architecture IX*, Wit Press, Southampton, pp. 599-610.
- IDD. (2007), *Diagnostic Strategies for the Repair Intervention on Churches Damaged by Earthquakes: the Toscolano Maderno Monumental Complex*, in C. A. Brebbia (ed.), *Structural Studies, Repairs and Maintenance of Heritage Architecture X*, Wit Press, Southampton, pp. 215-26.
- BINDA L., BARONIO G., PALMA M., PENAZZI D. (2000), *Indagini sulle caratteristiche delle strutture, dei materiali di edifici in muratura di pietra e mattoni, per la diagnosi ed il controllo delle tecniche di consolidamento. Località di Roccanolfi di Preci e Montesanto di Sellano: redazione di schede per il rilievo topologico e dei danni sismici agli edifici*, in V. De Vecchis (a cura di), *Patrimonio Storico Architettonico e Terremoto. Diagnosi e interventi di recupero*, Edigrafital, Teramo, pp. 85-130.
- BINDA L., SAISI A. (s.d.), *Il ruolo delle indagini nella diagnostica strutturale*, Dipartimento di Ingegneria Strutturale Politecnico, Milano (<http://www.beniculturali.polimi.it/documenti/uo>).
- EADD. (2000), *Cattedrale di Noto e indagini soniche per la diagnosi di strutture murarie danneggiate e riparate*, in "L'Edilizia", 9-10, pp. 28-41.
- EADD. (2001), *Non Destructive Testing Applied to Historic Buildings: the Case of Some Sicilian Churches*, in Lourenço, Roca (2001), pp. 29-46.
- EADD. (2002), *Il miglioramento strutturale e la compatibilità tra i materiali e la struttura originaria*, in "L'Edilizia", 2, pp. 34-45.
- BINDA L., SAISI A., TIRABOSCHI C. (2000), *Cattedrale di Noto. Le indagini soniche per la diagnosi di strutture murarie danneggiate e riparate*, in "L'Edilizia", 9-10, pp. 28-41.
- BINDA L., TIRABOSCHI C. (2000), *La prova con i martinetti piatti. Una tecnica leggermente distruttiva per la diagnosi di strutture in muratura di pietra e mattoni*, in "L'Edilizia", 3-4, pp. 46-56.
- BISCONTIN G. (a cura di) (1985), *L'intonaco: storia, cultura e tecnologia*, Atti del convegno di studi (Bressanone, 24-27 giugno 1985), Libreria Progetto, Padova.
- ID. (a cura di) (1986), *Manutenzione e conservazione del costruito fra tradizione e innovazione*, Atti del convegno di studi (Bressanone, 24-27 giugno 1986), Libreria Progetto, Padova.
- ID. (1988), *La risalita capillare dell'acqua nelle murature: note per la diagnosi e il risanamento*, in Gelsomino (1988), pp. 61-7.

- BISCONTIN G., DRIUSSI G. (a cura di) (1995), *La pulitura delle superfici dell'architettura*, Atti del convegno di studi (Bressanone, 3-6 luglio 1995), Libreria Progetto, Padova.
- IDD. (a cura di) (1998), *Progettare i restauri: orientamenti e metodi, indagini e materiali*, Atti del convegno di studi (Bressanone, 30 giugno-3 luglio 1998), Arcadia ricerche, Venezia.
- IDD. (a cura di) (1999), *Ripensare alla manutenzione: ricerche, progettazione, materiali, tecniche per la cura del costruito*, Atti del convegno di studi (Bressanone, 29 giugno-2 luglio 1999), Arcadia ricerche, Venezia.
- IDD. (a cura di) (2000), *La prova del tempo: verifiche degli interventi per la conservazione del costruito*, Atti del convegno di studi (Bressanone, 27-30 giugno 2000), Arcadia ricerche, Venezia.
- IDD. (a cura di) (2002), *I mosaici: cultura, tecnologia, conservazione*, Atti del convegno di studi (Bressanone, 2-5 luglio 2002), Arcadia ricerche, Venezia.
- IDD. (a cura di) (2003), *La reversibilità nel restauro: riflessioni, esperienze, percorsi di ricerca*, Atti del convegno di studi (Bressanone, 1-4 luglio 2003), Arcadia ricerche, Venezia.
- IDD. (a cura di) (2005), *Sulle pitture murali. Riflessioni, conoscenze, interventi*, Atti del convegno di studi (Bressanone, 12-15 luglio 2005), Arcadia ricerche, Venezia.
- IDD. (a cura di) (2006), *Pavimentazioni storiche: uso e conservazione*, Atti del convegno di studi (Bressanone, 11-14 luglio 2006), Arcadia ricerche, Venezia.
- BISCONTIN G., GRAZIANO L. (a cura di) (1993), *Conservation of Architectural Surfaces. Stones and Wall Covering*, Atti del convegno (Venezia, 12-14 marzo 1992), Il Cardo, Venezia.
- BISCONTIN G., MIETTO D. (a cura di) (1991), *Le pietre nell'architettura: struttura e superfici*, Atti del convegno (Bressanone, 25-28 giugno 1991), Libreria Progetto, Padova.
- IDD. (a cura di) (1992), *Le superfici dell'architettura: il cotto. Caratterizzazione e trattamenti*, Atti del convegno (Bressanone, 30 giugno-3 luglio 1992), Libreria Progetto, Padova.
- BISCONTIN G., VASSALLO E., VOLPIN S. (a cura di) (1988), *Le scienze, le istituzioni, gli operatori alla soglia degli anni '90*, Atti del convegno di studi (Bressanone, 21-24 giugno 1988), Libreria Progetto, Padova.
- BISCONTIN G., VOLPIN S. (a cura di) (1990), *Superfici dell'architettura: le finiture*, Atti del convegno (Bressanone, 26-29 giugno 1990), Libreria Progetto, Padova.
- BISCONTIN G., ZENDRI E., SCHIONATO A. (1991), *Protettivi acrilici nella conservazione della pietra*, in "Materiali e Strutture", 1, 3, pp. 95-110.
- BLASI C., COÏSSON E. (2006), *La Fabbrica del Duomo di Parma. Stabilità, rilievi e modifiche nel tempo*, Fondazione Cariparma, Parma.
- BLASI C., ROSSI P. P. (1988), *Indagini sulle strutture murarie del tempio detto di Romolo nel Foro romano: prove non distruttive con martinetti piatti e analisi numeriche*, in 2ª Conferenza internazionale sulle prove non distruttive, metodi microanalitici e indagini ambientali per lo studio e la conservazione delle opere d'arte, Atti del convegno (Perugia, 17-20 aprile 1988), Preprints ICR-AIPND, Roma, pp. 4.1-4.15.
- BOATO A., MANNONI T. (1993), *Materiali e tecniche nella Genova portuale: i calcestruzzi alla pozzolana dall'età moderna alla rivoluzione industriale*, in G. Biscontin, D. Mietto, *Calcestruzzi antichi e moderni: storia, cultura e tecnologia*, Atti del convegno di studi (Bressanone, 6-9 luglio 1993), Libreria Progetto, Padova, pp. 12-20.

- BOITO C. (1893), *Questioni pratiche di Belle Arti*, Hoepli, Milano.
- BOMBELLI F. (a cura di) (2002), *La sicurezza negli edifici: l'integrazione dei sistemi di safety e di security. Antintrusione, antieffrazione, elettricità, antincendio, gestione e manutenzione degli impianti*, Il Sole 24 ore, Milano.
- BON VALSASSINA C. (2006), *Restauro made in Italy*, Mondadori, Milano.
- BONACINA C., ROMAGNONI P., BAGGIO P., MARIOTTI M. (1998), *Gestione del microclima interno della Cappella degli Scrovegni*, in *La Cappella degli Scrovegni* (1998), pp. 41-3.
- BONAMINI G., NOFERI M. (2002), *Fessurazioni. Tipi, meccanismi di formazione, diagnostica, influenza sulla resistenza*, in "L'Edilizia", 4, pp. 42-8.
- BONAMINI G., NOFERI M., TOGNI M. (2000), *Problemi di classificazione delle travi in legno in opera. Come considerare correttamente l'alburno (degradato o meno) ai fini della verifica strutturale*, in "L'Edilizia", 7-8, pp. 44-7.
- BONARRIGO A. (1993), *Monitoraggio delle vibrazioni strutturali del timpano superiore della facciata della Basilica di San Marco*, in "Quaderni della Soprintendenza ai beni artistici e storici di Venezia", 17, pp. 115-27.
- BONATI A., QUAGLIA M. (2004), *Rinforzi strutturali in fibra di carbonio a matrice polimerica. Sperimentazione sul comportamento in temperatura*, in "L'Edilizia", 1, pp. 30-7.
- BONELLI M. et al. (2002), *La Cappella Serra nella Chiesa del Sacro Cuore già S. Giacomo a Roma: problemi di interazione murale – supporto – ambiente*, in Biscontin, Driussi (2005), pp. 197-206.
- BONELLI R. (1995), *Scritti sul restauro e sulla critica architettonica*, Scuola di specializzazione per lo studio ed il restauro dei monumenti, Università degli Studi di Roma "La Sapienza", Bonsignorì, Roma.
- BORRELLI E., LAURENZI TABASSO M. (1994), *Valutazione e documentazione dell'intervento di pulitura sugli affreschi di Michelangelo nella Cappella Sistina*, in K. Weil-Garris Brandt (a cura di), *Michelangelo: la Cappella Sistina*, Atti del convegno internazionale di studi (Roma, marzo 1990), Istituto Geografico De Agostini, Novara, vol. 3, pp. 289-95, 423-6.
- BORRI A. (2003a), *Sull'utilizzo dei materiali compositi (FRP) per gli interventi di rinforzo e di miglioramento sismico delle costruzioni in muratura*, in "Bollettino ingegneri", 4, pp. 3-19.
- ID. (2003b), *Palazzo dei Priori, Assisi, Perugia*, in Rocchi (2003), pp. C70-C77.
- BORRI A., CORRADI M. (2000), *Consolidamento di strutture lignee in materiale composito: risultati di una sperimentazione*, in "L'Edilizia", 5-6, pp. 62-7.
- BORRI A., CORRADI M., SPERANZINI E. (2001), *Travi lignee rinforzate con barre o con tessuti in fibra di carbonio*, in "L'Edilizia", 8-9, pp. 48-55.
- BORRI A., CORRADI M., TAMPONE G., TRIMBOLDI A. (2002), *Sull'impiego di alcuni materiali innovativi nel consolidamento delle strutture lignee*, in "Bollettino ingegneri", 8-9, pp. 3-7.
- BORRI A., CORRADI M., VIGNOLI A. (2000), *Tecniche di rinforzo delle murature. Risultati di sperimentazioni su edifici interessati dal sisma umbro-marchigiano del 1997-98*, in "L'Edilizia", 5-6, pp. 38-46.
- BORRI A., GIACOMIN G., GIANNANTONI A. (2005), *Sperimentazioni ed applicazioni dei pultrusi per il rinforzo di elementi lignei*, in *Conservation of Historic Wooden Structures*, Atti della conferenza (Firenze, 22-27 febbraio 2005), UNESCO, Firenze, vol. 2, pp. 63-9.



- BORRI A., GIANNANTONI A. (2003), *Palazzo Elmi-Pandolfi, Foligno (Perugia)*, in Rocchi (2003), pp. C78-C93.
- BORRI A., TEREZI G., BARTOLONI M., CALITERNA P. (1999), *Travi lignee: tecniche di rinforzo basate su disposizioni diversificate di nastri in CFRP*, in "L'Edilizia", 7-8, pp. 55-62.
- BORSELLA S. (1998a), *Cronistoria degli interventi operati per la salvaguardia della Cappella degli Scrovegni nella seconda metà del '900*, in *La Cappella degli Scrovegni* (1998), pp. 4-8.
- EAD. (1998b), *Raccolta e smaltimento delle acque meteoriche e di superficie prossime al monumento*, in *La Cappella degli Scrovegni* (1998), pp. 9-15.
- BOSIA D. (2005), *Risanamento igienico edilizio. Effetti dell'umidità, degrado dei materiali da costruzione, criteri di scelta degli interventi, tecniche di risanamento*, EPC Libri, Roma.
- BOSSOUTROT A. (1991), *Analyse et restauration des enduits: les travaux antérieurs. Présentation de la bibliographie et documentation actuelle*, in C. Sapin (éd.), *Enduits et mortiers. Archéologie médiévale et moderne*, CNRS, Paris, pp. 13-24.
- BOTTONI M. (a cura di) (1990), *Sulla cupola del Brunelleschi, sugli affreschi, sul restauro: studi di informatizzazione per il bene culturale*, Vecchiarelli, Manziana (Roma).
- BOUCHERON P., BROISE H., THEBERT Y. (éds.) (2000), *La brique antique et médiévale: production et commercialisation d'un matériau*, Actes du colloque international (Saint-Cloud, 16-18 novembre 1995), École française de Rome, Rome.
- BRACCIALI S. (a cura di) (2006), *Restaurare Leon Battista Alberti. Il caso di Palazzo Rucellai*, Libreria Editrice Fiorentina, Firenze.
- BRANCATO F. S. (1986), *Patologia di un degrado: "flos tectorii"*, in "Recuperare", 5, 22, pp. 134-7.
- BRANDI C. (1963a), *Restauro (Concetto del restauro; Problemi generali)*, in *Enciclopedia Universale dell'Arte*, Istituto per la collaborazione culturale, Venezia-Roma, vol. XI, coll. 323-32.
- ID. (1963b), *Teoria del restauro*, Edizioni di storia e letteratura, Roma (2ª ed., Einaudi, Torino 1977).
- ID. (1976), *Restauro e indagini scientifiche*, in *Applicazione dei metodi nucleari nel campo delle opere d'arte*, Atti del convegno internazionale (Roma-Venezia, 24-29 maggio 1973), Accademia Nazionale dei Lincei, Roma, pp. 675-82; ora in Id. (1994a), pp. 43-53.
- ID. (1994a), *Il restauro. Teoria e pratica*, a cura di M. Cordaro, Editori Riuniti, Roma.
- ID. (1994b), *Restauro e indagini scientifiche*, in Id. (1994a), pp. 43-60 (1ª ed. in *Applicazione dei metodi nucleari nel campo delle opere d'arte*, Roma 1976, pp. 675-82).
- BRASIOLI T., MURZI M. (2006), *Schedatura speditiva per analisi di vulnerabilità architettonica: un'esperienza recente*, in "Geomedìa", X, 1, pp. 14-8.
- BRENTARI G., PIAZZA M. (2004), *Analisi di strutture antiche. Un esempio di metodologia. Le capriate di copertura del Teatro Sociale di Trento*, in "Recupero e conservazione", 60, pp. 62-7.
- BRICCOLI BATH S., ROVERO L. (2005), *Costruzioni in terra cruda*, in S. Mecca, B. Biondi (eds.), *1st International Research Seminar on Architectural Heritage and Sustainable Development of Small and Medium Cities in South Mediterranean Regions: Results and Strategies of Research and Cooperation*, ETS, Pisa, pp. 619-29.
- BRIZZI M. et al. (2006), *Planning a Conservation Project: the Information System of the*

- "*Insula Orientalis 1*" at *Herculaneum*, in *CIPA 2005*, XX International Symposium (26th September-1st October 2005), ICOMOS, Torino.
- BROGGI S., LENTI L., MORANDI G. (1995), *Oggetti d'arte: ceramica, vetro, argento e altri materiali*, Istituto Geografico De Agostini, Novara.
- BROUWET J. (1991), *Les méthodes d'analyse des mortiers appliquées à Autun*, in C. Sapin (éd.), *Enduits et mortiers. Archéologie médiévale et moderne*, CNRS, Paris, pp. 79-91.
- PROVELLI E. et al. (1998), *Chiese in Umbria. Il rilievo del danno e della vulnerabilità sismica*, in "Recupero e conservazione", 21, pp. 24-35.
- BRUNO M. et al. (1999), *Determinazione dei marmi dell'Arco di Costantino su base archeometrica*, in Pensabene, Panella (1999), pp. 171-84.
- BRUNO M., GORGONI C., PALLANTE P. (1999), *I marmi dell'Arco di Settimio Severo: composizione strutturale, volumetria e analisi archeometriche*, in Pensabene, Panella (1999), pp. 157-70.
- BRUSCHI A. (1984), *Problemi e metodi di ricerca storico-critica sull'architettura*, in G. Spagnesi (a cura di), *Storia e restauro dell'architettura: aggiornamenti e prospettive*, Istituto della Enciclopedia Italiana, Roma, pp. 15-34.
- BUGINI R., FOLLI L. (a cura di) (2005), *Lezioni di petrografia applicata*, in [http://www.icvbc.cnr.it/didattica/petrografia/lezioni\\_petrografia.htm](http://www.icvbc.cnr.it/didattica/petrografia/lezioni_petrografia.htm).
- BUI C., MILAZZO M. (1988), *L'impiego della spettrofotometria nell'infrarosso vicino per la determinazione di concentrazione d'acqua in tracce*, in 2<sup>a</sup> Conferenza internazionale sulle prove non distruttive, metodi microanalitici e indagini ambientali per lo studio e la conservazione delle opere d'arte, Atti del convegno (Perugia, 17-20 aprile 1988), Preprints ICR-AIPND, s.l., vol. 2, sez. III, art. 5.
- BUI H. D. et al. (1988), *Les possibilités offertes par la microgravimétrie dans l'auscultation de monuments antiques*, in P. G. Marinos, G. C. Koukis (eds.), *The Engineering Geology of Ancient Works, Monuments and Historical Sites: Preservation and Protection*, Proceedings of an International Symposium (Athens, September 19-23, 1988), A. A. Balkema, Rotterdam, pp. 1063-9.
- BURECA A., LAURENZI TABASSO M., PALANDRI G. (a cura di) (1987), *Materiali lapidei. Problemi relativi allo studio del degrado e della conservazione*, in "Bollettino d'Arte", supplemento al n. 41.
- BURECA A., PALANDRI G. (a cura di) (1986), *Intonaci, colore e coloriture nell'edilizia storica*, Atti del convegno (Roma, 25-27 ottobre 1984), in "Bollettino d'Arte", supplemento ai nn. 35-36.
- BUSSI L. (1996), *La fase diagnostica*, in Id., *L'analisi della sicurezza degli edifici storici*, de Lettera, Milano, pp. 157-79.
- BUZZANCA G. (2000), *Selected Bibliography on Computer-Aided Documentation*, in Schmid (2000), CD allegato al testo.
- ID. (2003), *Esigenza di standard nella documentazione grafica digitalizzata*, in "Materiali e Strutture", n.s., 1, 1, pp. 69-81.
- ID. (2005), *Il ruolo degli standard nella documentazione grafica su base vettoriale*, in "Arkos", VI, 11, pp. 69-73.
- BUZZANCA G., CAPANNA F. (2000), *La documentazione grafica assistita da elaboratori: uno strumento per il restauro*, in "Bollettino ICR", n.s., 1, pp. 4-13.
- BUZZANCA G., PIQUÉ F. (2002), *La documentazione digitale da Michelangelo a Cimabue*, in "Bollettino ICR", n.s., 5, pp. 7-17.
- CACACE C. (2006), *GIS: uno strumento per la rappresentazione organizzata delle informa-*

- zioni sui processi di restauro e conservazione, in "Bollettino ICR", n.s., 13, pp. 19-26.
- CACACE C., GONZALES LOPEZ M. J. (1992), *Monitoraggio ambientale della Capilla Real in Granada. Attuazione di un intervento programmato nei beni culturali spagnoli*, in 3<sup>a</sup> Conferenza internazionale sulle prove non distruttive, metodi microanalitici e indagini ambientali per lo studio e la conservazione delle opere d'arte, Atti del convegno (Viterbo, 4 ottobre 1992), BetaGamma, Viterbo, vol. 2, sez. III, pp. 917-33.
- CACALY S. (1989), *Les banques de donnés de la recherche en archéologie: aperçu historique et problématique*, in "Brises", XV, 2, pp. 147-53.
- CAGNANA A. (2000), *Archeologia dei materiali da costruzione*, Società Archeologica Padana, Mantova.
- CAILLAUD F., GOTTARELLI A. (1997), *Microscavo archeologico, restauro e documentazione computerizzata: l'esempio di una sepoltura ad incinerazione villanoviana*, Atti della III giornata di studio (Faenza, 23 settembre 1995), in "Faenza", LXXXIII, 1-3, tavv. XI-XIII, pp. 64-73.
- CALLOCCCHIA G. (1991), *Manuale di norme e procedure antincendio*, Carocci, Roma.
- ID. (2005), *Come difendere dal fuoco gli edifici pregevoli per arte e storia*, in "Antincendio", 4, pp. 25-31.
- CALÒ S., CAVAGNINI G., LIVA G. L. (1999), *Cartella clinica: un sistema informativo per progettare la manutenzione del costruito*, in Biscontin, Driussi (1999), pp. 292-4.
- CALVANI A. (1995), *Guida alla conservazione dei beni culturali*, UTET, Torino.
- CALVI G. et al. (2005), *Diagnostica per il progetto di conservazione: metodi, tecniche ed esempi*, ETS, Pisa.
- CAMPANELLA C. (1994), *Umidità: un aggiornamento sulle tecniche*, in "Ἀνάγκη", 5, pp. 94-5.
- Campanili e torri: le strumentazioni di controllo, il monitoraggio, la diagnostica* (1991), Cluva, Venezia.
- CAMUFFO D. (1998), *Microclimate for Cultural Heritage* (Developments in Atmospheric Service, 23), Elsevier, Amsterdam-Lausanne-New York-Oxford-Shannon-Singapore-Tokyo.
- ID. (2001), *Indoor Microclimatology: the Scrovegni Chapel (Giotto's Frescoes) as a Case Study*, in S. Colinart, M. Menu (éds.), *La matière picturale: fresque et peinture murale*, Cycle de cours intensif sur les "Sciences et Matériaux du Patrimoine Culturel" (Ravello, 15-20 settembre 1997), Edipuglia, Bari, pp. 123-32.
- CAMUFFO D. et al. (2007), *Church Heating and Preservation of the Cultural Heritage: a Practical Guide to the Pros and Cons of Various Heating Systems. Il riscaldamento nelle chiese e la conservazione dei beni culturali: guida all'analisi dei pro e dei contro dei vari sistemi di riscaldamento*, Electa Mondadori, Milano.
- CAMUFFO D., BERNARDI A. (1991), *Analisi microclimatica al Cenacolo vinciano*, in "Bollettino geofisico", XIV, 3, volume speciale.
- CAMUFFO D., PAGAN E. (2003), *Problemi microclimatici creati dal riscaldamento delle chiese*, in "Bollettino geofisico", XXVI, 1-2, pp. 133-44.
- CAMUFFO D., STURARO G., VALENTINO A. (1999), *Il clima di Pisa in relazione al degrado dei monumenti in pietra*, in "Bollettino geofisico", XXII, 1-2, pp. 5-25.
- ID. (2002), *Il riscaldamento della Torre di Pisa per effetto della radiazione solare*, in "Bollettino geofisico", XXV, 1-2, pp. 7-25.
- CAMUFFO D., STURARO G., VALENTINO A., CAMUFFO M. (1998), *Il microclima e la conser-*

