

Emanuele Ruggerone

Diagnostica strutturale

Introduzione

La diagnostica strutturale rappresenta un campo di indagine di difficile collocazione nell’ambito delle attività ingegneristiche. In essa le nozioni teoriche devono fondersi, forse più che in altre discipline specifiche, con l’esperienza che viene dall’osservazione diretta del comportamento delle strutture e con la sensibilità quasi estetica che deve determinare in maggiore misura la caratterizzazione degli interventi di risanamento, in particolare qualora si tratti di restauri o ripristini di opere di valore artistico.

Il presente lavoro vuole proporsi come panoramica generale sull’argomento, proponendo, accanto all’esibizione dello stato degli studi e dell’arte tipici del settore, alcuni suggerimenti di carattere generale per affrontare con le giuste premesse l’analisi dei casi reali e i relativi interventi da porre in opera.

Il volume è idealmente diviso in due parti: nella prima, dalla descrizione generale del comportamento meccanico, dei meccanismi e delle cause di degrado dei principali materiali da costruzione, l’attenzione è poi spostata verso l’analisi globale del comportamento delle strutture in esercizio, affrontata mediante un approccio semplificato di tipo energetico.

La seconda è dedicata alla rassegna dei mezzi a disposizione per la raccolta delle informazioni necessarie per lo studio di un intervento di risanamento, con particolare riferimento ai controlli non distruttivi e ai sistemi di monitoraggio, e, infine, alla descrizione delle varie tipologie di intervento, non tanto dal punto di vista dell’approfondimento teorico, quanto piuttosto da uno, più empirico, basato sul costante riferimento a interventi eseguiti nella pratica.

La letteratura presente sull’argomento ha l’aspetto di una miscellanea di informazioni sparse. Sparse in libri di calcolo strutturale, sia tra i classici volumi universitari, sia tra le pubblicazioni di alcuni ricercatori, in articoli per lo più reperibili in rete (tutti doverosamente citati in bibliografia, considerata la mole di informazioni preziose che da essi si possono dedurre) o su riviste specialistiche, negli opuscoli e nel materiale di sintesi dei convegni, sui siti internet delle società operanti nel settore del risanamento strutturale o in campi affini, nei quaderni di formazione dei Vigili del Fuoco, della Protezione Civile e di alcune regioni italiane.

La raccolta di dati provenienti da fonti così diverse non è un’operazione semplice, e soprattutto non si ha mai la certezza di avere a disposizione tutto ciò che occorre, e questo è dovuto semplicemente al fatto che non esiste, ad oggi, un volume dedicato alla diagnostica strutturale che sia in grado di fare il punto della situazione sull’argomento.

Come già detto, questo volume è il tentativo di realizzare uno strumento in grado di fornire le coordinate che consentono l’inquadramento generale di un problema di diagnostica strutturale, ivi compreso il conseguente intervento pratico; lo studio e l’analisi applicati al caso specifico possono essere citati per altri casi reali, ma restano comunque tipici della singola situazione, e pertanto non riconducibili ad una casistica generale o classificazione.

Il supporto dato da esperti del settore, in particolare il sig. Socrate di Arterestauro e l’ing. Pasi di Risanamento Muri, che hanno gentilmente messo a disposizione informazioni di prima mano su alcuni studi e interventi da loro eseguiti, l’arch. Capussotto della 4Emme per la disponibilità mostrata negli anni in diverse occasioni, e l’ing. Carollo, che ha solertemente risposto alle richieste di chiarimento e approfondimento sulle attività svolte dalla Ecobeton, unito agli articoli reperiti da varie fonti, come l’Enco Journal o la Rivista Mapei, agli opuscoli tecnici informativi delle principali società operanti nel settore e ai quaderni di studio di varie associazioni (si citano a titolo di esempio il quaderno di formazione CIAS sugli effetti delle vibrazioni sulle strutture, scritto dal direttore generale della 4Emme ing. Martinello, che riesce in poche pagine a fornire una panoramica esaurente sull’argomento, e i quaderni di formazione Mapei/EnCo citati in bibliografia) hanno consentito l’incisivo inserimento della descrizione di come sono state affrontate e risolte problematiche reali, a volte anche molto complesse.

Il ringraziamento alle persone che hanno messo a disposizione queste informazioni è quindi più che mai doveroso.

1

Materiali da costruzione

- I materiali da costruzione e le loro caratteristiche
- L'invecchiamento e il degrado: cause e meccanismi

