

Diagnosi del degrado delle strutture in calcestruzzo deteriorate per un loro corretto restauro

Mario Collepari, Silvia Collepari, Jean Jacob Ogoumah Olagot e Roberto Troli

ENCO, Via A. Nobel 10, Villorba, (TV), info@encosrl.it

Introduzione

A differenza dei medici e dei chirurghi che, nei loro insegnamenti universitari, seguono corsi specifici per emettere la diagnosi della malattia dei loro pazienti, gli ingegneri civili/edili e gli architetti, salvo qualche rara eccezione (come quella messa in atto dal primo autore di questo articolo che nel Politecnico di Milano tenne un corso semestrale sulla diagnosi del degrado delle costruzioni in calcestruzzo) non ricevono alcun insegnamento su questo importante argomento (1).

Per ovviare a questa carenza alcuni tecnici delle costruzioni (tra i quali gli ultimi tre co-autori di questo articolo) sono autorizzati e certificati dall'IIS (Istituto Italiano della Saldatura) al fine di emettere una diagnosi sul degrado delle strutture e possono eseguire sui materiali strutturali prove in sito che includono: valutazioni visive, misure di velocità di propagazione degli impulsi o ultrasuoni, misure di sclerometria, prove di penetrazione, misure di forza d'estrazione o pull-out, prove di magnetometria, prove di aderenza o pull-off, prelievo e analisi chimica, potenziale di corrosione e resistività, prove di carico statiche, prove ecometriche sull'integrità dei pilastri di fondazione, prove ultrasoniche.

L'obiettivo di questo articolo è di esaminare le prove non-distruttive eseguite in situ e quelle distruttive eseguite in laboratorio sui provini estratti e sui campioni prelevati dalle strutture. La complementarità di queste prove, unitamente alle notizie al contorno sulla struttura (anno di inizio e fine della costruzione, esposizione all'ambiente, eventuali inconvenienti lamentati durante l'esecuzione dell'opera, ecc.), consentiranno di emettere una diagnosi del degrado della costruzione e quindi di impiegare materiale e tecniche da restauro tali da non ripetere gli errori conseguiti nella costruzione originale dell'opera. Quasi tutte le costruzioni in Italia sono state eseguite negli anni 1960-1980 e si sono deteriorate nel giro di qualche decennio dalla loro erezione, quando ancora non erano disponibili le Norme Europee, emanate nei primi anni del 2000, che oggi consentono al progettista di emettere le norme di capitolato per opere durabili almeno 50 o 100 anni a seconda della loro importanza strategica.

Nella Fig.1 sono mostrati, a titolo di esempio, alcuni pilastri in calcestruzzo armato che sintetizzano tre fasi dal degrado al restauro: sulla sinistra è presente un pilastro fortemente degradato; a destra si osserva un pilastro in fase di restauro - mediante spruzzo di una malta tissotropica a ritiro compensato - sulla base della diagnosi eseguita sulle strutture deteriorate e due pilastri al termine del restauro dopo aver applicato una vernice a spessore millimetrico contenente un polimero bianco flessibile.

Nei paragrafi che seguono verranno esaminate le principali prove non-distruttive e distruttive, per consentire al progettista del restauro (ingegnere o architetto) di prescrivere quali test far eseguire in situ sulle costruzioni degradate e quali prove far determinare in laboratorio sui provini e sui prelievi estratti dalle costruzioni.

Prove non-distruttive sulle costruzioni

Le prove non-distruttive possono essere formalmente suddivise in due tipi: passive ed attive. Le prime rilevano quei fenomeni fisici che si verificano naturalmente, mentre le seconde richiedono un'eccitazione artificiale, di natura termica, elettrica, acustica, ecc. a seconda del fenomeno fisico coinvolto nella prova.



Figura 1- A sinistra un pilastro in c.a. degradato. A destra: un pilastro in fase di restauro e due pilastri verniciati in bianco al termine del restauro

Nella Tabella 1 è mostrata la lista delle principali prove non-distruttive.

Tabella 1 - Principali prove non-distruttive

| | |
|-----------------|-------------------------------|
| • Fotografia | • Auscultazione sonica |
| • Termografia | • Prove con ultrasuoni |
| • Endoscopia | • Prove con martinetti piatti |
| • Magnetometria | • Monitoraggio delle fessure |
| • Gammagrafia | • Sclerometria |

FOTOGRAFIA

La documentazione fotografica è una prova non-distruttiva che sempre dovrebbe accompagnare una diagnosi, anche e soprattutto se seguita da prove distruttive in laboratorio, per evidenziare dove sono localizzati i prelievi da fare accanto ad altre osservazioni o analisi come è mostrato in Fig. 2: in questa immagine è mostrato con il segno **A** un'area del pilastro integro accanto a quella contrassegnata con **B** danneggiata. Le analisi comparative determinate in laboratorio sui campioni prelevati dalle aree **A** e **B** consentiranno di comprendere il meccanismo del degrado e quindi il metodo corretto per il restauro dell'intervento. Se, per esempio, il campione prelevato nell'area **B** presenta all'analisi chimica una discreta quantità di cloruri, che risultano invece assenti nell'area **A**, si deduce che il meccanismo del degrado è costituito nella corrosione provocata da acque ricche di cloruri percolate sulla faccia del pilastro dove si trova il punto **B** ma non su quella dove è mostrato il punto **A**. Se, invece, il campione prelevato nell'area **B** è ricco di gesso (determinato mediante analisi chimica confermata dalla diffrazione dei raggi X) il degrado è da attribuire all'impiego di aggregati non idonei per la presenza impurità gessose che hanno provocato la formazione di ettringite espansiva con sollevamento del copriferro.