- vazione delle opere d'arte nelle chiese: il caso di Colle Santa Lucia nelle Dolomiti, in "Bollettino geofisico", XXI, 1-2, pp. 13-29.
- CANDELA M., GUERRISI G., GALLOCCHIO E. (2006), *Problematiche della pavimentazione musiva del Corridoio della Grande Caccia della Villa del Casale di Piazza Armerina*, in Biscontin, Driussi (2006), pp. 639-47.
- CANEVA C., PAMPALLONA A., TESTA G. (1988), *Le indagini termografiche e termoigrometriche per il rilievo dell'umidità degli affreschi. Caso della "Resurrezione della Carne" di Luca Signorelli*, in 2ª Conferenza internazionale sulle prove non distruttive, metodi microanalitici e indagini ambientali per lo studio e la conservazione delle opere d'arte, Atti del convegno (Perugia, 17-20 aprile 1988), Preprints ICR-AIPND, s.l., vol. 1, sez. I, art. 16.
- CANEVA G., NUGARI M. P., PINNA D., SALVADORI O. (1996), *Il controllo del degrado biologico*, Nardini, Firenze.
- CANEVA G., NUGARI M. P., SALVADORI O. (1994), *La biologia nel restauro*, Nardini, Firenze.
- EADD. (a cura di) (2005), *Biodeterioramento e conservazione*, Nardini, Firenze.
- CANTISANI E. et al. (2000), *L'arenaria utilizzata nell'abbazia di S. Maria di Vezzolano (AT): verifica dei trattamenti di consolidamento*, in Biscontin, Driussi (2000), pp. 151-62.
- CANTISANI E., FRATINI F., RESCIC S. (2002), *La pietra serena: impiego a Firenze. Composizione e durabilità*, in "Arkos", 3, 4, pp. 26-31.
- CAPPELLETTI F., PERON F., PORCIANI L., ROMAGNONI P. (2003), *Problematiche relative al controllo del microclima nelle vetrine museali*, in "Bollettino geofisico", XXVI, 1-2, pp. 93-108.
- CAPPONI G. (1998), *La Carta del Rischio del patrimonio culturale italiano: indagini, tematiche e cartografia*, in "Ricerche di Storia dell'Arte", 65, pp. 13-6.
- EAD. (2003), *Chiesa di San Pietro in Valle. Intervento di consolidamento della muratura del fronte nord*, in Tamanti (2003a), pp. 287-93.
- EAD. (2004), *L'invecchiamento e il degrado*, in Carbonara (2004), pp. 433-53.
- CAPPONI G. et al. (2001), *Un'applicazione nella mappatura dei materiali costitutivi e dello stato di degrado della Torre di Pisa*, in *Usi e consumi dell'informazione geografica*, Atti della 3ª conferenza MondoGis (Roma, 23-25 maggio 2001), MondoGis, Roma, pp. 229-36.
- CARBONARA G. (1976), *La reintegrazione dell'immagine*, Bulzoni, Roma.
- ID. (1989), *Sul cosiddetto Palazzo di Bonifacio VIII in Anagni. Dalla storia al restauro, con un'indagine di A. Bianchi: Studi per il consolidamento*, in "Palladio", II, 3, pp. 19-60.
- ID. (1990a), *Il restauro fra conservazione e ripristino. Note sui più attuali orientamenti di metodo*, in "Palladio", n.s., II, 6, pp. 43-76.
- ID. (1990b), *Il trattamento delle superfici come problema generale di restauro*, in Biscontin, Driussi (1990), pp. 667-78.
- ID. (a cura di) (1996a), *Trattato di restauro architettonico*, UTET, Torino, 4 voll.
- ID. (1996b), *Teoria e metodi del restauro*, in Id. (1996a), vol. 1, pp. 1-107.
- ID. (1997), *Avvicinamento al restauro: teoria, storia, monumenti*, Liguori, Napoli.
- ID. (2000), *Le tendenze attuali del restauro in architettura*, in *Enciclopedia Universale dell'Arte, Secondo supplemento, Nuove conoscenze e prospettive del mondo dell'arte*, Istituto Geografico De Agostini, Novara, pp. 533-41, tavv. 156-157.

- ID. (a cura di) (2001a), *Trattato di restauro architettonico. Restauro architettonico e impianti*, UTET, Torino, 4 voll.
- ID. (2001b), *Restauro, architettura e impianti: introduzione al tema*, in Id. (2001a), vol. 1, pp. 1-18.
- ID. (a cura di) (2004), *Atlante del restauro*, UTET, Torino, 2 voll.
- ID. (2005), *Che cos'è il restauro?*, in Bellini et al. (2005), pp. 25-8.
- ID. (a cura di) (2007), *Trattato di restauro architettonico. Primo Aggiornamento. Grandi temi di restauro*, UTET, Torino.
- ID. (a cura di) (2008), *Trattato di restauro architettonico. Secondo Aggiornamento. Grandi temi di restauro*, UTET, Torino.
- CARDILLI L. (a cura di) (1990), *Coloriture e trattamenti degli edifici storici a Roma*, Atti del convegno (Roma, 27-28 maggio 1987), Comune di Roma, Assessorato alla Cultura, Editrice IN ASA, Roma.
- CARR E. (1961), *What Is History?*, Penguin, London (trad. it. *Sei lezioni sulla storia*, Einaudi, Torino 1966).
- CARRIA F. (2004), *La conservazione delle facciate: materiali e tecniche per il recupero*, Tecniche nuove, Milano.
- Carta del Rischio del patrimonio culturale* (1996), Ministero BB.CC.AA., Ufficio Centrale per i Beni Archeologici, Artistici e Storici-ICR, ATI Maris, Roma, 4 voll.
- CARTAPATI E. (2004), *Presidi antisismici*, in Carbonara (2004), pp. 648-50.
- CASARIN F. et al. (2007), *Evaluation of the Structural Behaviour of Historic Masonry Buildings by Using a Sonic Pulse Velocity Method*, in C. A. Brebbia (ed.), *Structural Studies, Repairs and Maintenance of Heritage Architecture x*, Wit Press, Southampton, pp. 227-36.
- CASELLI G., MANNUCCI M. (2005), *La copertura monumentale della gipsoteca dell'istituto d'arte di Firenze all'interno delle ex Scuderie reali della pace in Boboli. Storia, indagini sullo stato di conservazione e interventi di restauro*, in *Conservation of Historic Wooden Structures*, Atti della conferenza (Firenze, 22-27 febbraio 2005), UNESCO, Firenze, pp. 242-54.
- CASIELLO S. (a cura di) (2000), *Restauro dalla teoria alla prassi*, Electa Napoli, Napoli.
- EAD. (a cura di) (2005), *La cultura del restauro. Teorie e fondatori*, Marsilio, Venezia.
- EAD. (a cura di) (2008), *Verso una storia del restauro. Dall'età classica al primo Ottocento*, Alinea, Firenze.
- CASTAGNETO F. (1997), *L'analisi termografica per la diagnosi del degrado degli edifici in muratura. Riflessioni sullo stato dell'arte*, in *Conferenza nazionale sulle prove non distruttive. Monitoraggio, diagnostica*, Atti del IX Congresso nazionale dell'AIPND (Padova, 25-27 settembre 1997), AIPND PadovaFiere, s.l., pp. 847-55.
- CASTELLETTI L. (1988), *Dendrocronologia*, in Francovich, Parenti (1988), pp. 421-54.
- CATTANEO M. (1999), *Umidità nelle murature: provenienza e fenomenologia*, in "TeMa", 2, pp. 4-7.
- CAZZATO V. (a cura di) (1989), *Tutela dei giardini storici. Bilanci e prospettive*, Arti Grafiche Nemi, Roma.
- CECCHI R. (2006), *I beni culturali. Testimonianza materiale di civiltà*, Spirali, Milano.
- CECCHINI A., ADAMO F. (2005), *La tomba Bruschi-Falgari di Tarquinia. Dallo strappo al recupero del contesto figurativo perduto*, in "Kermes", XVIII, 57, pp. 65-74.
- CENTAURO G., MORIONDO LENZINI M. (a cura di) (1993), *Piero della Francesca ad Arezzo. Problemi di restauro per la conservazione futura*, Atti del convegno internazionale (Arezzo, 7-10 marzo 1990), Marsilio, Venezia.

- CENTI D., DE SANTIS F. (2005), *Archivi storici: ecco come si progetta un impianto di spegnimento automatico*, in "Antincendio", 2, pp. 81-94.
- CERADINI A., GRILLO F. (1988), *Utilizzo di tecniche non distruttive nello studio di beni monumentali abruzzesi. Indagini sulla Basilica di Santa Maria di Collemaggio a L'Aquila e sulla Chiesa di Santa Maria in Valle Porclaneta a Rosciolo*, in 2<sup>a</sup> Conferenza internazionale sulle prove non distruttive metodi microanalitici e indagini ambientali per lo studio e la conservazione delle opere d'arte, Atti del convegno (Perugia, 17-20 aprile 1988), Preprints ICR-AIPND, Roma, pp. 6.1-6.15.
- CERNUSCHI F., GHIA S., LAMPERTI M. (1997), *Determinazione della diffusività termica di materiali mediante tecniche termografiche e fototermiche*, in Conferenza nazionale sulle prove non distruttive. Monitoraggio, diagnostica, Atti del IX Congresso nazionale dell'AIPND (Padova, 25-27 settembre 1997), AIPND PadovaFiere, s.l., pp. 413-26.
- CERONE M., CROCI G. (2006), *Le grandi cupole del passato. San Pietro*, in "Recupero e conservazione", 72, pp. 22-33.
- CESARI C., GELSOMINO L., MASSA S. (1988), *Umidità: tecniche di analisi e di intervento*, in Gelsomino (1988), pp. 9-41.
- CHERUBINI L. C., PORZIO P. L. (2001), *Il Vittoriano*, in Carbonara (2001a), vol. 3, t. 1, pp. 385-400.
- CHIARADIA V., GIACOMIN G., QUAGLIA F. (2005), *Rinforzo con CRFP di solai e travi in legno di valenza storico-artistica. Villa Litta-Milano*, in Conservation of Historic Wooden Structures, Atti della conferenza (Firenze, 22-27 febbraio 2005), UNESCO, Firenze, pp. 70-6.
- CHIAVARI C. et al. (2000), *Esperimento di datazioni in termoluminescenza nei monumenti della Liguria*, in "Archeologia dell'Architettura", v, pp. 13-6.
- CHIMENTI M. (2003), *Strumenti e metodi in evoluzione per la documentazione informatica dei beni artistici. La proposta Modus Operandi*, in "I Beni Culturali", 3, pp. 26-9.
- CHOAY F. (1992), *L'allégorie du patrimoine*, Editions du Seuil, Paris (trad. it. *L'allegoria del patrimonio*, Officina, Roma 1995).
- CIFANI G., LEMME A., PODESTÀ A. (a cura di) (2005), *Beni monumentali e terremoto. Dall'emergenza alla ricostruzione*, DEI, Roma.
- CIGNI G., CODACCI PISANELLI B. (1987), *Umidità e degrado negli edifici: diagnosi e rimedi*, Kappa, Roma.
- CIMO G., CANDIDO D. (2000), *I materiali lapidei*, s.e., Palermo.
- CINQUEGRANA DE DIVITIS L., PICCIOLI C. (a cura di) (1997), *I materiali dei beni culturali: il vetro*, Atti della giornata di studio (Napoli, 30 settembre 1996), Soprintendenza archeologica di Napoli e Caserta, Ufficio Restauro, in "Noi chimici", 24, 2, pp. 3-22.
- CIPRIANI N., FRATINI F., NEBBIAI M., SARTORI R. (2005), *L'arenaria di Monte Senario: caratteristiche composizionali, tecniche e confronto con la Pietra Serena*, in "Arkos", 6, 9, pp. 37-44.
- CLEMEN P. (1933), *Die deutsche Kunst und die Denkmalpflege*, Deutscher Kunstverlag, Berlin.
- CLINI P., LANCIANI N., QUATTRINI R. (a cura di) (2007), *e-Arcom 07. Sistemi informativi per l'architettura*, Atti del convegno (Ancona, 17-19 maggio 2007), Alinea, Firenze.
- CLOQUET L. (1901-02), *La restauration des monuments anciens*, in "Revue de l'Art chrétien", XLIV, pp. 498-503; XLV, pp. 41-5.

- COCCOLI C., SCALA B. (2006), *Vilminore di Scalve (BG): un piano di conservazione programmata*, in "Ἀνάγκη", n.s., 47, pp. 118-25.
- CODELLO R. (1995), *La pulitura degli intonaci*, in Biscontin, Driussi (1995), pp. 577-88.
- EAD. (1996), *Gli intonaci. Conoscenza e conservazione*, Alinea, Firenze.
- COLLEPARDI M. (1989), *Cause chimiche di degrado dei materiali originali nelle murature degli edifici storici*, in "L'Edilizia", 10, pp. 493-501.
- COLLEPARDI M., COPPOLA L. (1991), *Materiali negli edifici storici: degrado e restauro*, Enco, Treviso.
- COLOMBO C., POLI T., SANSONETTI A. (2005), *Prodotti protettivi per materiali lapidei. Prove fisiche per la valutazione*, in "Recupero e conservazione", 63, pp. 60-1.
- COLOMBO C., REALINI M. (1995), *Il degrado dei laterizi e delle terrecotte ornamentali*, in "TeMa", 4, pp. 23-34.
- COLOMBO C., SANSONETTI A., ALIVERTI L. (2005), *Le malte: composizione, tecnologia e classificazione*, 1. *I leganti e la loro evoluzione storica*, in "Recupero e conservazione", 11, 66, pp. 50-2.
- IDD. (2006a), *Le malte: composizione, tecnologia e classificazione*, 2. *Malte moderne*, in "Recupero e conservazione", 12, 67, pp. 72-5.
- IDD. (2006b), *Le malte: composizione, tecnologia e classificazione*, 3. *I leganti: la calce aerea*, in "Recupero e conservazione", 12, 68, pp. 48-51.
- IDD. (2006c), *Le malte: composizione, tecnologia e classificazione*, 4. *I leganti: la calce idraulica*, in "Recupero e conservazione", 12, 69, pp. 66-9.
- IDD. (2006d), *Le malte: composizione, tecnologia e classificazione*, 5. *L'aggregato*, in "Recupero e conservazione", 12, 70, pp. 82-5.
- COLOMBO P. (2002), *La prova di carico*, in "Recupero e conservazione", 43, pp. 76-7.
- Conservazione del patrimonio culturale. Ricerche interdisciplinari* (1992), Accademia Nazionale dei Lincei, Roma.
- CONTI A. (1996), *Manuale di restauro*, Einaudi, Torino.
- CONTI C., MORONI B. (2006), *Aspetti tecnologici e significato storico-artistico del pavimento in ceramica della chiesa di San Francesco (Deruta, 1524): risultati di uno studio petroarcheometrico*, in Biscontin, Driussi (2006), pp. 525-33.
- CONTI W. (1991), *Un metodo per valutare la perdita di spessore di bassorilievi esposti agli agenti atmosferici*, in "Materiali e strutture", 1, 1, pp. 12-26.
- Convegno dei soprintendenti. Restauro delle opere d'arte. Progettata istituzione di un gabinetto centrale del restauro*, in "Le Arti", 11, 1938, pp. 264-70.
- COOPERATIVA "CONSERVAZIONE BENI CULTURALI" (1992), *The Restoration of the Trevi Fountain. Methodology and Intervention*, in G. Biscontin, *Conservation of Architectural Surfaces: Stones and Wall Covering*, Il Cardo, Venezia, pp. 193-8.
- COPPOLA L. (1996), *Umidità nelle costruzioni: diagnosi e rimedi*, in "Presenza Tecnica", 2, pp. 79-86.
- COPPOLA L., TROLI R. (1996), *Il degrado delle murature causato dai solfati presenti nei laterizi. Analisi di tre casi studio*, in "L'Edilizia", 3-4, pp. 38-47.
- CORBO L. (1983), *Sicurezza antincendio nella ristrutturazione manuale delle tecniche e della normativa vigente*, BE-MA, Milano.
- CORDARO M. (1990), *Per una banca dati informatizzata sui materiali tradizionali in uso nel restauro pittorico*, in Bottoni (1990), pp. 155-79.
- ID. (1991), *Uso e abuso delle indagini scientifiche*, in "Materiali e Strutture", 1, 1, pp. 32-4.

- ID. (1994), *Restauro*, in *Enciclopedia Italiana*, v Appendice, Istituto della Enciclopedia Italiana, Roma, vol. 4, pp. 470-4.
- ID. (1999), *The Conservation and Restoration of the Surface of the Tower. The Computerised Mapping of the Materials Used in Its Construction and Their Deterioration*, Workshop on the Tower of Pisa (Pisa, July 8-9, 1999), Pre-print.
- ID. (2000), *Restauro e tutela. Scritti scelti (1969-1999)*, Annali dell'Associazione Ranuccio Bianchi Bandinelli, Graffiti, Roma.
- CORSO A. (1992), *Tecniche di programmazione e controllo*, in ANIMP (a cura di), *Lezioni di project management: tecniche organizzative, amministrative e legali*, ETAS Libri, Milano.
- COSTANTINO N. (1992), *L'umidità ascendente nelle murature. Gli aspetti progettuali, attuativi, organizzativi dell'intervento*, in "Recuperare", 2, pp. 122-3.
- COZZI M. (1992), *Antonio da Sangallo il Vecchio e l'architettura del '500 in Valdichiana*, Sogep, Genova.
- CRIPPA M. A., SORBO E. (a cura di) (2007), *Liliana Grassi. Il restauro e il recupero creativo della memoria storica*, Scuola di specializzazione per lo studio ed il restauro dei monumenti, Università degli Studi di Roma "La Sapienza", Bonsignori, Roma.
- CROCI G. (2001), *Conservazione e restauro strutturale dei beni architettonici*, UTET, Torino.
- CRUCIANI FABOZZI G. (2004), *Intervento sul monastero di Santa Maria del Lavello presso Calolziocorte (Lecco)*, in Carbonara (2004), vol. 2, pp. 810-8.
- CRUCIANI FABOZZI G. et al. (1998), *Nuovo approccio al progetto diagnostico dell'umidità nelle murature: casi esemplificativi in area lombarda*, in Biscontin, Driussi (1998), pp. 341-52.
- CRUCIANI FABOZZI G., ROSINA E., VALENTINI M. (1999), *Diagnosi sull'umidità: integrazione tra metodo ponderale e termografia*, in "TeMa", 2, pp. 15-23.
- CUOMO DI CAPRIO N. (2007), *Ceramica in archeologia 2: antiche tecniche di lavorazione e moderni metodi di indagine*, L'«Erma» di Bretschneider, Roma.
- CUOMO DI CAPRIO N., MARTINI M., SPINOLO G. (1981), *Analisi di termoluminescenza applicata ai laterizi del Palazzo della Ragione di Milano: esemplificazione del metodo*, in M. Dezzi Bardeschi, C. Sorlini (a cura di), *La conservazione del costruito. I materiali e le tecniche*, Cooperativa Libreria Universitaria del Politecnico, Milano, pp. 63-8.
- D'AMICO S., RUBINO A. (2003), *Un'applicazione di fotogrammetria digitale all'Oratorio dei Filippini in Roma: il Miracolo di Santa Agnese dell'Algardi*, in "Bollettino ICR", 6-7, pp. 26-32.
- D'ASCOLA S. (2005), *SIRCOP: un sistema informativo per la conservazione programmata*, in "Arkos", VI, 9, pp. 8-9.
- D'ELIA M. et al. (2005), *Il sistema informatico di gestione dei dati Akira GIS server*, in S. Settis et al. (a cura di), *La torre restituita*, numero speciale del "Bollettino d'Arte", 3, pp. 419-25.
- D'ELIA M., CAPPONI G. (2005), *Il cantiere di progetto per il restauro della Torre di Pisa*, in S. Settis et al. (a cura di), *La torre restituita*, numero speciale del "Bollettino d'Arte", 3, pp. 461-86.
- D'ELIA M., CAPPONI G., LODOLA S. (2005), *Il rilevamento dello stato di conservazione*, in S. Settis et al. (a cura di), *La torre restituita*, numero speciale del "Bollettino d'Arte", 3, pp. 257-87.
- D'ELIA M., CAPPONI G., SANTAMARIA U., TORRACA G. (2005), *Studi e interventi di avvicini-*



- namento al restauro, in S. Settis *et al.* (a cura di), *La torre restituita*, numero speciale del “Bollettino d’Arte”, 3, pp. 427-58.
- D’ORAZIO M. (1999a), *Gli intonaci e l’umidità: guida ai sistemi per difendersi*, BE-MA, Milano.
- ID. (1999b), *Gli intonaci macroporosi: una sperimentazione*, in “TeMa”, 2, pp. 33-8.
- D’URBANO M. S., PANDOLFI A., PIETRINI A. M. (1998), *Patologie da umidità nelle strutture murarie antiche*, in Marabelli, Pandolfi, Prisco, Spampinato (1998), pp. 327-40.
- DAL MAS M. (1998), *Artifici per una nuova spazialità urbana nella facciata di Santa Maria della Pace*, in C. L. Frommel (a cura di), *Pietro da Cortona*, Atti del convegno internazionale (Roma-Firenze, 12-15 novembre 1997), Electa, Milano, pp. 324-32.
- DAL MAS R. (2004a), *La materia degli antichi edifici: legno*, in Carbonara (2004), vol. 1, pp. 130-56.
- EAD. (2004b), *La materia degli antichi edifici: metalli*, in Carbonara (2004), vol. 1, pp. 107-29.
- EAD. (2004c), *La materia degli antichi edifici: vetro*, in Carbonara (2004), vol. 1, pp. 102-6.
- DALLA NAVE P., QUARESIMA R., SCOCCIA G., VOLPE R. (1999), *L’oratorio di S. Pellegrino a Bominaco: problematiche e redazione di un progetto manutentivo*, in Biscontin, Driussi (1999), pp. 555-64.
- DALLA NEGRA R. (1995), *La cupola del Brunelleschi: il cantiere, le indagini, i rilievi*, in C. Acidini Luchinat, R. Dalla Negra (a cura di), *La cupola di Santa Maria del Fiore: il cantiere di restauro. 1980-1995*, Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato, Roma, pp. 1-45.
- ID. (a cura di) (2004), *La Cupola di Santa Maria del Fiore a Firenze: il rilievo fotografico*, Ministero per i Beni e le Attività Culturali, Soprintendenza per i Beni Architettonici ed il Paesaggio e per il Patrimonio Storico Artistico e Demoetnoantropologico per le Province di Firenze, Pistoia e Prato-Sillabe, Livorno.
- DAVANZO R., MARCHETTI L. (1996), *La costruzione della cappella le varie fasi edilizie e gli interventi attuali*, in Testa (1996), pp. 23-33.
- DE ANGELIS D’OSSAT G. (1971), *Tecniche edilizie in pietra e laterizio*, in *Artigianato e tecnica nella società dell’alto Medioevo occidentale*, Atti della XVIII settimana di studio (Spoleto, 2-8 aprile 1970), Centro italiano di studi sull’alto medioevo, Spoleto, pp. 545-57.
- ID. (1995), *Sul restauro dei monumenti architettonici*, a cura di S. A. Curuni, Scuola di specializzazione per lo studio ed il restauro dei monumenti, Università degli Studi di Roma “La Sapienza”, Bonsignori, Roma.
- DE BLASI L. (2007), *L’inter-disciplinarietà come paradigma della crisi epistemocentrica e filosofica*, in “Educazione e scuola”, <http://www.edscuola.it>, 22 novembre 2007.
- DE MATTEIS G., GIUBILEO C., CALDERONI B., MAZZOLANI F. M. (2005), *Travi in legno di castagno antico. Analisi sperimentale mediante prove di rottura a taglio e flessione*, in “L’Edilizia”, 141, pp. 44-51.
- DE PASQUALE G. *et al.* (2001), *Sistemi radar per introspezione sotterranea ed intramuraria: applicazioni all’Archeologia e ai Beni architettonici*, in “Alta Frequenza – Rivista di Elettronica”, 2, pp. 1-5.
- DE SANTIS F. (2003), *Prove di carico dei solai*, in “Opere”, 2, 8, pp. 1-7.
- DE SANTOLI L. (2001), *Richiami di fisica tecnica ambientale e tecniche di controllo ambientale*, in Carbonara (2001), vol. 1, pp. 409-611.

