

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^a 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

Premessa di <i>Donatella Fiorani</i>	11
1. Orientamenti teorici e di metodo nel restauro di <i>Giovanni Carbonara</i>	15
1.1. Introduzione	15
1.2. Il concetto di “bene culturale” 1.2.1. Monumenti e restauro / 1.2.2. Beni storico-artistici, beni naturali e ambientali	16
1.3. Natura e compiti della conservazione 1.3.1. Restauro e conservazione / 1.3.2. Recuperare, riusare, consolidare	19
1.4. Gli orientamenti teorici 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	22
1.5. L’unità di metodo 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	31
1.6. Filologia e restauro	36
1.7. Materiali e tecniche, antiche e moderne, a confronto	37
1.8. Conclusioni	38
2. Conoscenza e restauro dell’architettura: ruolo e casistica delle tecnologie di <i>Donatella Fiorani</i>	43
2.1. Il restauro fra acquisizione di conoscenze, elaborazione “og- gettiva” e proposta creativa 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	43

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: monitoraggi e prevenzione	
2.4.	Conclusioni	67
3.	Tecnologie per la conoscenza della fabbrica	69
	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	
4.	Tecnologie per i problemi di umidità	131
	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	
5.	Tecnologie per i problemi strutturali	193
	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	
6.	Tecnologie per la conservazione delle superfici materiche	285
	di <i>Carla Bartolomucci e Lorenzo Cantalini</i>	
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	
7.	Tecnologie per l'uso della fabbrica	335
	di <i>Mauro De Meo</i>	
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
	Glossario	355
	Riferimenti bibliografici	373

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 basilare 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, vetrosa, 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. VI**b**), oppure per la disposizione di buche pontate o di altri segni che indicano l'esecuzione del muro entro casseforme (TAV. VI**c-d**).

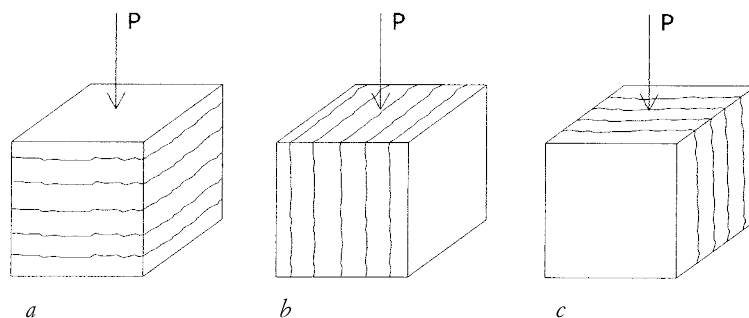
Oltre alle tecniche costruttive murarie, la terra argillosa è stata ampiamente usata anche come legante nelle murature in pietra, nei nuclei di murature rivestite in pietra o in laterizi e, ancora, molto diffusamente, per realizzare intonaci e rivestimenti, caratterizzati dalla presenza di fibre vegetali 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. VI**e** –, 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 piccoli 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 (CaCO_3) che, durante la cottura, si trasforma in ossido di calcio (CaO), detto anche “calce viva”. Quest’ultimo, in presenza di acqua, si idrata trasformandosi in idrossido di calcio (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 cocchiopesto; 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. XI d); 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 trasparenti 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 verificano 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 microprofilo; la diffrazione a

raggi X (XRD), che consente di riconoscere le sostanze cristalline presenti (San-sonetti, 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 (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).