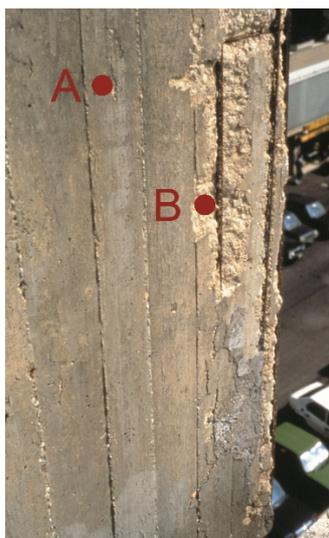


Figura 2 - Pilastro con le aree A e B evidenziate per il prelievo da analizzare in laboratorio

TERMOGRAFIA

Il principio teorico della termografia è basato sul fatto che qualsiasi oggetto che si trova ad una determinata temperatura emette un flusso di energia regolato dalla legge di Stefan-Boltzmann:

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad [1]$$

dove T è la temperatura assoluta (in °K) della superficie da cui proviene il flusso energetico E (in W/m^2), σ è una costante universale che vale $5,67 \cdot 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$, ed ε una costante adimensionale - detta "emissività" - che dipende dal materiale che costituisce la superficie.

Mediante un sistema ottico (costituito da varie lenti) ed elettrico (capace di tramutare in un segnale elettrico l'intensità della radiazione ricevuta) le differenze di temperature vengono registrate, attraverso un termogramma consistente nella registrazione grafica di tonalità monocromatiche (varianti dal bianco al nero) proporzionali alle diverse temperature.

L'indagine si effettua riprendendo con una telecamera la superficie dell'edificio in esame, visualizzando il termogramma su un *monitor*, e registrandolo mediante fotografia in bianco e nero o attraverso un video registratore.

Per esempio, l'indagine nell'edificio della Fig. 3 rivela nell'immagine termografica la presenza di un arco mascherato dall'intonaco superficiale dopo una modifica strutturale.

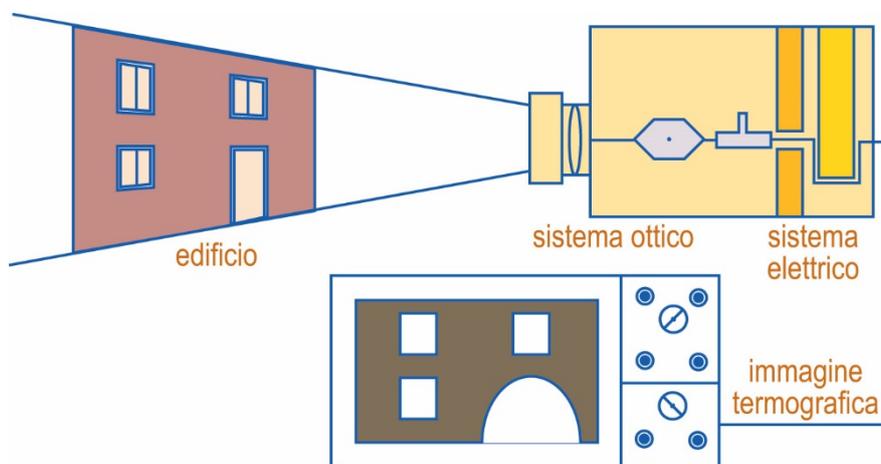


Figura 3- Termografia di un edificio

ENDOSCOPIA

L'endoscopio è uno strumento che consente di vedere in cavità, inaccessibili all'osservazione diretta, attraverso fori (da qualche mm a qualche cm) praticati nella struttura e nei quali passa un sistema ottico di tipo rigido costituito da obiettivi e lenti tradizionali, o di tipo flessibile formato da fibra ottiche (Fig. 4), In entrambi i casi, l'apparecchio include anche un sistema di illuminazione interna ed un oculare esterno abbinato ad una camera fotografica per registrare le osservazioni endoscopiche.



Figura 4- Endoscopia: a sinistra impiego della sonda ottica; a destra osservazione dei difetti non visibili ad occhio nudo

MAGNETOMETRIA

Questa tecnica consente di individuare materiali ferromagnetici nascosti nella muratura. Il principio del metodo si basa sul principio dell'induzione magnetica: se un conduttore elettrico di lunghezza l si muove con una velocità V attraverso un campo magnetico di intensità B , all'estremità del conduttore si genera una differenza di potenziale e calcolabile con l'equazione [2]

$$e = B \cdot l \cdot V \quad [2]$$

Se le estremità del conduttore in movimento sono collegate con un circuito esterno stazionario rispetto al campo magnetico la tensione indotta e causa il passaggio di una corrente di intensità i , la quale determina una caduta di potenziale $i \cdot R$, dove R è la resistenza elettrica del conduttore in movimento. La differenza di potenziale V alle estremità del conduttore diventa:

$$V = e - i \cdot R \quad [3]$$

In pratica il magnetometro si compone di una *sonda* che viene messa in movimento sulla superficie della struttura da indagare; la sonda consiste in una bobina attraversata da una corrente alternata di frequenza costante che genera un campo magnetico alternato.

Gli oggetti metallici, incassati nella struttura da indagare, ma tali che si trovino nell'area di influenza del campo magnetico, alterano la differenza di potenziale all'estremità della bobina in base al principio sopra illustrato. L'alterazione del voltaggio viene segnalata su una scala o registrata graficamente.

L'alterazione dipende dallo spessore dell'oggetto metallico e da quello del materiale coprente: nel caso di strutture in calcestruzzo armato, per esempio, il magnetometro, adeguatamente tarato, consente di rilevare il diametro dell'armatura in acciaio e lo spessore del copriferro.