- DE VITA C. G. (1988a), *Bonifica dell'umidità ascendente: il caso di Villa Giulia*, in "Rassegna dei beni culturali", 4, pp. 55-8.
- ID. (1988b), *Risanamento dall'umidità ascendente del Museo etrusco di Roma*, in Gelmino (1988), pp. 137-42.
- DEL SENNO M., MICHELON G., PIAZZA M. (2002), *Valutazioni di elementi strutturali in legno. Applicabilità di indagini strumentali*, in "L'Edilizia", 4, pp. 24-30.
- DELL'ACQUA M. (2005), *Teatro alla Scala: ciò che è stato, e ciò che sarà*, in "Antincendio", 1, pp. 21-7.
- DELLA TORRE S. (a cura di) (1996), *Storia delle tecniche murarie e tutela del costruito*, Guerini Studio, Milano.
- ID. (1998), *Il progetto di una conservazione senza barriere*, in "TeMa", 1, pp. 19-27.
- ID. (2000), *La Carta del Rischio e la pratica della conservazione*, in "Arkos", 1, 1, pp. 18-21.
- ID. (2002), *Dalla reversibilità alla responsabilità*, in *Reversibilità? Concezione e interpretazioni nel restauro. Memorie del convegno* (Torino, 12-13 aprile 2002), UTET, Torino, pp. 15-26.
- ID. (2003), *Riflessioni sul principio di compatibilità: verso una gestione dell'incompatibilità*, in *Dalla reversibilità alla compatibilità*, Atti del convegno (Conegliano, 13-14 giugno 2003), Nardini, Firenze, pp. 27-32.
- ID. (2004), *L'innovazione di processo nella conservazione del patrimonio architettonico: sperimentazioni su Palazzo Te in Mantova e altri casi studio*, in "Politecnico", VIII, 8, pp. 8-11.
- DEZZI BARDESCHI M. (1991), *Restauro: punto e da capo. Frammenti per una (impossibile) teoria*, Franco Angeli, Milano.
- ID. (2005), *Per una storia del consolidamento chimico-fisico dei materiali*, in M. Dalla Costa, G. Carbonara (a cura di), *Memoria e restauro dell'architettura. Saggi in onore di Salvatore Boscarino*, Franco Angeli, Milano, pp. 116-25.
- DI BATTISTA V., FONTANA C., PINTO M. R. (a cura di) (1995), *Flessibilità e riuso*, Alinea, Firenze.
- DI FILIPPO M., PRISCO G., TORO B. (2001), *Indagini non distruttive sul sottosuolo della casa dei Vettii di Pompei*, in "Bollettino ICR", 2, pp. 68-81.
- DI GIACOMO F. (2002), *L'uso della tecnologia GIS richiede la standardizzazione della documentazione grafica*, in "Bollettino ICR", 5, pp. 51-7.
- DI MARIA G. (2003), *L'Hangar di Augusta: rilievo geometrico, indagini strutturali e geognostiche*, "Recupero e conservazione", 52, pp. 82-5.
- DI MUZIO A. (2006), *Il restauro dei metalli: l'intervento su una fontana in ghisa*, in *Lo stato dell'arte 3*, Atti del III congresso nazionale IGHC (Palermo, 22-24 settembre 2005), Nardini, Firenze, pp. 128-35.
- DI PASQUALE S. (2002), *Brunelleschi: la costruzione della cupola di Santa Maria del Fiore*, Marsilio, Venezia.
- DI TOMMASO A., RUSSO S. (1999), *I profilati strutturali in materiale composito pultruso*, in "L'Edilizia", 1-2, pp. 60-5.
- DJINDJIAN F. (1990), *Nouvelles tendances méthodologiques dans le traitement de l'information en archéologie*, in "Archeologia e calcolatori", 1, pp. 9-13.
- DOCCI M., MAESTRI D. (1994), *Manuale di rilevamento architettonico e urbano*, Laterza, Roma-Bari.
- DOGLIONI F. (1997), *Stratigrafia e restauro: tra conoscenza e conservazione dell'architettura*, LINT, Trieste.

- DOGLIONI F., MAZZOTTI P. (a cura di) (2007), *Codice di pratica per gli interventi di miglioramento sismico nel restauro del patrimonio architettonico. Integrazioni alla luce delle esperienze nella Regione Marche*, Regione Marche, Ancona.
- DOGLIONI F., MORETTI A., PETRINI V. (a cura di) (1994), *Le chiese e il terremoto*, LINT, Trieste.
- DONATI P. (1990), *Legno, pietra e terra: l'arte del costruire*, Giunti, Firenze.
- DVOŘÁK M. (1916), *Katechismus der Denkmalpflege*, Kunsthistorisches Institut der K. K. Zentralkommission für Denkmalpflege, Wien (trad. it. *Catechismo per la tutela dei monumenti*, in "Paragone-Arte", XXII, 1971, 257, pp. 30-63; e in "Italia Nostra", XIV, 96, inserto redazionale).
- EPOSITO D. (2001), *Raccolta di leggi e normative*, in Carbonara (2001a), vol. 3, t. 2, pp. 403-718.
- EAD. (2004), *La materia degli antichi edifici: malte, intonaci, stucchi*, in Carbonara (2004), vol. 1, pp. 75-101.
- FABBROCINO G., MANFREDI G. (2003), *Monitoraggio strutturale e sicurezza degli edifici*, in "Recupero e conservazione", 54, pp. 56-61.
- FABBROCINO G., MANFREDI G., GIANGRECO E. (2001), *In-situ Investigations for Structural Assessment of Temple C in Selinunte (Italy)*, in Lourenço, Roca (2001), pp. 479-88.
- FACCIO P., FORABOSCHI P., SIVIERO E. (1999), *Volte in muratura con rinforzi in FRP*, in "L'Edilizia", 9-10, pp. 44-58.
- FANCELLI P. (1987), *Per un lessico circa le difettosità e gli stati deteriorativi del cotto monumentale*, in G. Biscontin, R. Angeletti (a cura di), *Conoscenze e sviluppi teorici per la conservazione di sistemi costruttivi tradizionali in muratura*, Atti del convegno di studi (Bressanone, 23-26 giugno 1987), Libreria Progetto, Padova, pp. 139-48.
- ID. (1988 [ma 1991]), *Conservazione e scienze fisico-chimiche*, in "Storia Architettura", XI, 1-2, pp. 53-74.
- ID. (1993), *Restauro ed etica*, in "Palladio", n.s., 11, pp. 37-54.
- ID. (1994), *Restauro (Restauro architettonico e urbano)*, in *Enciclopedia Italiana*, v Appendice, Istituto della Enciclopedia Italiana, Roma, vol. 4, pp. 477-8.
- ID. (1998a), *Il restauro dei monumenti*, Nardini, Fiesole.
- ID. (1998b), *Il restauro e la tecnica*, in P. Ventrice (a cura di), *Tecnica e tecnologia nell'architettura dell'Ottocento*, Atti del IV Seminario di Storia delle Scienze e delle tecniche (Venezia, 11-12 novembre 1994), Istituto Veneto di Scienze ed Arti, Venezia, pp. 221-42.
- ID. (2006), *Considerazioni su storia generale, storia dell'architettura, restauro*, in "Materiali e Strutture", n.s., IV, 7-8, pp. 266-85.
- FANTONE C. R., FERRINI P. (2002), *Interventi di restauro e consolidamento del ponte Nomentano a Roma*, in "Costruire in laterizio", 85, pp. 50-5.
- FASOLO V. (1954), *Guida metodica per lo studio della storia dell'architettura*, Edizioni dell'Ateneo, Roma.
- FASSINA V. (1998), *Problemi di umidità nella muratura e protezione della facciata*, in *La Cappella degli Scrovegni* (1998), pp. 26-8.
- ID. (2004), *Il principio del minimo intervento: utopia o realtà?*, in *Il minimo intervento nel restauro*, Atti del convegno (Siena, 18-19 giugno 2004), Nardini, Firenze, pp. 61-7.
- FASSINA V., FAVARO M., NACCARI A. (1998), *Valutazione dell'influenza del trattamento*

- con sostanze idrorepellenti sui mattoni della facciata della Cappella degli Scrovegni, in *La Cappella degli Scrovegni* (1998), pp. 27-34.
- FASSINA V., MOLTENI C. (1994), *Problemi di conservazione connessi all'umidità delle muraure: la diagnostica e le tecnologie conservative applicate al restauro della cripta di S. Marco in Venezia*, in Fassina, Ott, Zezza (1994), pp. 803-13.
- FASSINA V., OTT H., ZEZZA F. (a cura di) (1994), *La conservazione dei monumenti nel bacino del Mediterraneo. Materiali lapidei e monumenti: metodologie per l'analisi del degrado e la conservazione*, Atti del III simposio internazionale (Venezia, 22-25 giugno 1994), Soprintendenza ai Beni Artistici e Storici di Venezia, Venezia.
- Fattori di deterioramento* (1980), Dimos, ICR, Roma.
- FAZIO G., MORA C., PROVINCIALI B. (1986), *Applicazione sperimentale di tecniche conservative in alcuni ambienti della Domus Aurea*, in Biscontin (1986), pp. 707-17.
- FEIFFER C. (1997), *La conservazione delle superfici intonacate. Il metodo e le tecniche*, Skira, Milano.
- FELLIN L. (1998), *Metodologie e ipotesi per l'illuminazione degli affreschi della Cappella degli Scrovegni*, in *La Cappella degli Scrovegni* (1998), pp. 47-8.
- FENU L., ACHENZA M. (2006), *On Earth Stabilization with Natural Polymers for Earth Masonry Construction*, in "M & S: Materials and Structures", 39, 1, pp. 21-7.
- FERRAGNI D., MALLIET J., TORRACA G. (1987), *La registrazione computerizzata dello stato di conservazione delle superfici di interesse monumentale*, in G. Biscontin, R. Angeletti (a cura di), *Conoscenze e sviluppi teorici per la conservazione di sistemi costruttivi tradizionali in muratura*, Atti del convegno di studi (Bressanone, 23-26 giugno 1987), Libreria Progetto, Padova, pp. 239-50.
- FERRIERA T., DEL CURTO D. (2006), *Esempi di conservazione e trattamento di pavimenti storici in edifici religiosi. Soluzione del problema dell'umidità attraverso il drenaggio e ventilazione sotto i pavimenti*, in Biscontin, Driussi (2006), pp. 363-72.
- FERRINI P. (2000), *Le murature antiche in laterizio: tecniche di caratterizzazione*, in "Costruire in Laterizio", 78, pp. 52-5.
- FEYERABEND P. K. (1996), *Ambiguità e armonia. Lezioni trentine*, a cura di F. Castellani, Laterza, Roma-Bari.
- FILETI MAZZA M., RASARIO G., VACCARI M. G. (1990), *Organizzazione informatica della scheda di restauro*, in "OPD restauro", 2, pp. 49-66.
- FILETICI M. G., RAMBELLI A., TORRACA G. (2005), *Protezione vegetale su strutture di tufo. Esperimentazioni sulle pendici del Palatino*, in "Materiali e Strutture", n.s., III, 5-6, pp. 164-75.
- FIORANI D. (1994), *Lo studio delle tecniche costruttive murarie antiche: orientamenti, problemi, acquisizioni*, in "Palladio", n.s., VII, 14, pp. 101-8.
- EAD. (1996a), *Rilievo del degrado e diagnostica*, in Carbonara (1996), vol. 2, pp. 521-84.
- EAD. (1996b), *L'invecchiamento e il degrado*, in Carbonara (1996), vol. 2, pp. 295-416.
- EAD. (2001), *Quadro storico degli impianti antichi e loro riconoscimento per la conservazione e il recupero*, in Carbonara (2001a), vol. 1, pp. 151-284.
- EAD. (2002), *Utilità e limiti di un principio. La reversibilità nel restauro*, in *Reversibilità? Concezione e interpretazioni nel restauro*, Memorie del convegno (Torino, 12-13 aprile 2002), UTET, Torino, pp. 27-38.
- EAD. (2003a), *Dalla "convenienza" alla "compatibilità" del restauro: note di un percorso*, in *Dalla reversibilità alla compatibilità*, Atti del convegno (Conegliano, 13-14 giugno 2003), Nardini, Firenze, pp. 13-26.

- EAD. (a cura di) (2003b), *La chiesa dei SS. Sebastiano e Rocco in San Vito Romano: storia e restauro*, Gangemi, Roma.
- EAD. (2004a), *Interventi sulle strutture in elevato*, in Carbonara (2004), vol. 2, pp. 508-38.
- EAD. (2004b), *La materia degli antichi edifici: materiale lapideo*, in Carbonara (2004), vol. 1, pp. 25-49.
- EAD. (2004c), *Posterità e minimo intervento*, in *Il minimo intervento nel restauro*, Atti del convegno (Siena, 18-19 giugno 2004), Nardini, Firenze, pp. 17-26.
- EAD. (2004d), *Restauro architettonico e strumenti informatici: guida agli elaborati grafici*, Liguori, Napoli.
- EAD. (2005), *Murature medievali in Italia: spunti di riflessione da una ricerca*, in Fiorani, Esposito (2005), pp. 31-45.
- EAD. (2006), *Il restauro architettonico nei paesi di lingua tedesca. Fondamenti, dialettica, attualità*, Scuola di specializzazione per lo studio ed il restauro dei monumenti, Università degli Studi di Roma "La Sapienza", Bonsignori, Roma.
- EAD. (2007), *Un panorama europeo del restauro oggi*, in Carbonara (2007), pp. 51-113.
- FIORANI D., ESPOSITO D. (a cura di) (2005), *Tecniche costruttive dell'edilizia storica. Consigli per conservare*, Viella, Roma.
- FIORANI D., PALMERIO G., RICCINI A. (1998), *Il restauro della chiesa abbaziale di San Salvatore Maggiore presso Concerviano (Rieti). Parte seconda*, in "TeMa", 2, pp. 67-80.
- FIORI C. (a cura di) (1996), *Mosaico e restauro musivo*, Istituto di ricerche tecnologiche per la ceramica (CNR), Faenza.
- FIORI C., VANDINI M. (2002), *Teoria e tecniche per la conservazione del mosaico*, Il Prato, Padova.
- FIORUCCI T. (a cura di) (2005), *Metodologie innovative integrate per il rilevamento dell'architettura e dell'ambiente*, Gangemi, Roma.
- Firenze sotto l'occhio delle telecamere* (2007), in "Sicurezza", 12, pp. 22-4.
- FLETCHER B. (1967), *Storia dell'architettura secondo il metodo comparativo*, A. Martello, Milano.
- FONDELLI M. (1992), *Trattato di fotogrammetria urbana e architettonica*, Laterza, Roma-Bari.
- FRANCOVICH R., PARENTI R. (a cura di) (1988), *Archeologia e restauro dei monumenti*, 1 ciclo di lezioni sulla ricerca applicata in archeologia (Siena, Certosa di Pontignano, 1987), All'insegna del Giglio, Firenze.
- FRANZONI E., SANDROLINI F. (1999), *Dati sperimentali sul nuovo sistema a barre polarizzate*, in "TeMa", 2, pp. 39-46.
- FRATINI F. et al. (1993), *Bricks: Composition and Physical Characteristics as a Function of the Raw Materials*, in M. J. Thiel (ed.), *Conservation of Stone and Other Materials*, vol. 1: *Causes of Disorders and Diagnosis*, vol. 2: *Prevention and Treatments*, Proceedings of the international RILEM/UNESCO congress (Paris, June 29-July 1, 1993), E.&F.N. Spon, London, pp. 228-37.
- IDD. (1996), *Le malte di allestimento nelle murature medievali: struttura, composizione, durabilità*, in G. Biscontin, G. Driussi (a cura di), *Dal sito archeologico all'archeologia del costruito: conoscenza, progetto e conservazione*, Atti del convegno di studi (Bressanone, 3-6 luglio 1996), Arcadia ricerche, Padova, pp. 299-307.
- FRATINI F., MANGANELLI DEL FÀ C., PECCHIONI E., RADDI G. (1995), *Effetti di pulitura su*

- superfici marmoree: valutazione mediante analisi microscopica*, in Biscontin, Driussi (1995), pp. 531-8.
- FRATINI F., MANGANELLI DEL FÀ C., PIERATTINI P. (1999), *Le rocce intrusive: sviluppo dell'alterazione esogena nel granito dell'isola del Giglio*, in "Recuperare l'edilizia", 2, 10, pp. CXIII-CXIX.
- FRATINI F., RESCIC S., SARDU A. R. (2001), *La trachite di Bosa: caratterizzazione fisica, mineralogica e petrografica*, in "Arkos", 2, 2, pp. 28-35.
- GABRIELLI F. (1996), *La "cronotipologia relativa" come metodo di analisi degli elevati: la facciata del Palazzo Pubblico di Siena*, in "Archeologia dell'Architettura", 1, pp. 17-40.
- GABRIELLI N. (1984), *Appunti riguardanti il restauro e la conservazione delle opere lapidee in Vaticano*, in "Bollettino dei musei e gallerie pontificie", v, pp. 153-74.
- GABRIELLI N. et al. (2005), *Restauro della sfera bronzea della cupola vaticana*, in "Materiali e Strutture", III, 5-6, pp. 38-87.
- GABRIELLI N., ZANDER P. (2007), *La necropoli sotto la Basilica di San Pietro in Vaticano*, in "Kermes", XX, 65, pp. 53-66.
- GALDIERI E. (1982), *Le meraviglie dell'architettura in terra cruda*, Laterza, Roma-Bari.
- GALIFI P., MORETTI S., AOYAGI M. (2002), *La Casa di Giulio Polibio. Note tecniche e metodologiche per la realizzazione di un modello virtuale*, in *Realtà virtuale e vantaggi culturali: raccolta di saggi e articoli su studi interdisciplinari*, Atti del VR Lab Symposium, Tokyo, pp. 1-25.
- GALIMBERTI U. (1999), *Psiche e techne. L'uomo nell'età della tecnica*, Feltrinelli, Milano.
- GALLO N. (2002), *Il caso di studio di Castello Aghinolfi*, in "Archeologia dell'Architettura", VI, pp. 31-5.
- GALLO CURCIO A. (1992), *Sulle indagini strumentali delle caratteristiche meccaniche delle murature in opera*, in "Materiali e Strutture", II, 1, pp. 13-22.
- ID. (2004), *Lettura strutturale dell'edificio*, in Carbonara (2004), vol. 1, pp. 459-83.
- ID. (2007), *Sul consolidamento degli edifici storici*, EPC Libri, Roma.
- GARELLO G. (2004), *Metodi a confronto: rilievo longimetrico, topografico e fotogrammetrico*, in Musso (2004), pp. 69-84.
- GASPAROLI P. (1997), *La manutenzione delle superfici edilizie: prescrizioni per esecuzione, controlli, collaudo sui rivestimenti esterni: preparazione dei supporti,intonaci e coloriture, trattamento dei materiali lapidei, protezione delle opere in legno e ferro*, RPAC, deumidificazioni, Alinea, Firenze.
- ID. (1999), *La barriera "saff": verifiche sull'applicazione*, in "TeMa", 2, pp. 57-60.
- GELSOMINO L. (a cura di) (1988), *Umidità. Tecniche e prodotti per il risanamento. Recupero edilizio 6*, Alinea, Firenze.
- GENNARO L. (1998), *Attività realizzativa in corso*, in *La Cappella degli Scrovegni* (1998), p. 46.
- GIACCHETTI R., BUFARINI S., D'ARIA V. (2005), *Il controllo strutturale degli edifici in cemento armato e in muratura*, EPC Libri, Roma.
- GIACOBINI C., ROCCARDI A., TIGLIÈ I. (1986), *Ricerche sul biodeterioramento*, in Biscontin (1986), pp. 687-705.
- GIANI G. P., IORI I., MONTRASIO L., SPAGNOLI A., TAVAGLINI S. (2000), *Sulla stabilità strutturale della Rocca Sancitale in Fontanellato*, in "Costruire in Laterizio", 78, pp. 70-5.
- GIANNINI C. (a cura di) (2003), *Dizionario del restauro e della diagnostica*, Nardini, Firenze.

