

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_2 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_{13}/C_{12} e O_{18}/O_{16} 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

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 rilevatore 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 termoigrometriche 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 conducibilità 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 volumetriche. (FL)

Osservazione al microscopio elettronico a scansione (SEM) con sonda 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 μ 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 dalla 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 semisferica (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 "Pilodyn", 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 agguinta 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/cm² 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 ricompressione (Cr), di rigonfiamento (Cs), la pressione di consolidazio-

ne (σ'_{vm}) 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 σ'_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 (σ'_h ; mantenendo costante σ'_v oppure imponendo incrementi di σ'_h e σ'_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 capichave 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'infingere 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. (L.C)

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 μm), 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. (L.C)

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 riflessione) 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 emissione 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 multi-spettrali 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)