Nel caso delle murature degli edifici storici, la magnetometria consente di evidenziare la presenza di materiali metallici (tubazioni in ghisa, piombo, rame) incassati in materiali elettricamente non conduttivi quali sono in genere i materiali da costruzione delle murature.

GAMMAGRAFIA

Questa tecnica di indagine non distruttiva, largamente impiegata in altri settori dell'ingegneria meccanica, si basa sulle diverse capacità dei materiali di assorbire energia elettromagnetica emessa da sorgenti radioattive in grado di produrre raggi X.

Una pellicola particolare viene impressionata dalle radiazioni che fuoriescono dal manufatto esposto alle radiazioni provenienti dalla sorgente radioattiva: sulla pellicola si evidenziano diverse tonalità di grigio in relazione alle caratteristiche di opacità o trasparenza del manufatto alle radiazioni X.

AUSCULTAZIONE SONICA

La tecnica, già utilizzata con successo per il controllo delle fondazioni profonde (per esempio, pali di pile da ponte), si basa fundamentalmente sulla misurazione del tempo impiegato dalle **onde soniche** – di frequenza compresa tra 16 Hz e 20 kHz – nell'attraversare un determinato percorso all'interno di un materiale. Il principio del metodo si basa sul fatto che le onde soniche, incontrando una discontinuità del mezzo vengono in parte riflesse ed in parte rifratte. Il *trigger* fa scattare un contatore di tempo allorché la sorgente (un martello, un generatore di rumore, ecc.) emette le onde soniche. Il sensore raccoglie l'onda riflessa, la trasforma in un segnale elettrico che interrompe il contatore. La misura del tempo t di percorrenza dell'onda sonica all'interno del materiale integro ($2L_0$) e la conoscenza della velocità (V) con cui le onde soniche viaggiano attraverso il materiale permettono di risalire alla lunghezza L_0 in corrispondenza della quale si trova una fessura.

RILEVAMENTO DEGLI ULTRASUONI

Le vibrazioni meccaniche con frequenze superiori a 20 kHz, e fino a 1000 MHz, non sono percepite dall'orecchio umano e sono definite ultrasoniche.

Le onde ultrasoniche, a differenza di quelle soniche, non si trasmettono altrettanto facilmente nell'aria; entrambe, però, possono essere molto facilmente trasmesse, anche per lunghe distanze, attraverso materiali liquidi e soprattutto solidi.

La specificità delle onde ultrasoniche consiste nel fatto che se esse incontrano uno strato di aria (fessura, cavità, intercapedine) vengono quasi completamente riflesse. Si calcola che è sufficiente una fessura di circa 1 μm per bloccare la trasmissione degli ultrasuoni aventi una lunghezza d'onda di circa 1 mm. Ciò determina, ovviamente, un limite nell'applicazione degli ultrasuoni in murature porose e discontinue, come sono spesso quelle degli edifici storici. Tuttavia, le onde ultrasoniche possono essere vantaggiosamente applicate nella rilevazione di discontinuità provocate da degradi non ancora visibili, presenti fin dall'origine per la tecnica costruttiva impiegata (per esempio: murature a sacco).

SCLEROMETRIA

Le prove sclerometriche, sicuramente le più impiegate tra quelle non-distruttive, consentono di determinare la durezza superficiale di una struttura in calcestruzzo mediante la misura del rimbalzo di un'asta proiettata sulla superficie della struttura stessa. Poiché esiste una correlazione tra la durezza superficiale e la resistenza meccanica, molto spesso lo sclerometro è utilizzato per ricavare i valori di resistenza meccanica a compressione. In realtà, la correlazione tra durezza superficiale e resistenza a compressione – e quindi la taratura dello strumento – dipende da alcuni parametri (come la durezza dell'aggregato lapideo, finitura e compattazione dello strato corticale, stagionatura superficiale, ecc.) che possono influenzare la correlazione stessa.

Pertanto, il miglior impiego della sclerometria, come avviene tipicamente per le prove non-distruttive, è quello di individuare comparativamente zone di calcestruzzo relativamente più deboli e più forti (in termini di durezza superficiale e quindi di resistenza meccanica), in corrispondenza delle quali con poche e misurate prove distruttive (carotaggio e schiacciamento dei provini) si può determinare, in valore assoluto, la resistenza meccanica o il modulo elastico statico del materiale in sito.

IL METODO DEI MARTINETTI PIATTI

Il metodo è largamente impiegato nelle strutture murarie per la determinazione di due grandezze: a) tensione attuale in una zona della muratura; b) modulo elastico statico.

La prova, a rigore, non è proprio non-distruttiva soprattutto quando si giunge alla rottura per compressione del concio in sito: tuttavia, rispetto ad un'analoga prova che potrebbe essere eseguita in laboratorio prelevando una porzione muraria mediante carotaggio o asportazione di un concio, essa comporta indubbiamente un danno irrilevante alla struttura originale, soprattutto se si può effettuare la riparazione in sito. Inoltre, essa presenta il vantaggio di indagare una porzione significativa di materiale, e di valutare il comportamento medio della struttura indipendentemente dal fatto che essa sia omogenea o, come spesso avviene, eterogenea (malta, mattoni e/o pietra). Questo metodo, in particolare, è utilizzabile su murature in laterizio con corsi di malta regolari ma non su murature in pietra non regolari.