- GIAVARINI C., SANTARELLI M. L. (1996), *Gli studi per la protezione del Marco Aurelio*, in “Materiali e Strutture”, VI, 3, pp. 137-44.
- GIMMA M. G. (a cura di) (1989), *I materiali metallici negli interventi di restauro e recupero edilizio*, Atti del convegno e mostra (Roma, 18-20 maggio 1989), BetaGamma, Roma.
- GINOUVÉS R., GUIMIER SORBETS A. M. (1991), *Un centre de recherche sur les systèmes d'information en archéologie*, in “Archeologia e calcolatori”, 2, pp. 7-12.
- GIORELLO G. (1994), *Introduzione alla filosofia della scienza*, Bompiani, Milano (ultima ed. 2006).
- GIORGI L. (1999), *Antonio da Sangallo il Vecchio e Andrea Pozzo a Montepulciano: il Tempio della Madonna di San Biagio e la Chiesa del Gesù*, Le Balze, Montepulciano.
- GIOVANNONE C., IOELE M., SANTOPADRE P., SANTAMARIA U. (2003), *Intonaci ad alto contenuto salino: efficacia del trattamento con idrato di bario*, in “Bollettino ICR”, 6-7, pp. 59-71.
- GIOVANNONI G. (1936), *Restauro (Restauro dei monumenti)*, in *Enciclopedia Italiana*, Istituto della Enciclopedia Italiana, Roma, vol. XXIX, pp. 127-30.
- ID. (s.d. [ma 1945]), *Il restauro dei monumenti*, Cremonese, Roma.
- GIUBILEO C., CALDERONI B., MAZZOLANI F. M., DE MATTEIS G. (2006), *Campioni lignei estratti da travi in castagno antico. Studio sperimentale e caratterizzazione meccanica*, in “L'Edilizia”, 143, pp. 46-55.
- GIUFFRÈ A. (1991), *Lettura sulla meccanica delle murature storiche*, Kappa, Roma.
- ID. (1993), *Sicurezza e conservazione dei centri storici. Il caso di Ortigia*, Laterza, Roma-Bari.
- GIURIANI E., PLIZZARI G. A., BASSINI C. (1995), *Experimental Results on Masonry Wall Anchored Ties*, in C. A. Brebbia, W. Jäger (eds.), *Structural Studies: Repairs and Maintenance of Historical Buildings VI*, Wit Press, Southampton, pp. 55-64.
- GIUSSANI A., VASSENA G. (1993), *Il monitoraggio della basilica di San Carlo al Corso a Roma*, in “Ἀνάγκη”, 5, pp. 90-3.
- GRASSI L. (1980), *Restauro*, in *Dizionario Enciclopedico*, vol. XII, UNEDI, Roma.
- GRECO A. (2005), *La termografia come strumento di conoscenza del manufatto edilizio: metodi ed esempi*, in Calvi et al. (2005), pp. 109-41.
- GUCCIONE M., NAPPI M. R., RECCHIA A. P. (1999), *Patrimonio culturale e disastri*, Gangemi, Roma.
- GUERRIERI F. (a cura di) (1999), *Manuale per la riabilitazione e la ricostruzione post-sismica degli edifici*, DEI, Roma.
- GUIDI G. F. (1995), *Interventi di restauro. Analisi e costi delle indagini diagnostiche*, DEI, Roma.
- HOCHLEITNER R. (1985), *Fotoatlante dei minerali e rocce*, Zanichelli, Bologna.
- I beni culturali dall'istituzione del Ministero ai decreti delegati* (1976), introduzione di G. Spadolini, Ufficio Centrale per i Beni Culturali, Architettonici, Archeologici, Artistici e Storici, Roma.
- ICOMOS, CIPA, GCI (eds.) (2002), *RECORDIM Iniziative*, Recording, Documentation and Information Management, activities report.
- IENITILE R. (2002), *Santa Fede a Cavagnolo (Torino). Et è fabbrica antica, et è tutta rovinata: dal consolidamento al monitoraggio*, in “Ἀνάγκη”, 35-36, pp. 164-75.
- INDIRLI M. et al. (2004), *Restauro ed isolamento sismico della chiesa romanica di San Giovanni Battista ad Apagni*, in Associazione nazionale italiana di ingegneria si-

- smica (a cura di), *L'ingegneria sismica in Italia*, Atti dell'XI congresso (Genova, 25-29 gennaio 2004), S. G. Editoriali, Padova, pp. 115-27.
- JEDRZEJEWSKA H. (1976), *Ethics in Conservation*, Kungl. Konsthögskolan. Institutet för materialkunskap, Stockholm (trad. it. *Principi di restauro*, Opus Libri, Fiesole 1983; 3<sup>a</sup> rist. 1999).
- JOKILEHTO J. (2007), *Il quadro internazionale: Asia, Australia, Medio Oriente, Paesi Arabi e Africa subsahariana*, in Carbonara (2007), pp. 147-210.
- JURINA L. (1989), *La diagnosi del sistema strutturale*, in G. Caterina (a cura di), *Tecnologia del recupero edilizio*, UTET, Torino, pp. 195-232.
- ID. (2002), *Interventi consolidamento esterno sulle murature*, in "L'Edilizia", 2, pp. 63-8.
- ID. (2003a), *Le possibilità dell'approccio reversibile negli interventi di consolidamento strutturale*, in Biscontin, Driussi (2003), pp. 275-86.
- ID. (2003b), *Strutture in legno. Soluzioni leggere per il consolidamento*, in "Recupero e conservazione", 50, pp. 65-8.
- KOOB S. P. (2000), *New Techniques for the Repair and Restoration of Ancient Glass*, in A. Roy, P. Smith (eds.), *Tradition and Innovation: Advances in Conservation*, Contributions to the IIC Melbourne congress (Melbourne, October 10-14, 2000), International Institute for Conservation, London, pp. 92-5.
- KORRES M., FYTOS M. J., GREGORIADES G. (1988), *Borescopy in the Parthenon*, in 2<sup>a</sup> Conferenza internazionale sulle prove non distruttive metodi microanalitici e indagini ambientali per lo studio e la conservazione delle opere d'arte, Atti del convegno (Perugia, 17-20 1988), Preprints ICR-AIPND, Roma, pp. 13.1-13.23.
- La Cappella degli Scrovegni: indagini, restauri, interventi* (1998), Atti della giornata di studi (Padova[?], 25 febbraio 1998), in "Progetto restauro", v, 9.
- La Carta del Rischio del patrimonio culturale* (1997), Ministero BB.CC.AA., Ufficio Centrale per i Beni Archeologici, Artistici e Storici-ICR, ICR-Bonifica, Roma.
- La diffusione in Italia delle metodologie scientifiche per lo studio e la conservazione delle opere d'arte* (1989), Accademia Nazionale dei Lincei, Roma.
- La diffusione in Italia delle metodologie scientifiche per lo studio e la conservazione delle opere d'arte* (1995), Accademia Nazionale dei Lincei, Roma.
- LAGOMARSINO S. et al. (1998), *Chiese in Umbria. Il rilievo del danno e della vulnerabilità sismica*, in "Recupero e conservazione", 21, pp. 24-35.
- LALLI C., LANTERNA G. (1992), *Il campionamento e il prelievo: fasi critiche per la corretta impostazione di una campagna analitica. I parte*, in "Kermes", 14, pp. 3-10.
- IDD. (1993), *Il campionamento e il prelievo: fasi critiche per la corretta impostazione di una campagna analitica. II parte*, in "Kermes", 6, 16, pp. 3-11.
- LAURENZI TABASSO M. (1986), *Intonaci per l'edilizia storica: il controllo di qualità delle materie prime e dei prodotti finiti*, in Bureca, Palandri (1986), pp. 101-5.
- EAD. (1990), *Le indagini scientifiche per la conservazione degli intonaci*, in Cardilli (1990), pp. 78-81.
- EAD. (2004a), *Il criterio del minimo intervento: possibili interpretazioni e applicazioni, in Il minimo intervento nel restauro*, Atti del convegno (Siena, 18-19 giugno 2004), Nardini, Firenze, pp. 9-16.
- EAD. (2004b), *L'impiego dei silicati inorganici nei monumenti romani*, in "Arkos", v, 8, pp. 47-55.
- LAURENZI TABASSO M., LAZZARINI L. (1986), *Il restauro della pietra*, CEDAM, Padova.



- LAURENZI TABASSO M., MARABELLI M. (1992), *Il degrado dei monumenti in Roma in rapporto all'inquinamento atmosferico*, BetaGamma, Viterbo.
- LAURIOLA M., MACCHIONI N., MANNUCCI M. (2000), *Strutture di legno: rapporti di indagini. Scopi, modalità, esempi*, in "Recupero e conservazione", 6, 35, pp. 44-7.
- IDD. (2002), *Rapporti di indagine: scopi, modalità, esempi*, in Tampone, Mannucci, Macchioni (2002), pp. 140-2.
- LAVISCI P., MANNUCCI M. (2002), *Analisi e diagnosi*, in Tampone, Mannucci, Macchioni (2002), pp. 14-5.
- LAZZARINI L. (1981), *Genesi e classificazione delle rocce. Cenni di mineralogia. Pietre da costruzione della Lombardia. Cenni di mineralogia e di petrografia delle argille. Morfologia del degrado dei materiali lapidei*, in *Primo corso di aggiornamento sui problemi della salvaguardia del patrimonio artistico monumentale* (Milano, maggio-giugno 1981), Regione Lombardia, Assessorato alla cultura, Milano, dattiloscritto, vol. 3.
- ID. (1999), *Restauro e scienza*, in B. Zanardi (a cura di), *Conservazione, restauro e tutela*, Skira, Milano, pp. 367-92.
- LAZZARINI L., TURI B. (2004), *Studio archeometrico dei marmi usati nella scultura e architettura di età arcaica a Cirene: nota di Geochimica*, in "Rendiconti Lincei. Scienze fisiche e naturali", 15, pp. 189-204.
- LEBLANC F., EPPICH R. (2005), *Documenting Our Past for the Future*, in "The Getty Conservation Institute Newsletter", XX, 3, pp. 5-9.
- LEFÈVRE R. A. (a cura di) (1995), *La pietra dei monumenti nel suo ambiente fisico*, Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato, Libreria dello Stato, Roma.
- LEGA A. M. (2006), *Ceramica: materia e tecnica*, Museo internazionale delle ceramiche-Phase, Faenza-Firenze.
- Leganti, fissativi, pigmenti: metodi di riconoscimento* (1978), ICR, Roma.
- LEONARDI A., CAMPODONICO A., PONTE E. (2006), *Sampierdarena tra ricostruzione storica e restituzione tridimensionale*, in I. Lagomarsino (a cura di), *Le ville del ponente genovese: verso un progetto di conservazione e valorizzazione*, Atti del convegno (Genova, 27 aprile 2006), s.e., Genova, pp. 20-8.
- LETELLIER R. (2002), *"Bridging the Gap" Between the Information User and Information Provider*, in J. Albertz (ed.), *Surveying and Documentation of Historic Buildings, Monuments, Sites. Traditional and Modern Methods*, Proceedings of CIPA 18th International Symposium (Potsdam, September 18-21, 2001), CIPA 2001 Organizing Committee, Berlin, pp. 1-5.
- LINÑAN C. R., HITA P. R., CÓZAR J. C. G. (2001), *Study, Diagnosis and Rehabilitation of the Wooden Slabs of Two Palace Houses in Seville*, in Lourenço, Roca (2001), pp. 811-20.
- Linee guida per il superamento delle barriere architettoniche nei luoghi di interesse culturale* (2008), Gangemi, Roma.
- Linee guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale* (2006), Gangemi, Roma.
- LIONELLO A., CAVAGGIONI I. (2002), *Il monitoraggio del campanile di S. Maria dei Frari a Venezia tra conoscenza e conservazione*, in "Ἀνάγκη", 33, pp. 100-13.
- LLORENS M., MATA P., ARAIZA J. C., ROCA P. (2001), *Damage Characterization in Stone Columns by Dynamic Test. Application to the Cloister of Girona Cathedral, Spain*, in Lourenço, Roca (2001), pp. 469-77.
- LOCATELLI P., POLVANI G., SELLERI F. (1971), *Caratteristiche geometriche e fisiche della torre e suo stato di conservazione*, in *Ricerche e studi sulla Torre pendente di Pisa e*

- i fenomeni connessi alle condizioni dell'ambiente*, Commissione per il consolidamento della Torre pendente di Pisa, IGM, Firenze, vol. I, pp. 57-62.
- LOMBARDO S. (1996), *Progettare senza barriere*, Flaccovio, Palermo.
- LONGHI R. (1940), *Restauri*, in "Critica d'Arte", V, 2, II, pp. 121-8.
- LORUSSO S. (2000), *Conservazione e trattamento dei materiali costituenti i beni culturali*, Pitagora, Bologna.
- ID. (2002), *La diagnostica per il controllo del Sistema Manufatto-Ambiente. Alcune applicazioni nel settore dei beni culturali*, Pitagora, Bologna.
- LORUSSO S., MARABELLI M., VIVIANO G. (1995), *La contaminazione ambientale ed il degrado dei materiali di interesse storico-artistico*, Bulloni, Roma.
- LOURENÇO P. B. (2001), *Analysis of Historical Constructions: From Thrust-Lines to Advanced Simulations*, in Lourenço, Roca (2001), pp. 91-116.
- LOURENÇO P. B., MOURÃO S. C. (2001), *Safety Assessment of Monastery of Jerónimos, Lisbon*, in Lourenço, Roca (2001), pp. 697-706.
- LOURENÇO P. B., ROCA P. (eds.) (2001), *Historical Constructions. Possibilities of Numerical and Experimental Techniques*, Proceedings of the 3rd International Seminar (Guimarães, Portugal, November 7-9, 2001), University of Minho, Guimarães.
- LUDWIG N., MILAZZO M., POLDI G. (1997), *Misura di umidità superficiale nelle murature mediante termografia*, in *Conferenza nazionale sulle prove non distruttive. Monitoraggio, diagnostica*, IX Congresso nazionale dell'AIPND, Atti del convegno (Padova, 25-27 settembre 1997), AIPND PadovaFiere, s.l., pp. 163-72.
- MACCHI G. (1993), *Monitoraggio in linea del Duomo e delle torri medioevali di Pavia*, in "Ἀνάγκη", 3, pp. 88-95.
- ID. (2001), *Diagnosis of the Façade of St. Peter's Basilica in Rome*, in Lourenço, Roca (2001), pp. 309-17.
- MACCHIONI N. (2002), *Analisi svolte dall'IRL-CNR sullo stato di conservazione delle parti lignee*, in Tampone (2002a), p. 150.
- MACCHIONI N., MANNUCCI M. (2002a), *Anomalie e difetti del legno*, in Tampone, Mannucci, Macchioni (2002), pp. 58-61.
- IDD. (2002b), *Tecniche di indagine strumentale per la valutazione delle caratteristiche meccaniche*, in Tampone, Mannucci, Macchioni (2002), pp. 92-8.
- MAETZKE A. M. *et al.* (2001), *Il restauro della "Leggenda della vera Croce"* in "Kermes", XIV, 41, pp. 19-42.
- MALAGODI S. (1998), *Un'evoluzione nella tecnica di rilevamento: il georadar*, in C. L. Frommel (a cura di), *Pietro da Cortona*, Atti del convegno internazionale (Roma-Firenze, 12-15 novembre 1997), Electa, Milano, pp. 333-5.
- MANCINELLI E. (1994), *Sistemi di documentazione nel restauro della Cappella Sistina*, in K. Weil-Garris Brandt (a cura di), *Michelangelo. La Cappella Sistina*, Atti del convegno internazionale di studi (Roma, marzo 1990), Istituto Geografico De Agostini, Novara, pp. 263-5.
- ID. (2003), *Il restauro degli affreschi*, in Tamanti (2003a), pp. 245-69.
- MANCINI R. (2004), *Risanamento, adeguamento e sicurezza*, in Carbonara (2004), vol. 2, pp. 707-40.
- MANGANELLI DEL FA C. (2002), *La porosità nei materiali lapidei naturali e artificiali. Problematiche di determinazione della porosità: correlazione tra caratteristiche fisiche dei materiali, porosità, dinamica dei fluidi, degrado e trattamenti conservativi*, numero speciale di "Geoitalia".
- MANNONI T. (1984), *Analisi di intonaci e malte genovesi: formule, materiali e cause di*

- degrado*, in G. Rotondi Terminiello (a cura di), *Facciate dipinte: conservazione e restauro*, Sagep, Genova, pp. 141-9.
- ID. (1988), *Ricerche sulle malte genovesi alla "porcellana"*, in Biscontin, Vassallo, Volpin (1988), pp. 137a-142a.
- ID. (1990), *Dalle analisi dello stato attuale alla conoscenza dei modi di produzione degli intonaci*, in Biscontin, Volpin (1990), pp. 699-707.
- ID. (1996), *Caratteri costruttivi dell'edilizia storica*, Escum, Genova (1<sup>a</sup> ed. 1994).
- MANNONI T., MILANESE M. (1988), *Mensiocronologia*, in Francovich, Parenti (1988), pp. 383-402.
- MANNUCCI M., TOGNI M. (2002), *Classificazione del legname in opera*, in Tampone, Mannucci, Macchioni (2002), pp. 74-9.
- MARABELLI M. (1995), *Conservazione e restauro dei metalli d'arte* (Conservazione del patrimonio culturale. Ricerche interdisciplinari, Contributi del Centro linceo interdisciplinare "Beniamino Segre", 92), Accademia Nazionale dei Lincei, Roma.
- ID. (1998), *Misurazioni e problematiche dell'inquinamento e dei sali solubili*, in *La Cappella degli Scrovegni* (1998), pp. 33-6.
- MARABELLI M. et al. (2006), *La Cappella degli Scrovegni: sintesi delle ricerche effettuate dagli anni Settanta sino all'ultimo restauro*, in Mazzeo (2006), pp. 51-63.
- MARABELLI M., PANDOLFI A., PRISCO G., SPAMPINATO M. L. (a cura di) (1998), *Diagnosi e progetto per la conservazione dei materiali dell'architettura*, De Luca, Roma.
- MARCHETTI L. (a cura di) (2007), *La ricostruzione dei beni culturali in Umbria: realizzazioni e prospettive*, Quattroemme, Perugia.
- MARCONI P. (1984), *Arte e cultura della manutenzione dei monumenti*, Laterza, Roma-Bari.
- ID. (1999), *Materia e significato. La questione del restauro architettonico*, Laterza, Roma-Bari.
- MARIANI M. (2005), *Isolatore a scorrimento per l'appoggio delle travi e delle capriate*, in *Conservation of Historic Wooden Structures*, Atti della conferenza (Firenze, 22-27 febbraio 2005), UNESCO, Firenze, pp. 37-42.
- ID. (2006a), *Trattato sul consolidamento e restauro degli edifici in muratura*, DEI, Roma.
- ID. (2006b), *Indagini diagnostiche*, in Id. (2006a), vol. 1, pp. 27-99.
- ID. (2006c), *Indagini sulle murature*, in Id. (2006a), vol. 2, pp. 41-64.
- MARINELLI S. (1996), *La sicurezza antincendio nei luoghi di lavoro*, EPC Libri, Roma.
- MARINO F. (2007), *Forme di vulnerabilità specifica*, in Doglioni, Mazzotti (2007), pp. 105-27.
- MARMO F. (2007), *L'innovazione nel consolidamento: indagini e verifiche per la conservazione del patrimonio architettonico*, Gangemi, Roma.
- MARTELLI A., SONINO V., PARDUCCI A. (2008), *Moderni sistemi e tecnologie antisismiche, XXI secolo*, Milano.
- MARTINES G. (1986), *Domus Aurea e colle Oppio: un intervento di conservazione nella dimensione urbanistica delle aree archeologiche centrali*, in Biscontin (1986), pp. 631-2.
- MARTINI M., CASTELLANO A., SIBILIA E. (a cura di) (2007), *Elementi di archeometria. Metodi fisici per i beni culturali*, Egea, Milano (2<sup>a</sup> ed.).
- MARTINONI G. F. (1998), *Il nuovo corpo tecnologico attrezzato di accesso. Motivazioni e realizzazioni*, in *La Cappella degli Scrovegni* (1998), pp. 44-5.
- ID. (2003), *Il corpo tecnologico attrezzato*, in Basile (2003), pp. 160-3.
- MASSA S., NICHI D. (1988), *Conservazione e fruizione: analisi ambientale sulle tombe di*

- pinte di Tarquinia, in Etruria meridionale. Conoscenza, conservazione, fruizione*, Atti del convegno (Viterbo, 29-30 novembre-1° dicembre 1985), Quasar, Roma, pp. 139-41, tavv. LXX-LXXIV.
- MASSARI G. (1943), *Nuovi criteri per giudicare lo stato di umidità delle vecchie murature*, Accademia d'Italia, Firenze.
- ID. (1968), *Corso di qualificazione tecnica per il risanamento delle murature dei monumenti dall'umidità: guida pratica ottobre-novembre 1968*, ICR, Roma.
- ID. (1969), *L'umidità nei monumenti*, Edizioni Scientifiche SIDEREA, Roma.
- MASSARI G., MASSARI I. (1981), *Risanamento igienico dei locali umidi*, Hoepli, Milano (2<sup>a</sup> ed. 1992).
- MASSARI I. (1983), *Tecniche di misura e diagnosi per il risanamento e la difesa dell'umidità*, in Ballandi *et al.* (1983), pp. 235-43.
- ID. (1988), *Il calore in difesa del monumento*, in Gelsomino (1988), pp. 87-90.
- ID. (1989), *Il recupero igienico abitativo. Osservazioni e analisi dei risultati delle indagini e dei controlli svolti in alcuni cantieri di recupero dal 1983 a oggi*, in "Notiziario. Programma Straordinario di Edilizia Residenziale per la città di Napoli, Il recupero urbano", 13-14, pp. 150-9.
- ID. (1990), *Alcuni aspetti del risanamento dall'umidità nel campo monumentale*, in M. G. Gimma (a cura di), *Conservazione dei beni architettonici: metodi e tecniche*, Atti del seminario (Sciaccia, 8-10 giugno 1990), BetaGamma, Viterbo, pp. 85-9.
- ID. (1996), *Indagini igrometriche e interventi di risanamento dall'umidità*, in Testa (1996), pp. 406-7.
- ID. (1998), *Quanto asciugare? Molto? Poco? Così così? Una soluzione conciliante: il prosciugamento pilotato*, in Marabelli, Pandolfi, Prisco, Spampinato (1998), pp. 311-25.
- ID. (1999), *La barriera per taglio meccanico: riflessioni sulle esperienze compiute*, in "TeMa", 2, pp. 67-73.
- ID. (2003), *Indagini igrometriche, igrotermiche e interventi per il miglioramento microclimatico*, in Tamanti (2003a), pp. 277-86.
- MASTRODICASA S. (1997), *Dissesti statici delle strutture edilizie: diagnosi e consolidamento*, Hoepli, Milano.
- MATTEINI M. (2000), *Consolidanti e protettivi di natura minerale in uso sui manufatti di interesse artistico ed archeologico costituiti da materiali porosi*, in *Consolidanti e protettivi in uso su materiali inorganici porosi di interesse artistico ed archeologico*, Atti del convegno (Trento, 25-27 febbraio 1999), Provincia Autonoma di Trento, Servizio Beni Culturali, Trento, pp. 48-83.
- MATTEINI M., ARCANGELO M. (2003), *Scienza e restauro. Metodi di indagine*, Nardini, Firenze (2<sup>a</sup> ed.).
- MATTEINI M., GIOVANNONI S., LAZZERI S. (2001), *Aspetti scientifici, tecnici e metodologici del restauro*, in *Il restauro della "Leggenda della vera croce"*, in "Kermes", XIV, 41, pp. 33-42.
- MATTEINI M., MOLES A. (1984), *Scienza e restauro*, Nardini, Firenze (2<sup>a</sup> ed. 1993; 3<sup>a</sup> ed. 2003).
- IDD. (1989), *La chimica nel restauro: i materiali dell'arte pittorica*, Nardini, Firenze.
- MATTEINI M., SCUTO S. (2001), *Consolidamento di manufatti lapidei con idrossido di bario*, in "Arkos", 2, 1, pp. 28-31.
- MATTEOLI L., VIOLI G., DE SANTIS R. (1979), *Metalli e metallurgia*, Zanichelli, Bologna.
- MAZZEO R. (a cura di) (2006), *Dipinti murali dell'Estremo Oriente: diagnosi, conserva-*