Per la determinazione della tensione attuale si prendono in considerazione due punti (*A* e *B*) la cui distanza è preliminarmente misurata con un estensimetro rimovibile. Dopo aver effettuato un taglio (di circa 1 cm), si inserisce un martinetto piatto opportunamente sagomato (cilindrico, rettangolare, ecc.) in funzione della geometria della muratura. Dopo aver effettuato il taglio nella muratura, e prima di inserire il martinetto, la distanza tra i punti *A* e *B* è variata (per aver rimosso con il taglio la tensione esistente) ed è diventata quella relativa tra *A'* e *B'*. Si applica una pressione attraverso il martinetto fino a ripristinare la distanza tra i punti *A* e *B* che esisteva in corrispondenza della tensione originale: dalla pressione misurata e dalla geometria del martinetto si calcola la tensione che agisce normalmente alla sezione del taglio.

MONITORAGGIO DELLE FESSURE

Il controllo delle fessure sulle strutture può essere oggi affrontato con un numero piuttosto rilevante di metodi: dai più antichi e grossolani (spia di gesso o di vetro) fino ai più moderni e sofisticati estensimetri basati sul rilevamento di misure elettriche. A dire il vero, le spie in gesso o in vetro, applicate per esempio a cavallo di una fessura, segnalano soltanto che si è verificato un aumento della larghezza della fessura fino alla rottura della spia, ma non forniscono, come gli estensimetri o anche come i più semplici calibri o deformometri, l'andamento nel tempo della variazione dimensionale della fessura.

Ancor più interessante è l'impiego di sonde ottiche per registrare l'ampiezza delle fessure e visualizzare sia la forma che l'eventuale deposito di sostanze estranee.

Prove distruttive in laboratorio

Le prove distruttive consistono fondamentalmente in prove di laboratorio di carattere prevalentemente chimico, mineralogico, e fisico; talvolta esse includono anche prove di carattere meccanico molto simili alle prove non-distruttive (modulo elastico dinamico mediante ultrasuoni, curva sforzo-deformazione fino alla rottura del provino).

Tabella 2 - Principali prove distruttive

| |
|---------------------------------------|
| • Analisi chimica |
| • Analisi per diffrazione dei raggi X |
| • Analisi termica |
| • Spettrofotometria a raggi IR |
| • Microscopia elettronica |
| • Assorbimento di liquidi |
| • Porosimetria a mercurio |
| • Permeabilità all'acqua |
| • Adsorbimento di gas |
| • Prove meccaniche |

Le prove distruttive che verranno esaminate sono riportate nella Tabella 2. Val la pena di sottolineare che molto spesso si identificano le prove distruttive di laboratorio con l'analisi chimica, la quale invece, di per sé e da sola, non è in grado di fornire elementi significativi per l'emissione di una diagnosi se non è accompagnata dalle altre prove non distruttive di carattere mineralogico o fisico.

ANALISI CHIMICA ELEMENTALE

L'analisi chimica tradizionale di un solido (come un mattone, una malta, una pietra o un frammento di calcestruzzo) consiste nel disciogliere con adeguati solventi (acidi, basi, ecc.) il campione in acqua e nell'analizzare gli ioni presenti nella soluzione. Questo tipo di analisi è definita **analisi chimica elementale**, poiché consente di determinare la composizione del materiale in termini di percentuale degli **elementi** (*Ca, Na, K*, ecc.).

Più frequentemente il risultato viene espresso sotto forma di percentuali di ossidi corrispondenti agli elementi (*CaO, K₂O, SO₃, CO₂*) presenti e pertanto la composizione diventa: CaO = 12,4%; SO₃ = 17,6%; K₂O = 47,7%; CO₂ = 22,3%.

DIFFRAZIONE DEI RAGGI X

L'analisi per diffrazione dei raggi X -detta anche *XRD* (acronimo di *X Ray Diffraction*)- di un materiale solido viene effettuata sul campione stesso, in forma di polvere finemente macinata, senza doverlo sciogliere in acqua (2). Essa consente di avere informazioni addizionali che permettono di interpretare meglio il risultato dell'analisi chimica. La diffrazione dei raggi X consente di riconoscere solo un prodotto cristallino emettendo dei segnali in forma di picchi mentre presenta solo una banda diffusa per i materiali amorfi.

L'analisi per diffrazione dei raggi X è applicabile solo ai solidi cristallini nei quali gli atomi che compongono il materiale sono disposti in modo geometricamente ordinato. Nei solidi cristallini gli atomi occupano delle posizioni corrispondenti ai vertici di figure geometriche ben precise, denominate celle elementari.

Esistono solidi cristallini costituiti da atomi (per esempio il diamante o la grafite) o da ioni (per esempio il cloruro di sodio costituito da *Na⁺* e *Cl⁻*). Per i prodotti inorganici, che

costituiscono i materiali da costruzione, il reticolo cristallino è formato generalmente da ioni, mentre nei materiali metallici sono gli atomi a costituire il reticolo cristallino.

Non sempre gli atomi o gli ioni si dispongono in maniera ordinata ai vertici del reticolo cristallino. Talvolta, essi sono “disturbati” dal raggiungere questa situazione ordinata (per esempio da un raffreddamento troppo rapido del liquido in via di solidificazione) ed assumono allora una disposizione più o meno irregolare; si dice allora che il solido è amorfo.

Tra i prodotti amorfi più frequenti nel campo dei materiali solidi vi è la silice (SiO_2). Essa può cristallizzare in diverse forme quali il quarzo α , il quarzo β , ma può anche rimanere amorfa come avviene per esempio nelle pozzolane, o in altri minerali silicei come l’opale ed il calcedonio.