- zione e restauro: quando Oriente e Occidente si incontrano e si confrontano, Atti del seminario internazionale (Ravenna, 28-29 maggio 2004), Longo, Ravenna.
- MELUCCO VACCARO A. (1989), *Archeologia e restauro. Tradizione e attualità*, Il Saggiatore, Milano.
- MENEGHINI P., MARINELLI L., SCARPELLINI P. (1995), *Normative e metodologie per il corretto intervento conservativo delle superfici esterne degli edifici storici*, in L. Gelso-mino (a cura di), *L'immagine del recupero. Recupero edilizio 9*, Alinea, Firenze, pp. 9-22.
- MENICALI U. (1992), *I materiali dell'edilizia storica: tecnologia e impiego dei materiali tradizionali*, Carocci, Roma.
- MEZZADRI G. (1983), *Diagnosi strutturale sulla base dei rilievi geometrici e del quadro fessurativo*, in Ballandi et al. (1983), pp. 195-202.
- MIARELLI MARIANI G. (1975), *Esiste il restauro?*, in "Storia Architettura", II, 2, pp. 4-9.
- ID. (1993), *Centri storici. Note sul tema*, Scuola di specializzazione per lo studio ed il restauro dei monumenti, Università degli Studi di Roma "La Sapienza", Bonsignori, Roma.
- ID. (1995), *Coloriture urbane: omologazione fra uniformità e dissonanze*, in "Ἀνάγκη", 10, pp. 10-23.
- MIGLIARI R. (1999), *Principi teorici e prime acquisizioni nel rilievo del Colosseo*, in "Disegnare – idee immagini", 18-19, pp. 33-50.
- MILAZZO M., LUDWIG N., REDAELLI V. (s.d.), *Studio dei flussi evaporativi nelle dinamiche del degrado di materiali umidi*, Istituto di Fisica Generale Applicata, Università degli Studi di Milano, Laboratorio di Archeometria (<http://www.brera.unimi.it/istituto/archeo/pubblicazioni/termografia/Ludwig-Flussi%20evaporativi.pdf>).
- MILELLA N., ZONNO M. (2005), *Scansione laser. Il rilievo dei centri urbani*, in "Recupero e conservazione", 66, pp. 48-9.
- MILELLA N., ZONNO M., MILELLA G. (2005), *Ricomposizione e restauro digitale. Il castello normanno svevo di Bisceglie*, in "Recupero e conservazione", 62, pp. 60-2.
- MINIERO P. (2006), *Stabiae. Attività dell'ufficio scavi: 1986-1988*, in "Rivista di studi pompeiani", 2, p. 220.
- MODENA C. et al. (2001), *Caratterizzazione strutturale e consolidamento di costruzioni in muratura*, in S. Pesenti (a cura di), *Il progetto di conservazione: linee metodologiche per le analisi preliminari, l'intervento, il controllo di efficacia*, Alinea, Firenze, pp. 416-57.
- MODENA C., ROSSI P. P. (1992), *Valutazione delle condizioni di stabilità e consolidamento delle torri in muratura*, in "Materiali e Strutture", II, 3, pp. 97-109.
- MODENA C., TEMPESTA F., TEMPESTA P. (1998), *Il recupero a secco di impalcati in legno. Un sistema per solai a semplice e doppia orditura*, in "L'Edilizia", 3-4, pp. 38-45.
- MOLINA J. et al. (2001), *Seismic Assessment of Masonry Structures – Experimental Program*, in Lourenço, Roca (2001), pp. 953-62.
- MONTELLI E. (2004), *La materia degli antichi edifici: materiale laterizio*, in Carbonara (2004), vol. 1, pp. 50-74.
- MORA P. (1966), *Il legno: struttura, alterazioni e conservazione*, ICCROM, Roma.
- MORA P., MORA L. (1972), *Metodo per la rimozione di incrostazioni su pietre calcaree e dipinti murali*, Sistema, Roma.
- MORA P., MORA L., PHILIPPOT P. (1977), *La conservation des peintures murales*, Compo-

- sitori, Bologna (trad. it. *La conservazione delle pitture murali*, Compositori, Bologna 1999).
- MORANDOTTI M. (2005), *Il rilievo integrale dell'esistente tra diagnostica e progetto*, in Calvi *et al.* (2005), pp. 17-52.
- MOTTANA A., CRESPI R., LIBORIO G. (2006), *Minerali e rocce*, Mondadori, Milano (1<sup>a</sup> ed. 1980).
- MUGAYAR KÜHL B. (2007), *Il quadro pan-americano*, in Carbonara (2007), pp. 115-46.
- MUGNAINI S. *et al.* (2006), *Thirteenth Century Wall Paintings under the Siena Cathedral (Italy). Mineralogical and Petrographic Study of Materials, Painting Techniques and State of Conservation*, in "Journal of cultural heritage", 7, 3, pp. 171-85.
- MUNAFÒ P., DAVÌ F., BARCAGLIONI F. (2003), *Il restauro della materia del costruito nel rispetto del funzionamento meccanico originale. Il caso delle capriate lignee*, in "L'Edilizia", 126, pp. 44-7.
- MUNAFÒ P., DAVÌ F., MUGIANESI E. (2003), *Codice genetico di rottura. Il rispetto negli interventi di restauro*, in "L'Edilizia", 128, pp. 60-3.
- MUNAFÒ P., GRILLI M. (2005), *Il rispetto del costruito salvaguardando i cinematismi originari di rottura*, in *Conservation of Historic Wooden Structures*, Atti della conferenza (Firenze, 22-27 febbraio 2005), UNESCO, Firenze, pp. 51-62.
- MUNAFÒ P., TASSI C., ZIZZARI T. (2005), *Un solaio ligneo del XVII secolo ad Ancona. L'analisi come premessa indispensabile per il recupero*, in "Recupero e conservazione", 66, pp. 42-7.
- MUNDULA I., TUBI N. (2006), *Umidità e risanamento negli edifici in muratura*, Maggioli, Santarcangelo di Romagna.
- MUÑOZ VIÑAS S. (2005), *Contemporary Theory of Conservation*, Elsevier, Oxford.
- MUSSO S. F. (2004), *Recupero e restauro degli edifici storici. Guida pratica al rilievo e alla diagnostica*, EPC Libri, Roma.
- ID. (2005), *Endoscopia per il restauro*, in "Recuperare l'edilizia", VIII, 43, pp. 36-41.
- NAPOLI B. (2003), *Interventi di consolidamento e miglioramento delle prestazioni di risposta sismica della chiesa di San Pietro in Valle*, in Tamanti (2003a), pp. 271-6.
- NARDI R. (1992), *Esempi di grafica assistita da computer a fini di documentazione*, in "Materiali e Strutture", II, 1, pp. 33-41.
- NARDI BERTI R. (2006), *La struttura anatomica del legno ed il riconoscimento dei legnami italiani di più corrente impiego*, 2<sup>a</sup> ed. a cura di S. Berti, M. Fioravanti, N. Macchioni, IVALSA-CNR, Sesto Fiorentino.
- NEGRI ARNOLDI F. (1988), *Il catalogo dei beni culturali e ambientali. Principi e tecniche di indagine*, Carocci, Roma.
- NEGRO A., MONTANARO L., TULLIANI J. M. (2003), *Scienza e tecnologia dei materiali per il restauro*, CELID, Torino.
- NEWTON R., DAVISON S. (1989), *Conservation of Glass*, Butterworths, London.
- NICCHIARELLI F., ROCCHI P., TURLÒ A. R. (2000), *Manuale del risanamento: la difesa dall'umidità nella pratica edificatoria*, Kappa, Roma.
- NICOLETTI M., CARDARELLI U. (1985), *L'ecosistema urbano*, Dedalo, Roma.
- NIGLIO O. (2004), *Tecnologie diagnostiche per la conservazione dei beni architettonici*, Il Prato, Saonara.
- NIGRO L. (2005), *Un ponte fra tradizione ed alte tecnologie*, in "Antincendio", 1, pp. 35-9.
- NIMIS P. L., PINNA D., SALVADORI O. (1992), *Licheni e conservazione dei monumenti*, CLUEB, Bologna.

- NUGARI M. P., GIULIANI M. P., CACACE C. (1991), *Domus Aurea: Preservation Proposal for Control of Microflora Growth on Frescoes in Hypogean Environments*, in O. P. Agrawal, Shashi Dhawan (eds.) *Biodeterioration of Cultural Property*, Proceedings of the International Conference (Lucknow, India, February 20-25, 1989), Macmillan India, New Delhi, pp. 359-71.
- Nuove tecnologie per la conoscenza dei beni culturali* (1997), Istituto Centrale per il Catalogo e la Documentazione, Roma.
- ODDY A., CARROL S. (eds.) (1999), *Reversibility. Does It Exist?*, British Museum, London.
- PALACIO A. G., HERNÁNDEZ J. D., ALDASORO J. J. (2001), *Monitoring and Structural Analysis of the Church "Santa Maria de Elexondo (Zeanuri)"*, in Lourenço, Roca (2001), pp. 463-8.
- PALESTRA G. W. (1995), *Intonaco: una superficie di sacrificio*, ETAS Libri, Milano.
- PALLOT-FROSSARD I. (2007), *Les conclusions du programme européen Vidrio sur la protection des vitraux par verrière extérieure*, in "Monumental: revue scientifique et technique des monuments historiques", 2, pp. 113-23.
- PALMERIO G. (2001), *Premesse teoriche e di metodo*, in Carbonara (2001a), vol. 1, pp. 21-149.
- PANDOLFI A. M. (1998), *La Carta del Rischio del patrimonio culturale italiano: metodi di censimento e di catalogazione*, in "Ricerche di Storia dell'Arte", 65, pp. 17-22.
- EAD. (a cura di) (2000), *La conservazione del patrimonio monumentale: il vandalismo grafico*, ICR, Roma.
- PANDOLFI A. M., NICHI D. (1988), *Il rilevamento delle patologie da umidità nell'edilizia storica monumentale*, in Gelsomino (1988), pp. 47-52.
- PANE R. (1987), *Attualità e dialettica del restauro*, antologia a cura di M. Civita, Solfaneli, Chieti.
- PANZERI M., GASTALDO G. (a cura di) (2000), *Sistemi informativi geografici e beni culturali*, CELID, Torino.
- PARENTI R. (1985), *La lettura stratigrafica delle murature in contesti archeologici e di restauro architettonico*, "Restauro e città", 1, 2, pp. 55-68.
- ID. (1988), *Le tecniche di documentazione per una lettura stratigrafica dell'elevato*, in Francovich, Parenti (1988), pp. 249-79.
- ID. (2001), *La facciata del Palazzo Pubblico di Siena: stratigrafia e fonti documentali*, in "Archeologia dell'architettura", 6, pp. 63-5.
- PASTA A. (1982), *Ristrutturazioni e impianti*, Kappa, Roma.
- ID. (2006), *Restauro conservativo e antisismico*, Flaccovio, Palermo.
- PEARSON C. (1987), *Conservation of Ceramics, Glass and Stone*, in Id. (ed.), *Conservation of Marine Archaeological Objects*, Butterworths, London, pp. 253-67.
- PEDELI C., PESCIARELLI R. (1997), *Arkeokeeper: uno strumento informatico per il monitoraggio sistematico degli interventi di restauro sui reperti archeologici mobili*, Atti della III giornata di studio (Faenza, 23 settembre 1995), in "Faenza", LXXXIII, 1-3, pp. 74-5.
- PEDEMONTE E., FORNARI G. (2003), *Chimica e restauro. La scienza dei materiali per l'architettura*, Marsilio, Venezia.
- PENSABENE P., PANELLA C. (a cura di) (1999), *Arco di Costantino tra archeologia e archeometria*, L'«Erma» di Bretschneider, Roma.
- Per la salvezza dei beni culturali in Italia* (1967), Atti e documenti della Commissione

- d'indagine per la tutela e la valorizzazione del patrimonio storico, archeologico, artistico e del paesaggio, Colombo, Roma, 3 voll.
- PETRAROLA P. (1989), *Riflessioni sul restauro dei giardini storici*, in Cazzato (1989), pp. 174-7.
- PETRIGNANI F. (2000), *Computer Technology and Documentation Related to Restoration of Michelangelo's Frescoes in the Sistine Chapel 1987-1994*, in Schmid (2000), pp. 117-24.
- ID. (2002), *L'esperienza dei Musei Vaticani nel restauro degli affreschi michelangiotteschi della Cappella Sistina*, in "Bollettino ICR", 5, pp. 28-36.
- PETRONIO G. (1990), *Restauro letterari da Verga a Pirandello*, Laterza, Roma-Bari.
- PEZZETTA E. (1998), *Interventi di conservazione delle murature*, in *La Cappella degli Scrovegni* (1998), pp. 29-32.
- PHILIPPOT P. (1998), *Saggi sul restauro e dintorni. Antologia*, a cura di P. Fancelli, Scuola di specializzazione per lo studio ed il restauro dei monumenti, Università degli Studi di Roma "La Sapienza", Bonsignori, Roma.
- PIACENTI F. et al. (1995), *Terracotta Tiles – Evolutive Phenomena Causing Aesthetic and Functional Anomalies: Origin, Prevention, Elimination*, in Vincenzini (1995), pp. 581-8.
- PIAGET J. (1972), *L'épistémologie des relations interdisciplinaires*, in *L'interdisciplinarité: problèmes d'enseignement et de recherche dans les universités*, OCDE, Paris, pp. 131-44 (trad. it. in J. Piaget et al., *Pedagogia strutturalista*, Paravia, Torino 1982).
- PICCARRETA F. (2006), *Edifici esistenti*, in L. Boscotrecase, F. Piccarreta, *Edifici in muratura in zona sismica*, Flaccovio, Palermo, pp. 167-387.
- PICCIRILLI C., ROCCHI P. (1999), *Manuale della diagnostica*, Kappa, Roma.
- PICONE R. (2004), *Conservazione e accessibilità. Il superamento delle barriere architettoniche negli edifici e nei siti storici*, Arte Tipografica Editrice, Napoli.
- PIENING H., SCHWARZ R. (1999), *L'impiego del freddo negli interventi di pulitura delle superfici*, in "Kermes", XII, 36, pp. 63-8.
- PIERDOMINICI M. C. (2004), *Restauro e consolidamento di solai lignei di palazzo Alberoni in Roma*, in Carbonara (2004), vol. 2, pp. 960-3.
- PINTO M. R. et al. (1999), *Il processo evolutivo di degrado delle superfici intonacate: linee guida per la manutenzione programmata*, in Biscontin, Driussi (1999), pp. 605-14.
- PITTALUGA D. (2004), *Le nozioni e i concetti di base: cosa occorre sapere*, in Musso (2004), pp. 411-58.
- PITTALUGA D., GHISLANZONI P. (1991), *Mensiocronologia dei mattoni: la statistica applicata all'analisi*, in "Archeologia Medievale", XVIII, pp. 683-7.
- PITTALUGA D., QUIRÓS CASTILLO J. A. (1997), *Mensiocronologie dei laterizi della Liguria e della Toscana: due esperienze a confronto*, in S. Gelichi (a cura di), *1 Congresso Nazionale di Archeologia Medievale*, Società degli archeologi medievisti italiani, Pisa, pp. 460-3.
- PIZZIGONI G., MASSA V., FALCONE E. (1995), *Pulitura di superfici lapidee e pittoriche mediante resine scambio-ioniche*, in Biscontin, Driussi (1995), pp. 211-6.
- PLACIDI A. (2007), *L'analisi dei dissesti*, in L. Cantalini, A. Placidi, *Architettura Trasformazioni Restauro. Il convento di San Giacomo ad Ofena*, Alinea, Firenze, pp. 99-103.
- PLENDERLEITH H. J., WERNER A. E. A. (1971), *The Conservation of Antiquities and Works of Art (Treatment. Repair and Restoration)*, Oxford University Press, Lon-



- don (trad. it. *Il restauro e la conservazione degli oggetti d'arte e d'antiquariato*, Mursia, Milano 1986).
- Polo regionale della Carta del Rischio del patrimonio culturale: dalla catalogazione alla conservazione programmata* (2000), ICR-Regione Lombardia, Milano.
- POZZI D. R., ILARI R., PROPERZI M. (1999), *Allestimento e musealizzazione della torre duecentesca della Rocca Farnese di Valentano, Viterbo*, in "Paesaggio Urbano", 1, pp. 64-5.
- Prodotti di deterioramento. Metodi di analisi* (1979), Dimos, ICR, Roma.
- QUAGLIERINI C., AMOROSI L. (1991), *Chimica e tecnologia dei materiali per l'arte*, Zanichelli, Bologna.
- RAINER L., RIVERA A. (eds.), (2006), *The Conservation of Decorated Surfaces on Earthen Architecture*, Proceedings of the International Colloquium Organized by the Getty Conservation Institute and the National Park Service, Mesa Verde National Park (CO) (September 22-25, 2004), Getty Conservation Institute, Los Angeles.
- RANOCCHIAI G., FRATINI F., MANGANELLI DEL FÀ C. (1995), *Earthen Building in Tuscany: Characterization of the Material Used in Buildings of the High Valdarno*, in Vincenzini (1995), pp. 239-46.
- RICCI M. (a cura di) (1985), *Manutenzione e restauro: conservazione e consolidamento dei materiali lapidei*, CRESME-Giuffrè, Milano.
- RICCI R. (1989), *Composizione e datazione delle malte e degli intonaci in Liguria. Nota 1*, in "Archeologia medievale", 16, pp. 663-73.
- ID. (1998), *Composizioni e datazioni delle malte e degli intonaci in Liguria. Nota 2*, in "Archeologia dell'architettura", 3, pp. 45-51.
- RICOTTINI G. (a cura di) (1996), *Bibliografia annotata: uso di adesivi per legno per fini strutturali ed in particolare per il consolidamento di manufatti antichi*, Istituto per la ricerca sul legno (CNR), Firenze.
- RIEGL A. (1903), *Der moderne Denkmalkultus. Sein Wesen und seine Entstehung*, Braumüller, Wien-Leipzig (trad. it. *Il culto moderno dei monumenti. Il suo carattere e i suoi inizi*, Nuova Alfa editoriale, Bologna 1990).
- Riprogettare per tutti. Un patrimonio architettonico proiettato nel futuro* (2006), s.e., Roma.
- RIVA G., BETTIO C., MODENA C. (2003), *Valutazioni quantitative di caratteristiche meccaniche di murature in pietra mediante prove non distruttive*, in "Materiali e Strutture", 1, 1, pp. 7-21.
- ROCA P. (2001), *Studies on the Structure of Gothic Cathedrals*, in Lourenço, Roca (2001), pp. 71-90.
- ROCCHI P. (1983), *Metodi e strumenti di misura dell'umidità presente nelle murature*, in Ballandi (1983), pp. 245-9.
- ID. (2001), *Indagini preliminari e diagnostica*, in L. Zevi (a cura di), *Manuale del restauro architettonico*, Mancosu, Roma, sez. E.
- ID. (a cura di) (2003), *Trattato sul consolidamento*, Mancosu, Roma.
- ROCCHI COOPMANS DE YOLDI G. (a cura di) (2006), *S. Maria del Fiore: teorie e storie dell'archeologia e del restauro nella città delle fabbriche arnolfiane*, Alinea, Firenze.
- ROCCO A., SORACE S., TERENCE G. (1999), *Simulazione numerica della risposta di pannelli murari consolidati mediante materiali compositi*, in "L'Edilizia", 1-2, pp. 36-42.
- ROCKWELL P. (a cura di) (1989), *Lavorare la pietra: manuale per l'archeologo, lo storico dell'arte e il restauratore*, Carocci, Roma.
- RODOLICO F. (1995), *Le pietre delle città d'Italia*, Le Monnier, Firenze (1<sup>a</sup> ed. 1953).