La Fig. 5 mostra il diagramma di diffrazione ai raggi X del quarzo ben cristallizzato che presenta la stessa composizione chimica (SiO_2) del fumo di silice amorfo (Fig.6)

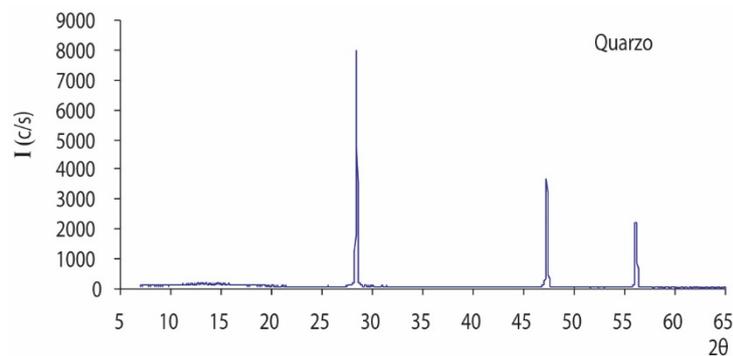


Figura 5- Diagramma di diffrazione del quarzo

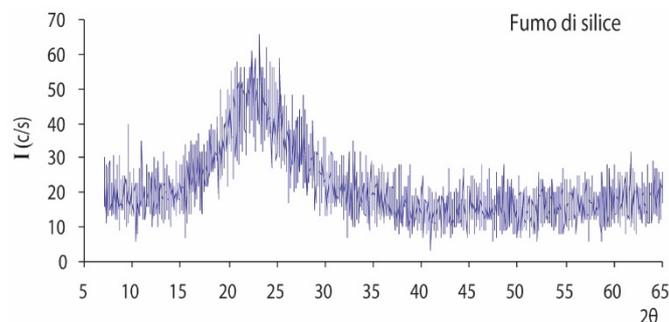


Figura 6- Diagramma di diffrazione della silice amorfa in forma di fumo di silice

ANALISI TERMICA

L’analisi termica (3) è un eccellente metodo di analisi per i materiali solidi. Essa, rispetto alla diffrazione dei raggi X, appare decisamente più efficace nella determinazione della quantità di alcuni prodotti, cristallini o amorfi che siano (analisi quantitativa), e molto più limitata nella identificazione dei prodotti (analisi qualitativa) dove, invece, è molto più efficace l’analisi per diffrazione dei raggi X.

Pertanto la combinazione dell’analisi termica con la diffrazione dei raggi X, magari in aggiunta all’analisi chimica, si rivela una tecnica molto efficace nel riconoscimento e nella determinazione dei prodotti presenti in un materiale.

Esistono fondamentalmente due tipi di analisi termica: l’analisi termo-ponderale o termo-gravimetrica, **TG**, (basata sulla perdita di peso durante il riscaldamento) e l’analisi termica-

differenziale, *DTA*, (basata sullo sviluppo o sull'assorbimento di calore di alcuni prodotti durante il riscaldamento).

Esistono strumenti (termo-analizzatori) che sono in grado di effettuare una delle due o entrambe le analisi: quella termo-gravimetrica e quella termica-differenziale.

L'analisi termo-gravimetrica (*TG*) è basata sulla registrazione del peso di un campione di materiale durante il riscaldamento a temperatura crescente: in genere dalla temperatura ambiente fino a circa 1000°C, ma esistono strumenti che arrivano fino a circa 2500°C (3).

Vi sono dei prodotti che durante il riscaldamento si decompongono e sviluppano un gas, cosicché se il campione si trova sul piatto di una bilancia il peso del materiale diminuisce.

Due sono gli elementi essenziali per l'analisi termo-ponderale: la temperatura e la perdita di peso. Il primo elemento è essenziale al riconoscimento del prodotto (analisi qualitativa) perché ogni composto termicamente decomponibile perde peso ad una certa temperatura che è caratteristica di quel composto, anche se non unicamente per quel composto. Il secondo elemento, la quantità di perdita di peso, consente di calcolare la percentuale di materiale (analisi quantitativa).

La curva *TG* dell'analisi termo-gravimetrica mostra nell'ordinata la perdita di peso in mg del campione e nell'ascissa la temperatura alla quale il campione è progressivamente riscaldato. Nel caso di un campione contenente una certa quantità di calce idrata, $Ca(OH)_2$, si verifica una netta e brusca perdita di peso, in corrispondenza del flesso della curva, a 450°C, temperatura alla quale si verifica la decomposizione termica.

Pertanto, il fatto che il flesso si trova a 450°C è un indizio (ma non certezza, giacché altri composti possono decomporsi a 450°C) della presenza di $Ca(OH)_2$ nel campione da analizzare.

Per facilitare l'individuazione della temperatura di decomposizione, e quindi il riconoscimento del prodotto che si decompone, il termo-analizzatore riporta anche la derivata della curva *TG*: cioè la curva *DTG* (analisi differenziale-termo-gravimetrica).

I limiti dell'analisi *TG-DTG* sono:

- scarsa tipicità del risultato;
- scarsa riproducibilità del risultato: l'effetto termico che si registra è funzione non solo del prodotto, ma anche delle modalità operative dello strumento: velocità di riscaldamento, quantità del campione, tipo di contenitore, dimensione granulometrica del materiale, ecc.; in altre parole l'effetto termico a 450°C può diventare 440°C o 460°C a secondo dello strumento; pertanto è necessario, prima o dopo l'analisi del materiale da esaminare, tarare lo strumento con il prodotto puro sospettato essere presente nel campione.

I vantaggi dell'analisi *TG-DTG* sono considerevoli una volta che si siano superati i limiti sopra indicati. Per esempio, un'analisi ai raggi X, effettuata prima di quella *TG-DTG*, consente di valutare con certezza che nel campione da analizzare è presente il $Ca(OH)_2$ ed inoltre che gli altri composti sono o decomponibili a temperature molto diverse da 450°C oppure non sono decomponibili. In queste condizioni la perdita di peso a 450°C consente di determinare con ottima precisione la quantità di $Ca(OH)_2$, la qual cosa non si sarebbe potuta conseguire, con altrettanta precisione, attraverso l'analisi ai raggi X.

Un altro vantaggio dell'analisi *TG-DTG* consiste nella possibilità di determinare un prodotto indipendentemente dal fatto che esso sia bene o mal cristallizzato, o addirittura amorfo. Nel caso del $Ca(OH)_2$, per esempio, esso si forma quasi immediatamente durante l'idratazione del cemento, ma esso è difficilmente riscontrabile nelle prime ore di stagionatura di una pasta di cemento con l'analisi ai raggi X a causa del carattere amorfo del $Ca(OH)_2$ che si forma inizialmente.

L'analisi termica differenziale (*DTA*) consiste nel misurare lo sviluppo o l'assorbimento di calore di un campione durante un continuo riscaldamento a temperatura crescente.

Lo sviluppo o l'assorbimento di calore si verifica allorché un composto si decompone. Per esempio nella decomposizione termica del Ca(OH)_2 a 450°C , la perdita di peso registrata con l'analisi *TG* è accompagnata da un assorbimento di calore essendo la reazione di tipo endotermico (richiede appunto calore per poter avvenire).

Molte delle reazioni che avvengono con perdita di peso, utilizzate per questo nell'analisi *TG*, avvengono anche con assorbimento di calore e pertanto sovente ad un picco *DTG* corrisponde un picco *DTA* di tipo endotermico. Tuttavia, esistono anche reazioni che avvengono con perdita di peso e sviluppo di calore (reazioni esotermiche): per esempio le sostanze organiche si decompongono all'aria con perdita di peso (generalmente CO_2) e sviluppo di calore (calore di combustione): in tal caso al picco *DTG* corrisponde un picco *DTA* di tipo esotermico. Al contrario, le decomposizioni termiche delle sostanze organiche in corrente di azoto, che non consente la combustione, avvengono con perdita di peso ed assorbimento di calore: in tal caso al picco *DTG* corrisponde un picco *DTA* di tipo endotermico.

SPETTROSCOPIA A RAGGI IR

La spettroscopia a raggi infrarossi (IR) è particolarmente adatta per evidenziare il disordine cristallino dei minerali per un quarzo cristallino e per una silice completamente amorfa. Nel settore del calcestruzzo questa tecnologia si presenta particolarmente vantaggiosa per diagnosticare la presenza di silice amorfa o silice mal cristallizzata (4) negli aggregati che è la causa primaria del degrado associato alla cosiddetta reazione alcali-silice (*ASR*, *Alkali-Silica Reaction*).

Bachiorrini (4) e Berra, Malangiardi e Paolini (5) hanno messo a punto un metodo basato appunto sulla spettroscopia IR per evidenziare il disordine cristallino della silice e quindi la sua attitudine a provocare danni associati all'*ASR*.

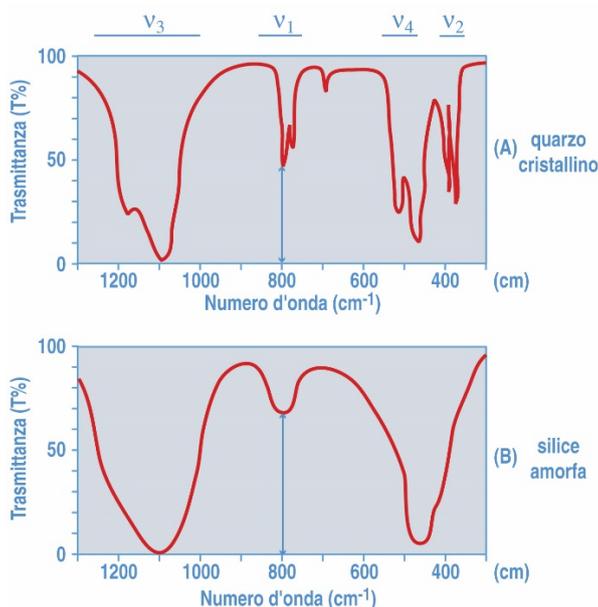


Figura 7- Spettro a raggi infrarossi di una silice cristallina in forma di quarzo (in alto nella Figura) e spettro a raggi infrarossi di una silice amorfa (in basso nella Figura)

Il metodo consiste nel diluire un campione di inerte finemente macinato ($< 45 \mu\text{m}$) in bromuro di potassio (*KBr*) che funge da supporto del campione da analizzare. La miscela in polvere di inerte (20%) e *KBr* (80%) viene pressata e la pasticca così ottenuta è esposta alle radiazioni infrarosse. Si registra (Fig.7) con l'ausilio dello spettroscopio la trasmittanza (*T* in %) della radiazione trasmessa attraverso la pasticca in funzione del numero d'onda (in cm^{-1}) della radiazione.