- ROMAGNOLI M., NOCETTI M., SCARLATTO M. (2005), *Datazione dendrocronologica di strutture lignee nei tetti in Italia centro meridionale. Limiti e prospettive*, in *Tampone* (2005), pp. 19-23.
- ROMANELLI F. (2001), *L'origine dell'umidità nella Basilica di S. Vitale a Roma. Analisi degli scambi termogrignometrici tra muratura e ambiente*, Gangemi, Roma.
- ROMEO C. (1999), *La termografia per la conoscenza del manufatto edilizio*, in "L'Edilizia", 5-6, pp. 52-5.
- ID. (a cura di) (2006), *Ex Monastero e Chiesa della SS. Annunziata in Tredozio (FC). Anamnesi, studi e diagnostica per la conoscenza e la conservazione del complesso monumentale*, Faenza Editrice, Faenza, pp. 115-96.
- RÖMICH H. (2000), *Simulation of Corrosion Phenomena of Historical Glasses on Model Glasses: An Update*, in "Rivista della stazione sperimentale del vetro", 6, pp. 9-14.
- ROSINA E., LUDWIG N., REDAELLI V. (s.d.), *Metodi per la misura dell'umidità nei materiali dell'edilizia storica: legno e intonaci* (www.termolab.it).
- ROSINA E., ROSI L., RIPA L., SANITARIO N. (1997), *Il monitoraggio termovisivo per il rilievo dell'umidità: l'oratorio della "Guardia di sotto" a Corsico, in Conferenza nazionale sulla prove non distruttive. Monitoraggio, diagnostica*, Atti del IX Congresso nazionale dell'AIPND (Padova, 25-27 settembre 1997), AIPND PadovaFiere, s.l., pp. 99-119.
- ROSSI MANARESI R., RICCOMINI E. (a cura di) (1971), *La conservazione delle sculture all'aperto*, Atti del convegno internazionale (Bologna, 23-26 ottobre 1969), Edizioni Alfa, Bologna.
- SACCO F. (1993), *Il problema della documentazione grafica dei restauri*, in "Materiali e Strutture", 3, pp. 25-34.
- ID. (2002), *Sistematica della documentazione e progetto di restauro*, in "Bollettino ICR", n.s., 4, pp. 28-53.
- ID. (2006), *A cosa serve la documentazione dei restauri?*, in "Geomedia", x, 1, Speciale Archeomatica, pp. 6-12.
- SACERDOTE F., TUCCI G. (a cura di) (2007), *Sistemi a scansione per l'architettura e il territorio*, Alinea, Firenze.
- SALEMI A. (2000), *Il recupero e la conservazione delle fabbriche tradizionali: le patologie da umidità*, Gangemi, Roma.
- SALIMBENI R., PINI R., SIANO S. (2005), *The Project OPTOCANTIERI: a Synergy between Laser Techniques and Information Science for Arts Conservation*, in K. Dickmann, C. Fotakis, J. F. Asmus (eds.), *Lasers in the Conservation of Artworks*, Lacona v Proceedings (Germany, Osnabrück 2003), Springer, Berlin-Heidelberg, pp. 389-93.
- SALONIA P. (2000), *Patrimonio storico monumentale e tecnologie dell'informazione: il sistema ARKIS*, in "Ricerca e futuro", Bollettino del CNR, 17 (<http://www.area.fi.cnr.it/r&f/n17/index.htm>).
- SALONIA P., NEGRI A. (2001), *Conservazione del patrimonio costruito storico: un sistema per l'integrazione e la gestione di dati eterogenei*, in *Usi e consumi dell'informazione geografica*, Atti della III Conferenza MondoGis (Roma, 23-25 maggio 2001), MondoGis, Roma, pp. 189-94.
- SANPAOLESI P. (1973), *Discorso sulla metodologia generale del restauro dei monumenti*, EDAM, Firenze.

- SANSONETTI A. (1999), *I metalli in architettura ed i relativi processi di degrado*, in “Recuperare l’Edilizia”, 2, 10, pp. 48-53.
- ID. (2002), *Il supporto della diagnostica per gli interventi di conservazione: problematiche e potenzialità*, in *La conservazione delle facciate edili: tecnologie di punta per i beni culturali e gli edifici di pregio*, Atti del convegno (Milano, 24 settembre 2002), ASSOTEC, Milano, pp. 18-32.
- SANSONETTI A., CONTI C., COLOMBO C. (2005), *L’utilizzo dei raggi x nella diagnostica per i beni architettonici: diffrazione e fluorescenza*, in “Recupero e conservazione”, 62, pp. 64-6.
- SANTAMARIA U., MLYNHARSKA K., MORRESI F. (2006), *L’importanza dello studio dei materiali e dei prodotti per il restauro dagli anni Trenta alla pubblicazione della Teoria del Restauro di Brandi*, in M. Andaloro (a cura di), *La teoria del restauro nel Novecento da Riegl a Brandi*, Atti del convegno internazionale di Studi (Viterbo, 12-15 novembre 2003), Nardini, Firenze, pp. 259-68.
- SANTOPUOLI N. et al. (2000), *Intonaci e coloriture per il centro storico: dall’analisi a vista al rilievo per il restauro*, in “Dossier: idee, strumenti e materiali per il progetto”, 2, pp. 5-26.
- SCHMID W. (ed.) (2000), *GraDoc. Graphic Documentation Systems in Mural Painting Conservation*, Atti del seminario (Roma, 16-20 novembre 1999), ICCROM, Roma.
- Scienza e restauri. Applicazioni di tecniche scientifiche di indagini per lo studio e la conservazione dei manufatti di interesse storico-artistico* (1999), Atti del convegno di studio (Firenze, febbraio-maggio 1998), in “OPD restauro”, II.
- SCOPPOLA F., VORDEMANN S. D. (1998), *Palazzo Altemps. Museo Nazionale Romano*, Mondadori Electa, Milano.
- SERACINI M. et al. (2005), *Indagini scientifiche sugli apparati decorativi e sulle fasi edilizie di due monumenti fiorentini in vista del loro restauro: metodologie e risultati*, in G. Biscontin, G. Driussi (a cura di), *Sulle pitture murali: riflessione, conoscenze, interventi*, Atti del convegno di studi (Bressanone, 12-15 luglio 2005), Arcadia Ricerche, Venezia, pp. 169-85.
- SETTE M. P. (1998), *Gubbio, connessioni meccanizzate sulla Piazza Grande*, in “TeMa”, 1, pp. 45-9.
- SETTIS S. (2002), *L’illusione dei beni digitali*, in “Bollettino ICR”, 5, pp. 18-20 e in Id., *Italia SPA. L’assalto al patrimonio culturale*, Einaudi, Torino, pp. 67-77.
- SEVERINO E. (2005), *Tecnica e architettura*, Raffaello Cortina, Milano.
- SIANO S., SALIMBENI R. (2007), *Sistemi e metodologie laser per il restauro dei beni culturali*, in A. Ferrari, P. A. Vigato, *Spazio tecnologico della ricerca. Ricognizione delle tecnologie per il patrimonio culturale*, Editrice Uni Service, Firenze, pp. 197-9.
- SPAGNESI G. (1989), *Una storia per gli architetti*, Carocci, Roma.
- ID. (1995), *Lezioni di restauro architettonico*, Jaca Book, Roma.
- ID. (2007), *Introduzione al restauro delle architetture della città e del territorio*, Studium, Roma.
- SPATAFORA G., TOMASELLI F., VENTIMIGLIA G. M. (2006), *Conoscenza e diagnostica per il progetto di conservazione delle pavimentazioni maiolicate. Applicazione di un sistema d’indagini non distruttive sulle “riggiole” di Attanasio nel Palazzo Comitini a Palermo*, in Biscontin, Driussi (2006), pp. 403-13.
- SPERANDIO A., ZANDER P. (a cura di) (1999), *La tomba di san Pietro: restauro e illuminazione della necropoli*, Electa, Milano.

- SPIAZZI A. M. (1998), *Alcune riflessioni a margine della storia dei restauri della Cappella degli Scrovegni*, in *La Cappella degli Scrovegni* (1998), pp. 16-7.
- STEVAN A. G. (2003), *Gli impianti tecnologici della Cappella e del Corpo Tecnologico Attrezzato*, in Basile (2003), pp. 164-70.
- TAMANTI G. (a cura di) (2003a), *Gli affreschi di San Pietro in Valle a Ferentillo. Le storie dell'antico e del nuovo testamento*, Electa, Napoli.
- ID. (2003b), *Il cantiere di restauro*, in Id. (2003a), pp. 205-7.
- TAMPONE G. (1987), *Il materiale legno e i manufatti*, in Id. (a cura di), *Legno nel restauro e restauro del legno*, Atti del congresso nazionale (Firenze, 30 novembre-3 dicembre 1983), Palutan, Milano, vol. 2, pp. 1-86.
- ID. (a cura di) (1989), *Legno e restauro: ricerche e restauri su architetture e manufatti lignei*, Messaggerie toscane, Firenze.
- ID. (a cura di) (1990), *Il restauro del legno*, Atti del II congresso nazionale del restauro del legno (Firenze, 30 novembre-3 dicembre 1983), 2 voll., Nardini, Firenze.
- ID. (1996), *Il restauro delle strutture di legno*, Hoepli, Milano.
- ID. (2001), *Acquaintance of the Ancient Timber Structures*, in Lourenço, Roca (2001), pp. 117-44.
- ID. (2002a), *Copertura e controsoffitto lignei tardo ottocenteschi*, in Tampone, Mannucci, Macchioni (2002), pp. 144-57.
- ID. (2002b), *Rappresentazione delle strutture di legno antiche*, in Tampone, Mannucci, Macchioni (2002), pp. 184-91.
- ID. (a cura di) (2005), *Conservation of Historic Wooden Structures*, Collegio degli Ingegneri della Toscana, Firenze.
- TAMPONE G. *et al.* (a cura di) (2002), *Strutture di legno: cultura conservazione restauro*, de Lettera, Milano.
- TAMPONE G., MANNUCCI M., MACCHIONI N. (2002), *Strutture di legno. Struttura conservazione restauro*, de Lettera, Milano.
- TESTA G. (a cura di) (1996), *La Cappella Nova o di San Brizio nel Duomo di Orvieto*, Rizzoli, Milano.
- TEXIER A. (2000), *Les armatures de verrières: quel traitement de conservation? Quel matériau de substitution?*, in "Corpus vitrearum newsletter", 47, pp. 55-7.
- TINININI L. (1999), *La sperimentazione sulle barriere chimiche*, in "TeMa", 2, pp. 47-56.
- TOMASELLI F. (2000), *La Zisa di Palermo: un problema di umidità conseguente all'uso di prodotti acrilici*, in Biscontin, Driussi (2000), pp. 181-8.
- TORRACA G. (1982a), *Porous Building Materials: Materials Science for Architectural Conservation*, ICCROM, Roma.
- ID. (1982b), *The Scientist's Role in Historic Preservation with Particular Reference to Stone Conservation*, in *Conservation in Historic Preservation with Particular Reference to Stone Buildings and Monuments*, National Academy Press, Washington D. C., pp. 13-21 (trad. it. *Il ruolo dello scienziato nella conservazione dei monumenti con particolare riferimento alla conservazione della pietra*, in Id., 2001, pp. 53-8).
- ID. (1986), *Definizione delle proprietà richieste per le materie prime (leganti e inerti) e i prodotti finali (malte e intonaci)*, in Bureca, Palandri (1986), p. 107.
- ID. (1988), *Il progetto di restauro tra artigianato e industria. Lo studio scientifico e la documentazione*, in Biscontin, Vassallo, Volpin (1988), e in Id. (2001), pp. 101-10.

- ID. (1990), *Problemi di conservazione delle superfici murarie esterne*, in Biscontin, Volpin (1990), pp. 13-26.
- ID. (1995), *La pulitura delle facciate in pietra: necessità della conservazione e immagine del monumento*, in Biscontin, Driussi (1995), pp. 1-7.
- ID. (1997), *Scienza e tecnologia della conservazione architettonica*, in *Science and Technology for Architectural Conservation*, in *The Health of Our Heritage*, Atti del II convegno nazionale sul restauro (Bath, May 9, 1997), Royal Institute of British Architects, London, pp. 3-8 (e in Id., 2001, pp. 196-207).
- ID. (2001), *La cura dei materiali nel restauro dei monumenti*, a cura di M. P. Sette, Scuola di specializzazione per lo studio ed il restauro dei monumenti, Università degli Studi di Roma "La Sapienza", Bonsignori, Roma.
- ID. (2002), *Lezioni di scienza e tecnologia dei materiali per il restauro dei monumenti*, Scuola di specializzazione per lo studio ed il restauro dei monumenti, Università degli Studi di Roma "La Sapienza", Bonsignori, Roma.
- ID. (2008), *Scienza, tecnologia e restauro*, in Carbonara (2008), pp. 1-39.
- TORSELLO A. (1997), *Una proposta di sistema per la gestione dei rilievi*, in M. Fresa (a cura di), *Santa Maria del Giglio: il restauro della facciata*, Marsilio, Venezia, pp. 85-93.
- TORSELLO B. P. (a cura di) (1979), *Misura e conservazione: tecniche di rilevamento*, Cluva, Venezia.
- ID. (1988), *La materia del restauro. Tecniche e teorie analitiche*, Marsilio, Venezia.
- ID. (2006), *Figure di pietra. L'architettura e il restauro*, Marsilio, Venezia.
- TORSELLO B. P., MUSSO S. F. (2003), *Tecniche di restauro architettonico*, 2 voll., UTET, Torino.
- TOSTI G. (2003), *Complesso monumentale dell'abbazia di S. Pietro – Perugia*, in Rocchi (2003), pp. C536-C541.
- TRECCANI G. P. (2000), *Iper testo e progetto di conservazione*, in G. Cavagnini (a cura di), *Atti della giornata di studio* (Vilminore di Scalve, 26 novembre 1998), suppl. al periodico "La voce delle comunità della Valle di Scalve", 1 (<http://www.scalve.it/giornatastudio/Indice1.html>).
- ID. (2006), *Meglio curare che prevenire. Per una manutenzione del costruito modulata sul soggetto*, in "Ανάγκη", n.s., 47, pp. 110-7.
- TRIVELLA F. (1999), *Umidità capillare e barriere chimiche*, in "Recuperare l'edilizia", 8, pp. 36-9.
- TRIZIO I. (2007), *Sperimentazione di tecniche di rilevamento archeologico in edifici benedettini della Marsica. Problemi di metodo, applicazioni e risultati: il caso-studio di Santa Maria in Valle Porclaneta*, tesi di dottorato in Archeologia medievale, Università degli Studi dell'Aquila (tutors: proff. D. Fiorani, F. Redi), ciclo XVIII.
- URBANI G. (a cura di) (1973), *Problemi di conservazione*, Compositori, Bologna.
- ID. (1982), *La scienza e l'arte della conservazione dei beni culturali*, in "Ricerche di Storia dell'Arte", 16, pp. 7-10 (e in Id., 2000, pp. 43-8).
- ID. (2000), *Intorno al restauro*, a cura di B. Zanardi, Skira, Milano.
- UTICA G. (1991), *Specifiche tecniche per opere di conservazione e restauro: per un capitolato speciale d'appalto*, Facoltà di Architettura, Università degli Studi di Firenze, Firenze.
- UZIELLI L. (2002), *La classificazione del legname strutturale*, in "L'Edilizia", 4, pp. 60-73.

- VALENTINI M. (1999a), *Rassegna delle tecniche di risanamento delle murature*, in "TeMa", 2, pp. 24-32.
- ID. (1999b), *Sistema ad elettrosmosi: piccolo è meglio*, in "TeMa", 2, pp. 61-6.
- VALENTINI M., SALA G. (1992), *Un'indagine mirata alla determinazione dell'umidità e dei flussi di vapore (Cappella Portinari, Sant'Eustorgio, Milano)*, in *3<sup>a</sup> Conferenza internazionale sulle prove non distruttive, metodi microanalitici e indagini ambientali per lo studio e la conservazione delle opere d'arte*, Atti del convegno (Viterbo, 4-8 ottobre 1992), BetaGamma, Viterbo, vol. 2, sez. III, pp. 1097-113.
- VALLUZZI M. R. (2003), *Consolidamento e recupero delle murature*, Faenza Editrice, Faenza.
- EAD. (2006), *Consolidamento di murature in pietra. Iniezioni di calce idraulica naturale*, Faenza Editrice, Faenza.
- VANTANGOLI L. (1988), *Il contenuto della salinità nelle murature. Sistemi per garantire l'equilibrio asciutto degli intonaci*, in Gelsomino (1988), pp. 121-4.
- VARAGNOLI C. (1996), *La materia degli antichi edifici*, in Carbonara (1996a), vol. 1, pp. 303-470.
- VAZIO C. (2002), *La Cappella Contarelli in San Luigi dei Francesi a Roma. Nuove acquisizioni dopo il restauro*, in "Kermes", XV, 45, pp. 23-32.
- VENIALE F., LODOLA S. (2005a), *Analisi dei materiali (litotipi e malte)*, in S. Settis *et al.* (a cura di), *La torre restituita*, numero speciale del "Bollettino d'Arte", n.s., 3, pp. 19-34.
- IDD. (2005b), *Materiali costitutivi dei paramenti e degli elementi architettonici*, in S. Settis *et al.* (a cura di), *La torre restituita*, numero speciale del "Bollettino d'Arte", n.s., 3, pp. 289-327.
- VENTRIGLIA U. (2002), *Geologia del territorio del Comune di Roma*, Amministrazione provinciale di Roma, Roma.
- VESCOVO F. (1990), *Accessibilità e barriere architettoniche: raccolta sistematica e commentata della normativa con guida tecnica alla progettazione degli spazi accessibili*, Maggioli, Rimini.
- VIANELLO F. (2006), *Il degrado dei materiali lapidei*, in "Kermes", XIX, 19, 63, pp. 65-72.
- VIDALE M. (2007), *Ceramica e archeologia*, Carocci, Roma.
- VIGGIANI C. (2005), *La Torre di Pisa è stata stabilizzata?*, in "L'Edilizia", 5, pp. 24-33.
- VIGGIANI C., SQUEGLIA N. (2006), *Gli interventi di stabilizzazione definitiva*, in S. Settis *et al.* (a cura di), *La torre restituita*, numero speciale del "Bollettino d'Arte", n.s., 2, pp. 155-77.
- VIGLIANO G. (2003), *Indagini chimiche e mineralogiche*, in Tamanti (2003a), pp. 229-43.
- VIGNALI F. (1983), *Rilevamento e diagnosi dell'umidità ascendente*, in Ballandi *et al.* (1983), pp. 251-2.
- ID. (1988), *Il risanamento da umidità ascendente con resine siliconiche*, in Gelsomino (1988), pp. 133-6.
- VINCENZINI P. (ed.) (1995), *Ceramics in Architecture*, Proceedings of the International Symposium on Ceramics in Architecture of the 8th. CIMTEC-World Ceramics Congress and Forum on New Materials (Florence, June 28-July 1, 1994), Techna, Faenza.
- VINCI R. (1992), *L'umidità ascendente nelle murature. Il risanamento e la qualità. La*

- ricerca per la conoscenza dei fenomeni di degrado quale strumento per una più corretta progettazione tecnologica*, in “Recuperare”, XI, 2, pp. 114-21.
- VISCOGLIOSI A., BORGHINI S., CARLANI R. (2006), *L'uso delle ricostruzioni tridimensionali nella storia dell'architettura: immaginare la Domus Aurea*, in L. Haselberger (ed.), *Imaging Ancient Rome: Documentation, Visualization, Imagination*, in “Journal of Roman Archaeology”, Supplementary series, 61, pp. 207-19.
- VITALE M. R. (2006), *Il secolo dell'anno Duemila. Il restauro dei monumenti in Francia fra tradizione e modernità*, in “Materiali e Strutture”, IV, 7-8, pp. 170-205.
- VLAD BORRELLI L. (2003), *Restauro archeologico. Storia e materiali*, Viella, Roma.
- ZANDER G. (1993), *Scritti sul restauro dei monumenti architettonici*, Scuola di specializzazione per lo studio ed il restauro dei monumenti, Università degli Studi di Roma “La Sapienza”, Bonsignori, Roma.
- ZANON P., PIAZZA M. (2001), *Analisi preliminari, controlli, interventi sugli elementi lignei nel progetto di conservazione*, in S. Pesenti (a cura di), *Il progetto di conservazione: linee metodologiche per le analisi preliminari, l'intervento, il controllo di efficacia*, Alinea, Firenze, pp. 460-71.
- ZARFATI A. (2001a), *Impianti di sicurezza*, in Carbonara (2001a), vol. 2, pp. 253-346.
- EAD. (2001b), *Impianti per l'eliminazione delle barriere architettoniche*, in Carbonara (2001a), vol. 2, pp. 463-83.
- ZONCA A., GERMANINO G. (2000), *Novara: la basilica e la cupola di San Gaudenzio. Un modello complesso di monitoraggio strutturale*, in “Recupero e conservazione”, 35, pp. 80-7.

### Raccomandazioni e norme

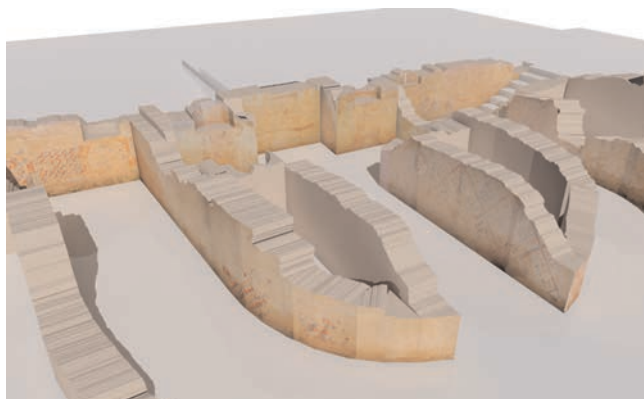
- CNR, DT 200:2004, *Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione e il controllo di interventi di consolidamento statico mediante l'utilizzo di compositi fibrorinforzati*, CNR, Roma.
- CNR, DT 201:2005, *Studi preliminari finalizzati alla redazione di istruzioni relative a interventi di consolidamento statico di strutture lignee mediante l'utilizzo di compositi fibrorinforzati*, CNR, Roma.
- CNR, DT 205:2007, *Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di strutture realizzate con profili sottili pultrusi di materiale composito fibrorinforzato*, CNR, Roma.
- NORMAL *Raccomandazioni* 3:1980, *Materiali lapidei: campionamento*, CNR-ICR, Roma.
- NORMAL *Raccomandazioni* 10:1982, *Descrizione Petrografica dei Materiali Lapedei Naturali*, CNR-ICR, Roma.
- NORMAL *Raccomandazioni* 14:1983, *Sezioni Sottili e Lucide di Materiali Lapedei: Tecnica di Allestimento*, CNR-ICR, Roma.
- UNI 8458:1983, *Edilizia. Prodotti lapidei. Terminologia e classificazione*.
- UNI 8681:1984, *Edilizia. Prodotti per sistemi di verniciatura, pitturazione, RPAC, tinteggiatura e impregnazione superficiale. Criteri generali di classificazione*.
- UNI 8942:1986, *Edilizia. Prodotti di laterizio per murature. Terminologia e sistema di classificazione*.
- UNI 8942:1986, *Edilizia. Prodotti di laterizio per murature. Limiti di accettazione*.
- UNI 8942:1986, *Edilizia. Prodotti di laterizio per murature. Metodi di prova*.
- UNI-ENV 1-2:1995, EUROCODICE 5: *Progettazione delle strutture in legno. Parte 1-2*.
- UNI 10739:1998, *Beni culturali – Tecnologia ceramica – Termini e definizioni*.