MICROSCOPIA ELETTRONICA A SCANSIONE

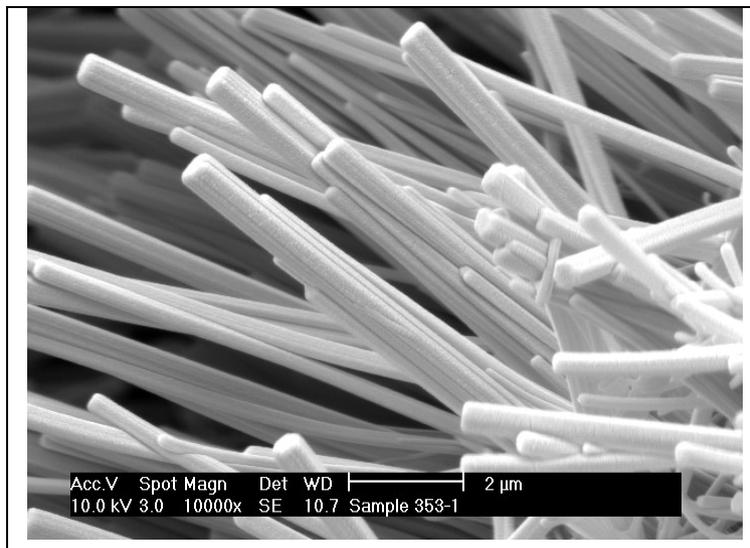


Figura 8- Morfologia fibrosa dei silicati di calcio idratati (per gentile concessione di Davide Salvioni, Mapei)

Molti dei prodotti presenti nei materiali da costruzione appaiono in forma di aggregati cristallini troppo piccoli per poter essere osservati con un microscopio ottico al fine di valutarne la loro forma (**morfologia**).

La microscopia elettronica consente un'alta risoluzione di immagine grazie all'impiego di un fascio di elettroni in luogo di un fascio di raggi luminosi (6). L'immagine può essere osservata su un video o registrata su un film.

Oltre alla forma delle particelle si può anche determinare la loro dimensione. Nella Fig. 8 è mostrata la microfotografia di un'osservazione al microscopio elettronico a scansione su un campione di cemento idratato: si osserva la tipica microstruttura del cemento idratato costituito dai prodotti di idratazione di morfologia prevalentemente fibrosa.

Ancor più efficace risulta l'osservazione al microscopio elettronico se è accompagnata dalla tecnica della microsonda (*EDXA, Energy Dispersive X-ray Analysis*) che consente di determinare la composizione chimica elementare in un punto del campione sotto osservazione.

POROSIMETRIA

I materiali da costruzione nelle murature degli edifici e delle strutture in c.a. presentano un sistema più o meno continuo di pori attraverso i quali si verifica la migrazione dell'acqua che è la fonte primaria di degrado.

I metodi nel seguito descritti non includono la rilevazione di grosse cavità all'interno di una struttura (determinabili peraltro con la misura della velocità degli ultrasuoni).

Esistono fondamentalmente tre metodi per caratterizzare la porosità di un materiale all'interno delle costruzioni:

- determinazione dell'assorbimento di acqua;
- intrusione forzata di mercurio (porosimetria a mercurio);
- adsorbimento e condensazione di gas (azoto, vapore acqueo, ecc).

Determinazione dell'assorbimento d'acqua. Il metodo, molto semplice, consiste nell'essiccare a 110°C fino a peso costante un campione di materiale. Sia p il peso del campione essiccato. Il campione viene, quindi, immerso in acqua e si scalda fino ad ebollizione per 1 ora al fine di favorire la fuoriuscita d'aria del materiale ed il riempimento con acqua. Sia p' il peso del materiale saturo di acqua. Si definisce **assorbimento** (A) la variazione percentuale di peso ($p'-p$) rispetto a p .

Porosimetria a mercurio. Il mercurio, a differenza dell'acqua, non ha alcuna affinità per i prodotti presenti nei materiali da costruzione. Esso non viene pertanto spontaneamente assorbito dal materiale poroso come avviene per l'acqua.

Affinché il mercurio penetri nei pori di un materiale poroso è necessario applicare una pressione che è tanto maggiore quanto più piccolo è il raggio dei pori come è indicato nell'equazione [4] di Washburn:

$$P = 2\sigma/r \bullet \cos \theta \quad [4]$$

dove P è la pressione che occorre applicare per far entrare il mercurio entro i pori di raggio r , mentre σ e θ , entrambi noti, sono rispettivamente la tensione superficiale del mercurio e l'angolo di contatto tra mercurio e materiale solido.

In pratica, per determinare la porosità di un solido omogeneo (malta, mattone, pietra, ecc.) con un porosimetro a mercurio, si immerge il campione in un bagno di mercurio, si applica una pressione P crescente e si misura il volume di mercurio (V_{Hg}) che progressivamente penetra nei pori del solido: al crescere della pressione saranno penetrati prima i pori di raggio maggiore e dopo quelli di minore dimensione (7). Pertanto si può riportare in un diagramma il volume di mercurio (V_{Hg}) riferito ad un certo peso di campione che è penetrato in funzione della pressione (P) applicata.

Rispetto alla misura della porosità per assorbimento con acqua, la porosimetria a mercurio indica, oltre alla porosità totale, la distribuzione dimensionale dei pori. Anche nel caso della porosimetria a mercurio, come avviene per l'assorbimento di acqua, si può convertire il volume dei pori per unità di peso di materiale in volume di pori per unità di volume di materiale, cioè la porosità (ϵ), purché si conosca la massa volumica del solido poroso.

La porosimetria a mercurio è particolarmente indicata per valutare la distribuzione dei pori aventi dimensione compresa fra centesimi e centinaia di μ

Adsorbimento e condensazione di gas. Le molecole di un gas vengono adsorbite dalla superficie di un solido inclusa quella interna dei pori. Inoltre un gas condensa all'interno dei pori ad una pressione inferiore a quella corrispondente alla tensione di vapore, e la condensazione avviene a pressione tanto più bassa quanto minore è la dimensione dei pori.

Conoscendo il volume di gas adsorbito e condensato si può arrivare a calcolare, con una procedura molto laboriosa, la distribuzione dei pori in un intervallo che va da $10^{-4} \mu m$ a $10^{-2} \mu m$ (o tra $0,1 nm$ e $10 nm$) e quindi "complementare" a quella indagabile con la porosimetria a mercurio. Esistono oggi strumenti capaci di misurare automaticamente il gas adsorbito e condensato, e di calcolare la distribuzione di pori in questo intervallo di dimensione dei pori.