- UNI 10813:1999, *Beni culturali – Materiali lapidei naturali ed artificiali – Verifica della presenza di microrganismi fotosintetici su materiali lapidei mediante determinazione spettrofotometrica UV/VIS delle clorofille.*
- UNI 10829:1999, *Beni di interesse storico e artistico – Condizioni ambientali di conservazione – Misurazione e analisi.*
- UNI 10859:2000, *Beni culturali – Materiali lapidei naturali ed artificiali – Determinazione dell'assorbimento dell'acqua per capillarità.*
- UNI 10921:2001, *Beni culturali – Materiali lapidei naturali ed artificiali – Prodotti idrorepellenti – Applicazione su provini e determinazione in laboratorio delle loro caratteristiche.*
- UNI 10922:2001, *Beni culturali – Materiali lapidei naturali ed artificiali – Allestimento di sezioni sottili e sezioni lucide di materiali lapidei colonizzati da biodeteriogeni.*
- UNI 10923:2001, *Beni culturali – Materiali lapidei naturali ed artificiali – Allestimento di preparati biologici per l'osservazione al microscopio ottico.*
- UNI 10924:2001, *Beni culturali – Malte per elementi costruttivi e decorativi – Classificazione e terminologia.*
- UNI 10925:2001, *Beni culturali – Materiali lapidei naturali ed artificiali – Metodologia per l'irraggiamento con luce solare artificiale.*
- UNI 10945:2001, *Beni culturali – Caratterizzazione degli strati pittorici – Generalità sulle tecniche analitiche impiegate.*
- UNI 10969:2001, *Beni culturali – Principi generali per la scelta ed il controllo del microclima per la conservazione dei beni culturali in ambienti interni.*
- UNI 11060:2003, *Beni culturali – Materiali lapidei naturali ed artificiali – Determinazione della massa volumica e della percentuale dei vuoti.*
- UNI 11084:2003, *Beni culturali – Materiali ceramici. Caratterizzazione.*
- UNI 11085:2003, *Beni culturali – Materiali lapidei naturali ed artificiali – Determinazione del contenuto d'acqua. Metodo ponderale.*
- UNI 11086:2003, *Beni culturali – Materiali lapidei naturali ed artificiali – Determinazione del contenuto d'acqua di equilibrio.*
- UNI 11087:2003, *Beni culturali – Materiali lapidei naturali ed artificiali – Determinazione del contenuto di sali solubili.*
- UNI 11088:2003, *Beni culturali – Malte storiche e da restauro – Caratterizzazione chimica di una malta. Determinazione del contenuto di aggregato siliceo e di alcune specie solubili.*
- UNI 11089:2003, *Beni culturali – Malte storiche e da restauro – Stima della composizione di alcune tipologie di malte.*
- UNI 9916:2004, *Vibrazioni meccaniche ed arti – Metodo di misura delle vibrazioni negli edifici al fine della valutazione del disturbo.*
- UNI 11118:2004, *Beni culturali – Manufatti lignei – Criteri per l'identificazione delle specie legnose.*
- UNI 11119:2004, *Beni culturali – Manufatti lignei – Strutture portanti degli edifici – Ispezione in situ per la diagnosi degli elementi in opera.*
- UNI 11120:2004, *Beni culturali – Misurazione in campo della temperatura dell'aria e della superficie dei manufatti.*
- UNI 11121:2004, *Beni culturali – Materiali lapidei naturali ed artificiali – Determinazione in campo del contenuto di acqua con il metodo al carburo di calcio.*
- UNI 11130:2004, *Beni culturali – Manufatti lignei – Terminologia del degradamento del legno.*



- UNI 11138:2004, *Beni culturali – Manufatti lignei – Strutture portanti degli edifici – Criteri per la valutazione preventiva, la progettazione e l'esecuzione di interventi.*
- UNI 11139:2004, *Beni culturali – Malte storiche – Determinazione del contenuto di calce libera e di magnesio libera.*
- UNI 11140:2004, *Beni culturali – Malte storiche – Determinazione del contenuto di anidride carbonica.*
- UNI 11141:2004, *Beni culturali – Manufatti lignei – Linee guida per la datazione dendrocronologica del legno.*
- UNI 11131:2005, *Beni culturali – Misurazione in campo dell'umidità dell'aria.*
- UNI 11161:2005, *Beni culturali – Manufatti lignei – Linee guida per la conservazione, il restauro e la manutenzione.*
- UNI 11162:2005, *Beni culturali – Beni culturali – Manufatti lignei – Supporti dei dipinti su tavola – Terminologia delle parti componenti.*
- UNI 11182:2006, *Beni culturali – Materiali lapidei naturali ed artificiali – Descrizione della forma di alterazione – Termini e definizioni (revisione e aggiornamento della norma UNI 1/88, già 1/80).*

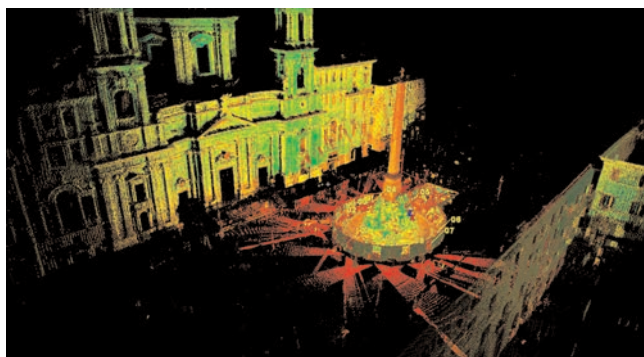




a) Modello 3D della cripta anulare di S. Vincenzo al Volturno, con il montaggio degli affreschi (elaborazione di L. Cantalini e A. Placidi).

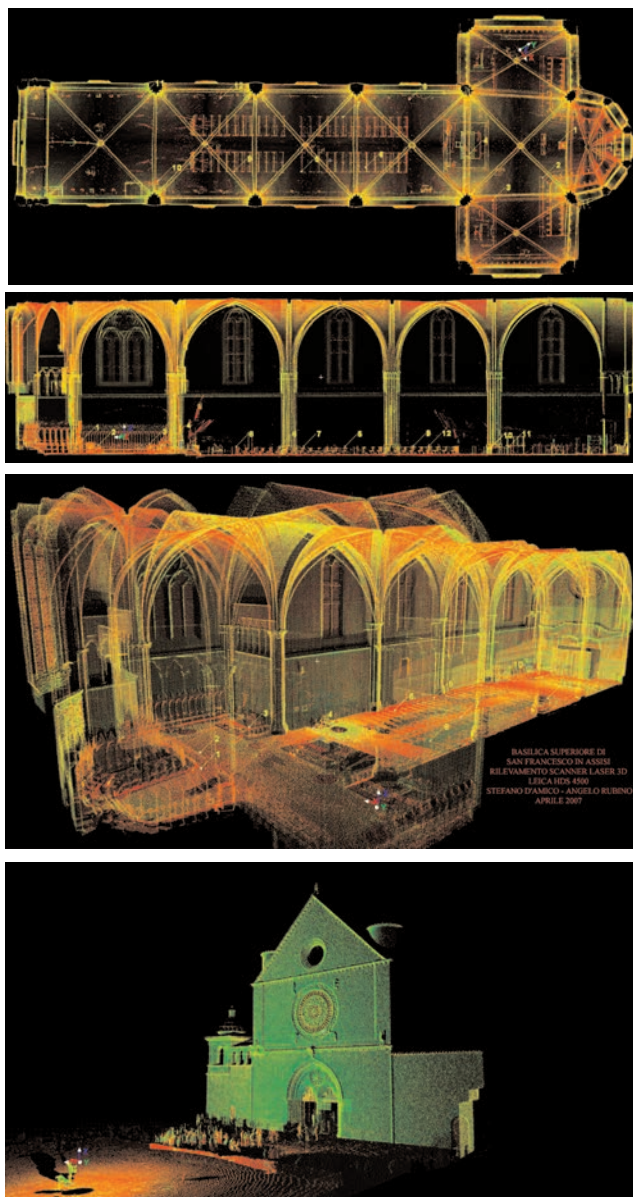


b) Ricostruzione virtuale del Tempio di Giove Capitolino sul Campidoglio (Studio Altair 4 – Roma).



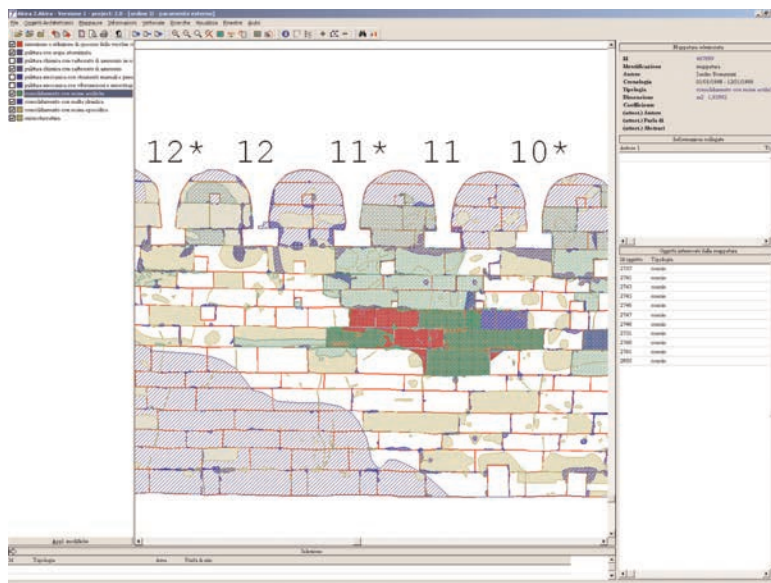
c) Roma, Fontana dei Fiumi in piazza Navona. Nel raggio d'azione dello strumento appare la facciata di S. Agnese in Agone, puntualmente restituita, mentre sono esclusi i lati corti della piazza. I numeri indicano i target posizionati per il montaggio delle scansioni effettuate girando intorno alla fontana, mentre i raggi corrispondono ai pannelli trasparenti nella recinzione del cantiere, dove lo strumento ha potuto “vedere” anche la pavimentazione.

Rilievo eseguito con scanner laser 3D (Leica HDS 4500/software Leica HDS Cyclone) da S. D'Amico con la collaborazione di A. Rubino (ISCR, 2008).



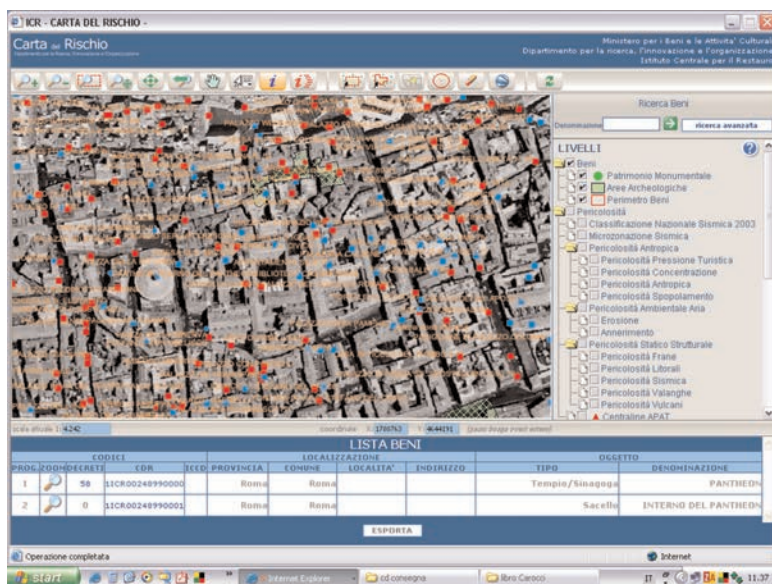
Assisi, basilica superiore di S. Francesco. Proiezioni ortogonali e vedute dell'interno e della facciata ricavate dalla nuvola di punti ottenuta con scanner laser 3D. I cerchi privi di punti individuabili sulla pavimentazione della basilica corrispondono alla posizione dello strumento nelle varie scansioni effettuate, mentre i numeri indicano i target per l'operazione di *merge* (Scanner Leica HDS 4500/software Leica HDS *Cyclone*).

Rilievo di S. D'Amico con la collaborazione di A. Rubino (ISCR, 2007).



a) AKIRA GIS Server, il sistema informativo per la documentazione del restauro delle superfici lapidee della Torre di Pisa. Nella schermata si vede un particolare della muratura con gli interventi eseguiti; a lato, i livelli informativi contenuti nel database.

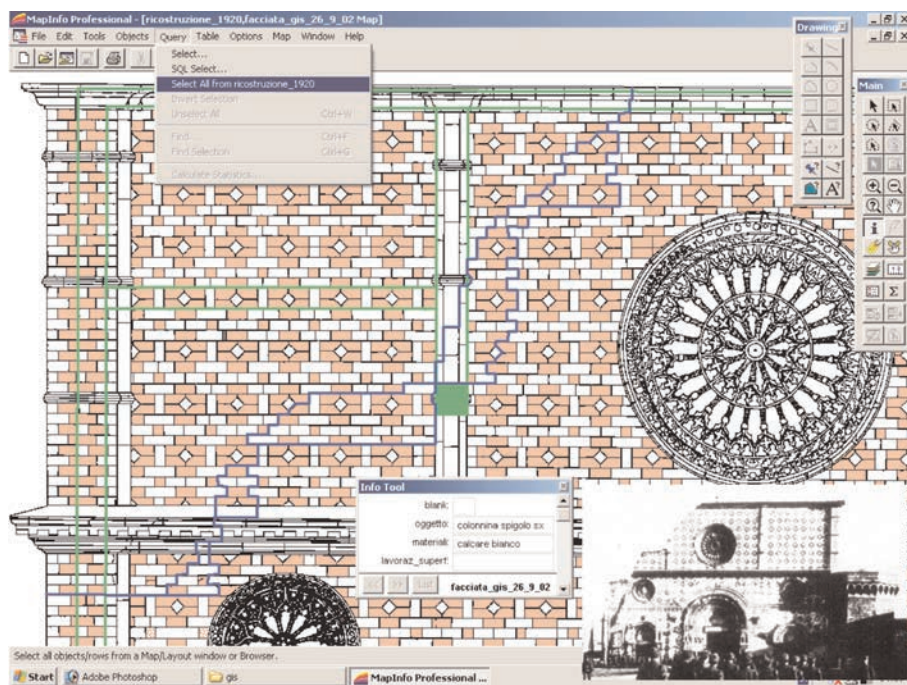
Fonte: D'Elia et al., (2005).



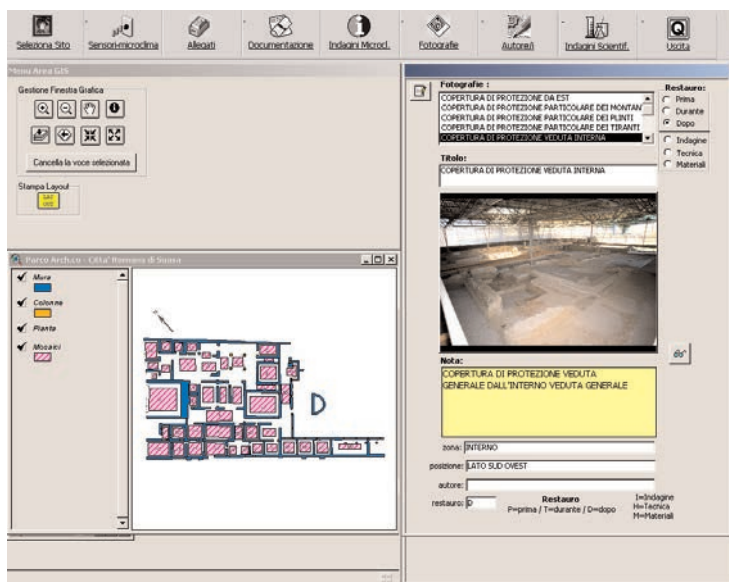
b) Una schermata della Carta del Rischio del patrimonio culturale: lo zoom inquadra una zona del centro di Roma (percorso Trevi-Pantheon). È evidente nell'immagine la particolare concentrazione di edifici di rilevante interesse storico-architettonico (indicati dai simboli rossi e blu). In basso sono disposte le informazioni presenti nel database, ovvero le schede sui monumenti.

Fonte: www.cartadelrischio.it.

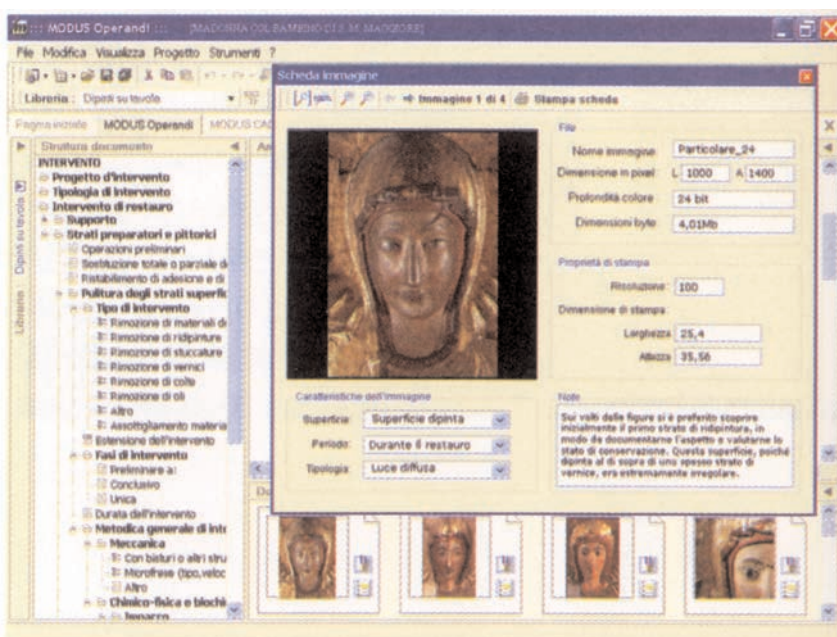




a) Una schermata della “cartella clinica” di S. Maria di Collemaggio all’Aquila. Si vede la parte superiore della facciata, smontata dopo il terremoto del 1915 e ricostruita nel 1920 ricomponendo i conci numerati del rivestimento su una nuova muratura realizzata con un telaio in calcestruzzo armato. In blu è disegnato il perimetro della parte demolita, in verde la struttura interna in cemento armato.

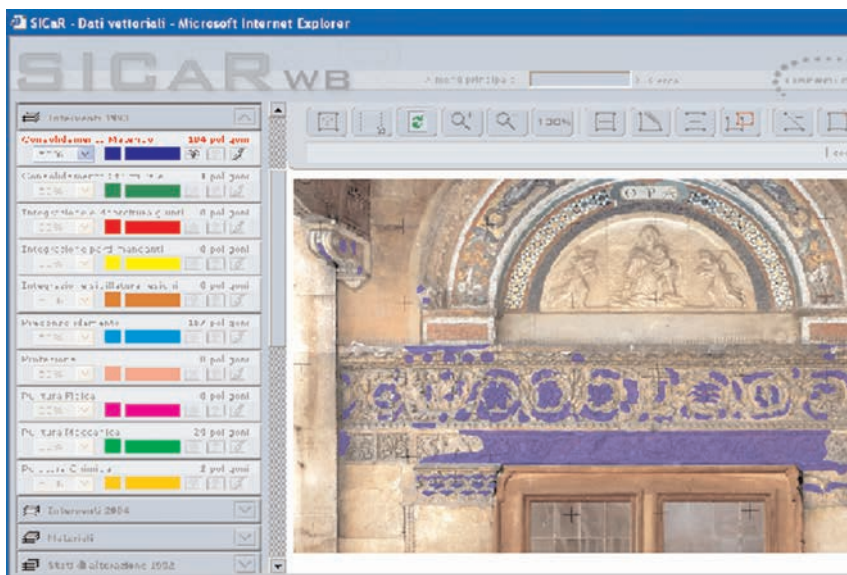


b) Il “gis dei restauri” realizzato per il sito archeologico della *domus* dei *Coiedii* a Castelleone di Susa, presso Ancona. Elaborazione di C. Cacace (ISCR, 2008).



a) *Modus Operandi*, il software per archiviare i dati relativi ad interventi di restauro.

Fonte: Chimenti (2003).



b) *SICAR w/b*, il sistema informativo per la gestione della documentazione dei cantieri di restauro. Nella schermata si vedono le informazioni sugli interventi eseguiti sulla porta di S. Ranieri nella cattedrale di Pisa e le mappature evidenziate sulla base fotografica.

Fonte: Baracchini *et al.* (2007).





a) Murature a graticcio ligneo e riempimento in terra a Tarakli, Sakarya (Turchia).

Fonte: Chimenti (2003).



b) Murature in mattoni di terra (*adobe*) a Serrenti (Cagliari).



c) Cinta muraria in terra pressata (*pisé*) nella città di Marrakech (Marocco). Le mura, che hanno subito vari rifacimenti, risalgono al XII secolo.



d) Muratura in terra pressata (*pisé*) del Palais El Badia, del XVI secolo, a Marrakech (Marocco).



e) Muratura in arenaria rossa a Fathepur Sikri (India). La muratura, del XVI secolo, presenta conci lapidei che simulano una cortina laterizia.



f) Travertino romano, con le caratteristiche vacuolarità e stratificazioni. La giacitura verticale delle stratificazioni evidenzia l'uso non strutturale dell'elemento lapideo (lastra di rivestimento).





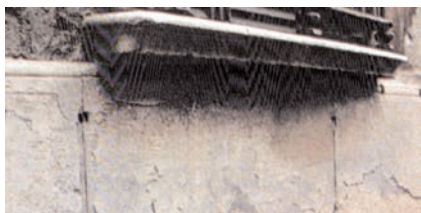
a) Calcare organogeno a Merida (Messico). La presenza di conchiglie nel materiale lapideo è visibile, in questo caso, ad occhio nudo.



c) Muratura in arenaria nella chiesa dei SS. Pietro e Paolo a Cesacastina (Teramo). Si nota la struttura granulare dell'arenaria, particolarmente vulnerabile ai fenomeni erosivi, tanto da facilitare la formazione di vistose esfoliazioni.



e) Lastre di basalto in un'antica pavimentazione romana (foto di M. De Meo).



f) Rivestimento murario in lastre di ardesia (foto di M. De Meo).



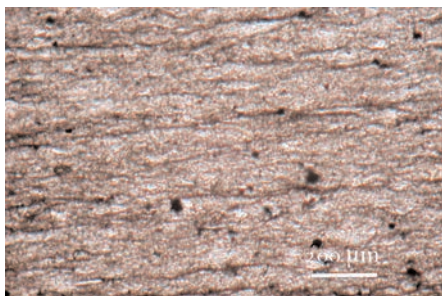
b) Il paramento lapideo della facciata di S. Maria di Collemaggio all'Aquila è caratterizzato da un disegno bicromo realizzato con conci in calcare bianco e rosa. Nel particolare si nota che alcuni elementi sono in breccia rosata, mentre la maggior parte dei conci è in calcare compatto.