PERMEABILITÀ ALL'ACQUA

La permeabilità all'acqua - o più in generale ad un fluido - rappresenta il volume di fluido che nell'unità di tempo attraversa l'unità di sezione del materiale, sotto l'applicazione di un gradiente unitario di pressione. Da un punto di vista pratico la misura della permeabilità all'acqua su un provino estratto dalla struttura o gettato in cassaforma richiede tempi lunghi o

elevati gradienti di pressione a meno che non si tratti di materiali molto porosi (con porosità continua) e quindi molto permeabili come malte di calce, pietre in tufo, ecc..

Per materiali da costruzione più resistenti al flusso dell'acqua si rinuncia a questa misura che sarebbe troppo lunga e si preferisce una caratterizzazione del materiale secondo una prova standardizzata (ISO 7031): la prova consiste nel saturare preliminarmente con acqua il provino dopo averlo lateralmente impermeabilizzato con resina epossidica e quindi nel sottoporlo ad una pressione di 5 atm per 3 giorni. Al termine dei 3 giorni di prova si spacca il provino e si misura lo spessore di provino bagnato dall'acqua penetrata sotto l'effetto della pressione. Si conviene che - nel caso dei calcestruzzi - la struttura sia di fatto impermeabile all'acqua se lo spessore di materiale penetrato dall'acqua sia mediamente non superiore a 20 mm.

PROVE MECCANICHE

Oltre alla caratterizzazione meccanica delle strutture *in situ* mediante prove non-distruttive con l'auscultazione sonora o con le onde ultrasoniche o con le prove quasi-non-distruttive come quelle con i martinetti piatti, esiste la possibilità di misurare la resistenza meccanica su provini estratti dalle strutture e studiati in laboratorio.

Per studiare il comportamento dei diversi materiali da costruzione a seguito di sollecitazioni applicate, occorrono tre condizioni (8):

- sottoporre ad indagine una porzione ben definita di materiale omogeneo (mattoni, acciaio, calcestruzzo, ecc.);
- la porzione ben definita di materiale omogeneo si deve presentare in forma di una geometria relativamente semplice (prisma, cilindro, cubo, ecc.) che prende il nome di **provino**;
- la sollecitazione applicata deve essere di tipo semplice, solitamente mono-assiale (compressione o trazione) o comunque facilmente maneggiabile matematicamente (taglio, flessione).

Emissione della diagnosi

La diagnosi del deterioramento di un edificio storico o di una struttura in c.a. consiste nella raccolta di dati sperimentali che - unitamente alle informazioni al contorno, di carattere ambientale, climatico, storico, strutturale - consente di stabilire le cause del deterioramento della struttura in genere, e del degrado dei materiali in particolare, come è schematicamente illustrato nella Fig. 9.

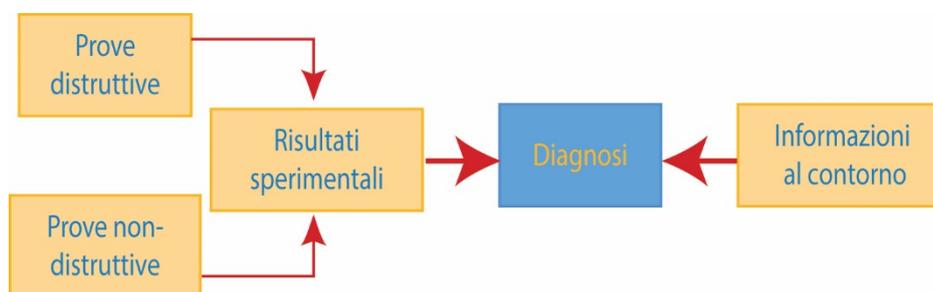


Figura 9- Schematizzazione del processo diagnostico

Bibliografia

- (1) M. Collepari, S. Collepari, J.J. Ogoumah Olagot, F. Simonelli, R.Troli, *Diagnosi del degrado e restauro delle strutture in C.A.*, II Edizione, pg.7, 2010.
- (2) L.S. Dent Glasser, Cap. XXIII in *The Chemistry of cement*, Vol II, Ed. H.F.W. Taylor, Publication Academic Press, London, (1964).

- (3) V.C. Farmer, Cap. XXII in *The Chemistry of cement*, Vol. II, Ed. H.F.W. Taylor, Publication Academic Press, London, (1964).
- (4) A. Bachiorrini, *A Method to Test the Alkali Reactivity of Siliceous Aggregate: Infrared Spectroscopy Concrete Durability*, John Scanlou Editor, ACI SP 100, Vol. II, pp. 1821-1832 (1987).
- (5) M. Berra, T Mangialardi, A.E. Paolini, *Rapid Evaluation of the Threshold Alkali Level for Alkali-reactive Siliceous aggregates in Concrete*, *Cement and Concrete Composites*, 21, pp. 325-333, (1999).
- (6) S.S. Sarkar, *Microspia elettronica a scansione del calcestruzzo e microanalisi basata sulla dispersione di energia ai raggi X*, *L'Industria Italiana del Cemento*, N° 781, pp. 870-885, (Novembre 2002).
- (7) M. Collepardi, *Scienza e Tecnologia del Calcestruzzo, III Edizione*, Editore Hoepli, Milano, (1991)
- (8) M. Collepardi, S. Collepardi, R. Troli, *Il Nuovo Calcestruzzo*, VI Edizione, pp. 137-138, Editore Tintoretto, (2014).