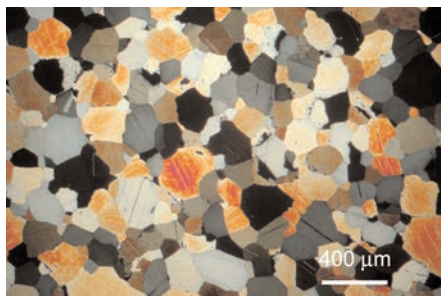
d) I cunicoli etruschi a Chiusi (Arezzo) sono scavati nel materiale lapideo costituito da banchi di tufo alternato a conglomerato con ciottoli.



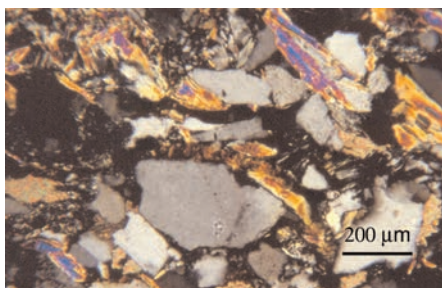
g) Muratura nel complesso del Qutb Minar di Delhi (India), del XII secolo. La muratura sembra realizzata con materiale di recupero, adattando conci molto diversi tra loro, e mostra una varietà di litotipi differenti, fra cui marmi di diverso colore.



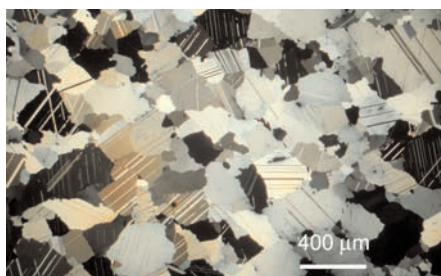
*a)* Sezione sottile (luce trasmessa non polarizzata). Si tratta di argillite marnosa debolmente metamorfica caratterizzata da sottilissimi livelli (piani di clivaggio) di minerali argillosi (livelli scuri) che, con andamento anastomizzante, circondano microliti calcitiche. La presenza di questi livelli argillosi permette la facile divisibilità in lastre (foto di F. Fratini).



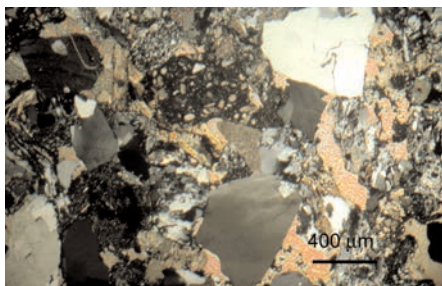
*b)* Sezione sottile (luce trasmessa polarizzata) di un marmo apuano, di origine metamorfica, con struttura di tipo granoblastico poligonale. Questo tipo di struttura – caratterizzata da contatti rettilinei fra i cristalli di calcite – rende il marmo particolarmente sensibile ai cicli termici (termoclastismo), sviluppando il cosiddetto fenomeno del “marmo cotto” in cui i cristalli tendono a distaccarsi gli uni dagli altri (foto di F. Fratini).



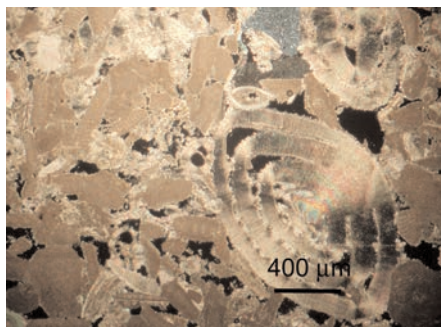
*c)* Immagine in sezione sottile (luce trasmessa polarizzata) di pietra serena delle cave di Fiesole (Firenze). Si tratta di un'arenaria in cui i clasti silicatici (quarzo e feldspati) sono legati da una matrice argillosa. Questo tipo di legame rende la roccia, di origine sedimentaria, poco durevole nei confronti degli agenti del degrado (foto di F. Fratini).



*d)* Immagine in sezione sottile (luce trasmessa polarizzata) di un marmo apuano, di origine metamorfica, con struttura di tipo xenoblastico a contatti suturati. Questo tipo di struttura – con contatti irregolari fra i cristalli di calcite – rende il marmo particolarmente resistente nei confronti del termoclastismo, perché i cristalli sono saldati più efficacemente (foto di F. Fratini).

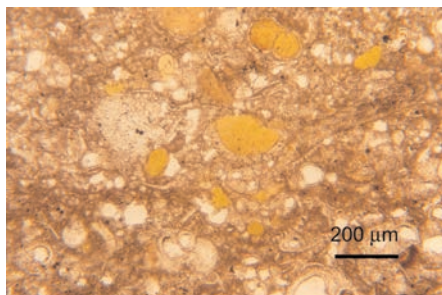


*e)* Immagine in sezione sottile (luce trasmessa polarizzata) di pietra serena delle cave del Fossato a Settignano (Firenze). Questa varietà di arenaria, proveniente da cave non più attive, è caratterizzata da clasti silicatici cementati da calcite spatica (calcite ben cristallizzata di colore rosaceo); questo tipo di legante rende la roccia più durevole rispetto alla varietà della figura precedente. Tali cave erano perciò “bandite” o, meglio, riservate a costruzioni di particolare rilevanza e a committenze speciali, quali la famiglia Medici (foto di F. Fratini).

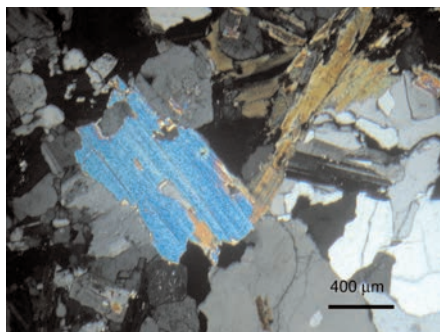


*f)* Immagine in sezione sottile (luce trasmessa polarizzata) della pietra di Vicenza. Si tratta di un calcare organogeno a grana grossa (roccia di origine sedimentaria, costituito da bioclasti (alghe calcaree e nummuliti) tenuti insieme da uno scarso legante di calcite micritica e subordinatamente spatica che lascia spazio ad un'evidente porosità (zone nere) (foto di F. Fratini).

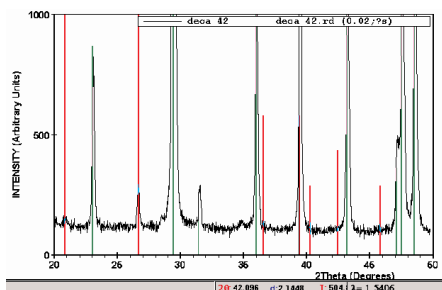




a) Immagine in sezione sottile (luce trasmessa non polarizzata) della pietra di Lecce. È un calcare organogeno a grana fine (anche detto “calcareone” o tufo calcareo) costituito da bioclasti (foraminiferi planctonici) legati da una matrice di calcite micritica. Sono evidenti noduli di glauconite (minerale silicatico ricco in ferro di colore verdastro) che spesso riempiono le camere dei fossili. Questa roccia è particolarmente vulnerabile al degrado a causa dell'elevata porosità, caratterizzata da pori di piccole dimensioni (foto di F. Fratini).



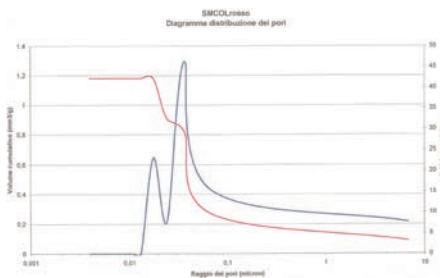
b) Immagine in sezione sottile (luce trasmessa polarizzata) di un granito, roccia di origine magmatica, proveniente dall'Irlanda. È evidente la struttura cristallina a grana grossa costituita da cristalli di quarzo e feldspati (minerali sui vari toni del grigio) e miche (muscovite di colore azzurro e biotite di colore bruno) (foto di F. Fratini).



c) Grafico con i risultati della diffrazione a raggi x (XRD) su un calcare rosa della cava di Genzano (L'Aquila). Le righe verdi evidenziano che il campione è costituito quasi prevalentemente da calcite, mentre le righe rosse rivelano la presenza di quarzo. Tale composizione trova riscontro nella pietra rosa presente sulla facciata di S. Maria di Collemaggio, confermando, di concerto con il confronto delle sezioni sottili, che tale cava sia la stessa utilizzata per il cantiere della basilica, come alcuni indizi storici avevano fatto ipotizzare (elaborazione di G. Torraca).



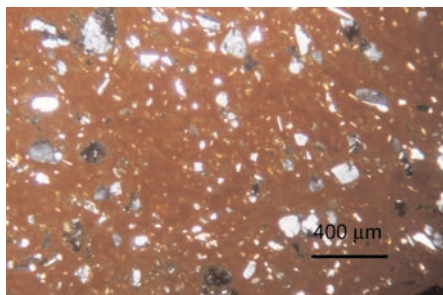
e) Paramento murario in laterizi a Venezia, con mattoni di colore giallastro poco cotti (foto di F. Fratini).



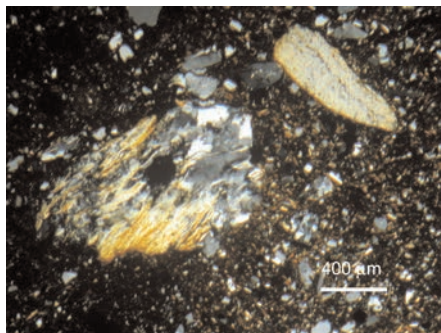
d) Grafico con i risultati della porosimetria al mercurio effettuata su un campione di calcare rosa della cava di Genzano (L'Aquila). La distribuzione porosimetria è maggiore nell'intervallo tra 0,01 e 0,1 micron (ossia la dimensione dei pori più sfavorevole per i fenomeni di gelività). La pietra rosa della facciata di Collemaggio si mostra, infatti, particolarmente vulnerabile al gelo (elaborazione di G. Torraca).



f) Paramento laterizio a Venezia; il mattone verdastro al centro è stato sottoposto a cottura eccessiva (foto di F. Fratini).



*a)* Immagine in sezione sottile (luce trasmessa polarizzata) di un mattone proveniente dalla struttura muraria del campanile del Duomo di Pietrasanta (Lucca): sono evidenti lo scheletro silicatico di fine granulometria e la pasta di fondo opaca, indice di una buona cottura (foto di F. Fratini).



*b)* Immagine in sezione sottile (luce trasmessa polarizzata) di un mattone proveniente dal paramento esterno dello stesso campanile (cfr. immagine *a*): sono evidenti lo scheletro con grossi granuli di rocce metamorfiche e la pasta di fondo leggermente birfrangente, indice di una cottura non ottimale (foto di F. Fratini).



*c)* Malta di allettamento a legante magnesiacco, dal caratteristico colore biancastro, in località Promontorio a Genova (foto di F. Fratini).



*d)* Malta con aggregato di cocchiopesto, visibile a occhio nudo, nel *calidarium* delle terme romane di Fiesole (Firenze) (foto di F. Fratini).

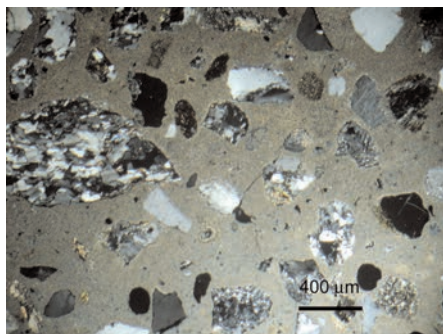


*e)* Malta di allettamento in terra a Lalibela (Etiopia), con inerti lapidei e fibre vegetali (foto di F. Fratini).

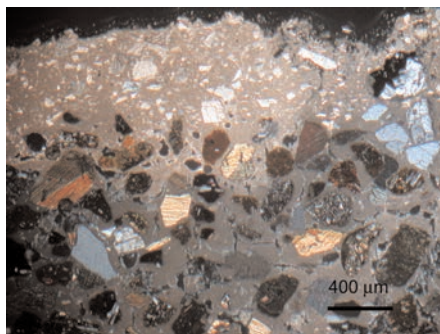


*f)* Malta di rivestimento, con trattamento a “raso-sasso”, su una torre della cinta muraria di Castelvecchio di San Gimignano (Siena). Le fessurazioni dovute al ritiro sono tipiche delle malte di calce aerea e non sono da considerarsi un fenomeno di degrado.

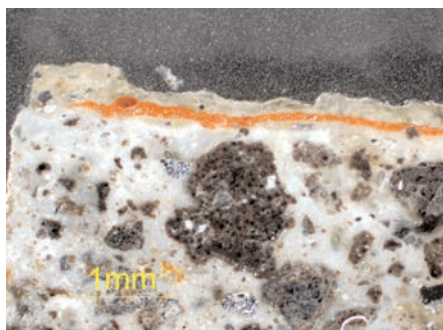




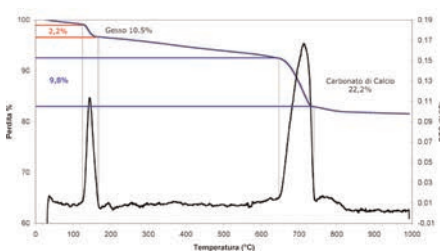
a) Immagine in sezione sottile (luce trasmessa polarizzata) di un campione di malta di allestimento proveniente dalla cupola del Duomo di Firenze. Sono evidenti l'abbondante legante e l'aggregato ben classato dal punto di vista granulometrico (foto di F. Fratini).



b) Immagine in sezione sottile trasversale (*cross section*, luce trasmessa polarizzata) di un campione di intonaco dell'edificio di Eumachia a Pompei. Sono evidenti i livelli dell'arriccio e della finitura. L'arriccio è realizzato con un impasto magro ben amalgamato in cui l'aggregato, costituito da pirosseni e frammenti di roccia vulcanica, risulta ben classato. La finitura ha un aggregato con granulometria più fine costituito esclusivamente da frammenti di calcite spatica (foto di F. Fratini).



c) Immagine in sezione lucida trasversale di un campione di intonaco con dipinti murali proveniente dalle catacombe di S. Tecla a Roma. Si osservano l'aggregato pozzolanico mal classato (molto disomogeneo) e l'assenza di un livello di finitura. Al di sopra del pigmento ocra ceo è presente un livello di concrezioni calcitiche (foto di F. Fratini).



d) Diagramma con i risultati dell'analisi termogravimetrica su un campione di malta di rivestimento della chiesa di S. Angelo a Nilo, Napoli. Sull'asse  $x$  è indicata la temperatura a cui è sottoposto il campione, sull'asse  $y$  la perdita di peso rilevata (in %); il tracciato superiore esprime la variazione di peso del campione (TGA), quello inferiore la velocità di variazione (DTG), che evidenzia due picchi, che identificano rispettivamente la presenza di gesso e di carbonato di calcio (elaborazione di G. Torraca).



e) Tinta a calce su un edificio ottocentesco all'Aquila; questo tipo di tinta è riconoscibile per la trasparenza e la tipica modalità di alterazione per scolorimento progressivo sulle superfici esposte a dilavamento.



*a)* Degrado meccanico: lesioni e fratturazioni sul paramento lapideo di S. Maria di Collemaggio all'Aquila. Esempio di interazione tra problemi strutturali (solicitazioni sismiche) e degrado delle superfici.



*c)* Degrado fisico-meccanico: fenomeno del "termoclastismo". La colonna in serpentinite, nella facciata della Badia Fiesolana (Firenze), è fratturata a causa delle dilatazioni termiche. In particolare, il colore scuro fa sì che il materiale assorba molto calore per irraggiamento ma la bassa conducibilità termica ostacola la trasmissione del calore all'interno; si creano quindi delle tensioni per dilatazione differenziale (foto di F. Fratini).



*e)* Degrado fisico: esfoliazioni dovute a gelività sulla pietra rosa della facciata di S. Maria di Collemaggio all'Aquila.



*b)* Degrado fisico-meccanico dovuto a fenomeni di dilatazione termica: particolare di una statua in marmo apuano sulla facciata del Duomo di Firenze; la rottura è dovuta alle dilatazioni termiche differenziali nel materiale anisotropo "marmo cotto" (foto di F. Fratini).



*d)* Degrado fisico: laterizi con fratture e scagliature dovute a fenomeni di gelività.



*f)* Degrado fisico-chimico: efflorescenze saline sull'intonaco, realizzato di recente, della Casina del cardinal Bessarione a Roma.





*a)* Degrado fisico-chimico: alveolizzazione in una muratura in arenaria a Gozo (Malta). In questo caso l'aerosol marino rappresenta una delle cause del fenomeno erosivo, dovuto a cristallizzazione salina.



*b)* Degrado fisico-chimico: erosione ed alveolizzazione sul portale della chiesa di Saint-Sauveur a La Rochelle (Francia). In questo caso, la presenza di croste nere fa pensare ad un'aggressione ambientale dovuta anche all'inquinamento.



*c)* Degrado chimico: erosione degli elementi scultorei più esposti all'azione meteorica sul portale della chiesa di S. Marciano all'Aquila. Si notano zone scure (probabili croste nere) e parti più sbiancate, dovute a dilavamento.



*d)* Degrado chimico: lisciviazione. La colonna in pietra serena (arenaria), nel chiostro del convento di S. Marco a Firenze, è interessata da fenomeni di esfoliazione dovuti alla formazione di una crosta superficiale, ricca in cemento calcitico, meno porosa, che tende a distaccarsi. Tali croste si formano per dissoluzione della calcite che si trova all'interno della pietra e successiva precipitazione nella porosità della parte più superficiale (foto di F. Fratini).



*e)* Degrado chimico: croste nere sul portale della chiesa di S. Maria di Paganica all'Aquila. Sono evidenti le parti dilavate, più chiare, e le parti scure, su cui si sono depositati gli elementi inquinanti.



*a)* Degrado chimico: probabile formazione di croste nere sulla torre campanaria di S. Maria di Paganica all'Aquila. Il deposito di polveri è evidente sulla parte sottostante la cornice, al riparo dell'azione dilavante delle acque meteoriche.



*b)* Degrado biologico: licheni su una muratura calcarea in zona extraurbana, nei dintorni dell'Aquila (Gran Sasso). Questo tipo di degrado è caratteristico delle zone poco inquinate.



*c)* Degrado biologico: patine scure di natura biologica su una muratura nel sito archeologico di Uxmal (Messico). La mancanza d'inquinamento nel sito e la particolare dislocazione delle zone scure sugli elementi più esposti all'acqua meteorica, prive di segni di dilavamento, lasciano intendere la natura biologica del fenomeno.



*d)* Degrado biologico: presenza di muschio su un calcare vacuolare, in cui le cavità hanno favorito la vegetazione.



*e)* Efflorescenze saline su una muratura recente in tufo e laterizi (CNR, area di ricerca di Roma 1). Si nota che la cristallizzazione salina è avvenuta in particolare sui laterizi che, per le loro caratteristiche di porosità, hanno assorbito in via preferenziale i sali contenuti nella malta cementizia.



*f)* Disgregazione dei laterizi dovuta ad un fenomeno particolarmente accentuato di cristallizzazione salina, in una muratura storica a Venezia (foto di F. Fratini).





a) Degrado delle piastrelle del chiostro di S. Chiara a Napoli, dovuto ad un attacco di alghe che ha interessato solo le parti chiare della decorazione, dove poteva penetrare la luce (foto di G. Torraca).



c) Un particolare attacco biologico degli intonaci è il fenomeno del *flos tectoris*. Nella foto un particolare di una superficie intonacata a Lussino (Croazia) (foto di F. Fratini).



e) Degrado di una pittura con effetto "pellicolante". L'uso di rivestimenti sintetici su murature antiche è di per se stesso causa di degrado, in quanto tali pitture hanno caratteristiche idrorepellenti che impediscono la normale traspirazione della muratura.



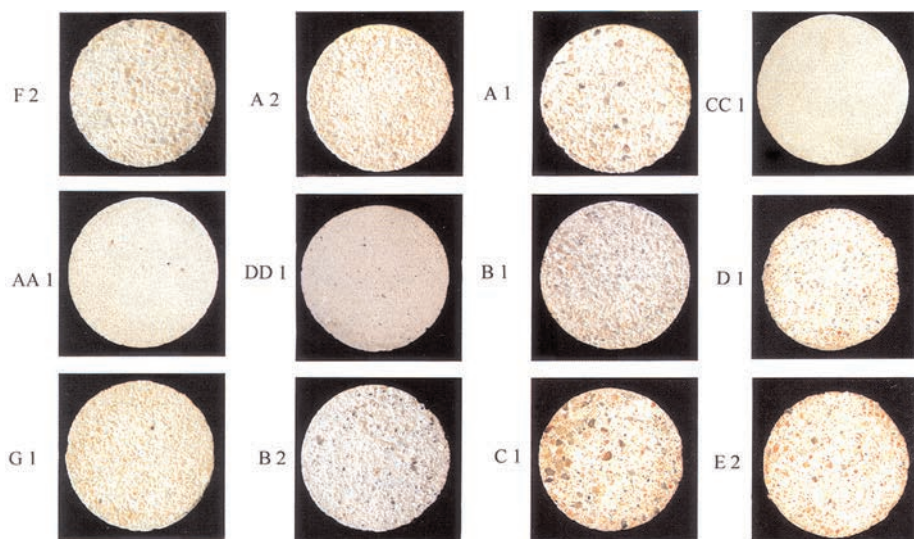
b) Degrado di una muratura in blocchi di terra a Goa (India). La caduta dell'intonaco ha favorito l'infiltrazione dell'acqua e una progressiva disgregazione della muratura, in seguito attaccata anche dalla vegetazione.



d) Degrado di una tinteggiatura dovuto a problemi d'incompatibilità con il supporto.



f) Degrado di un profilato metallico nella casa D'Annunzio a Pescara, dovuto all'accostamento con materiali non compatibili (malte di gesso). Il gesso ha determinato la corrosione di tutti gli elementi metallici del solaio, con evidenti segni di disgregazione.



a) Torre di Pisa: campioni delle differenti tipologie di malte (tutte a base di grassello di calce) utilizzati nelle stuccature; le varie composizioni cercano di assecondare i toni cromatici e l'aspetto materico delle diverse pietre presenti nella fabbrica (da D'Elia, Capponi, 2005).



b) Uno dei tasselli scelti per il "cantier di progetto" ripreso al termine delle operazioni di restauro. L'immagine costituisce un efficace accostamento della situazione *ante operam* al risultato finale; è ben visibile, specialmente nel loggiato del secondo ordine, la cura con cui sono state conservate le patine stese dal tempo sulle superfici del monumento (da D'Elia, Capponi, 2005).