1.1. Reologia dei materiali da costruzione

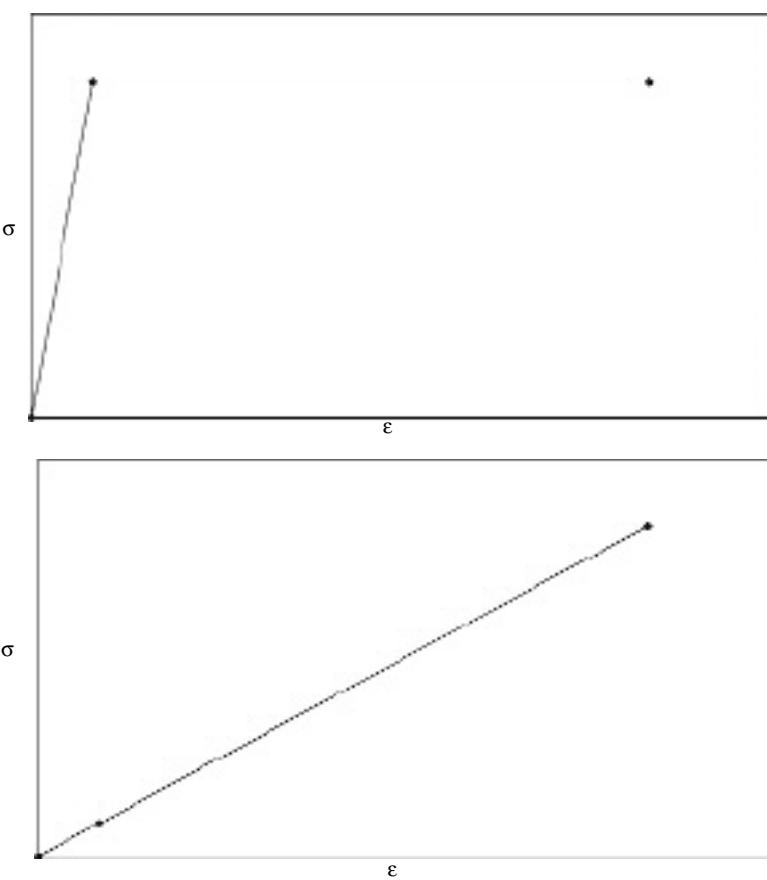
I materiali da costruzione sono sostanze naturali o artificiali che vengono usualmente impiegate nella realizzazione di opere di ingegneria civile.

La classificazione più comune è quella fra materiali naturali e artificiali, in base all'origine. I materiali naturali sono suddivisi in materiali vegetali, come il legno, e minerali, come pietra, ghiaia, sabbia, metalli. I materiali artificiali si ottengono mediante la combinazione di due o più materiali naturali: ad esempio i laterizi, le calci, il calcestruzzo.

In rapporto al degrado cui tutti i materiali sono soggetti, la suddetta classificazione ha interesse soprattutto in termini di velocità di invecchiamento. Questa può essere definita come la variazione nel tempo della capacità prestazionale¹; si può dire che ai materiali naturali sia associata una velocità di invecchiamento inferiore rispetto al caso di quelli artificiali.

L'associazione di differenti materiali naturali secondo determinate modalità determina la formazione di un aggregato in cui, per la presenza di distinte componenti, si verificano reazioni chimiche tendenti a indebolire l'insieme. Il risultato è un decadimento della capacità prestazionale decisamente più rapido. Nell'ambito della diagnostica strutturale ha certamente maggiore interesse la classificazione basata sulla meccanica e sulla conseguente distinzione fra materiali duttili e fragili.

Con riferimento alla curva tensione-deformazione², i materiali duttili giungono a rottura al termine di un'ampia fase plastica successiva all'iniziale zona elastica, al contrario i materiali fragili si rompono improvvisamente, quando ancora presentano un comportamento sostanzialmente elastico.



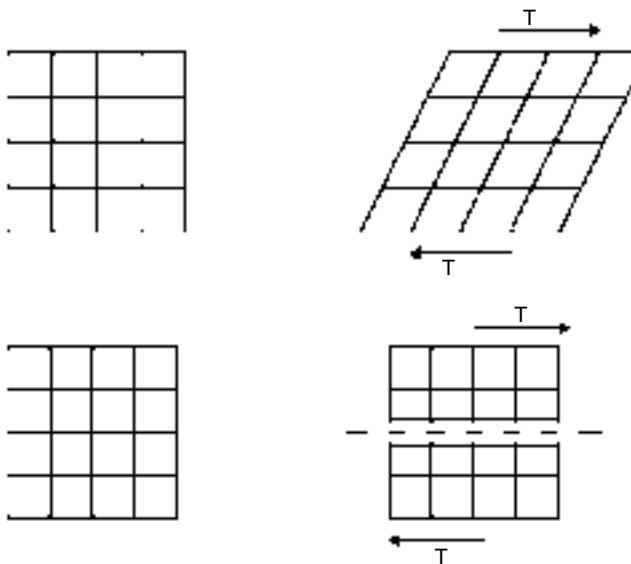
¹ Come meglio chiarito più avanti, nell'ambito della diagnostica strutturale risulta più confacente definire la velocità di invecchiamento come la riduzione, rispetto al tempo, del fattore di sicurezza.

² La curva tensione-deformazione si costruisce mediante l'esecuzione di prove di carico a rottura su provini di dimensioni e forme determinate, in base al materiale da provare. Il carico viene usualmente applicato in maniera da indurre stati di sollecitazione semplici da analizzare (compressione o trazione assiale centrata, ad esempio), in base a fasi di carico prefissate fino ad indurre la rottura del provino. Accanto alla tensione indotta dal carico, si misurano le variazioni dimensionali del provino, dalle quali si ricava la deformazione unitaria.

La presenza della fase plastica dipende dalle caratteristiche fisico-mecaniche del materiale, ovvero dalla libertà di moto a livello atomico e molecolare.

I materiali aventi reticolo cristallino, ad esempio, hanno molecole con scarsa libertà di moto (i legami interni sono molto forti) per cui risultano molto rigidi, pressoché privi di fase plastica e quindi fragili.

La deformazione elastica è assimilabile ad uno spostamento fra piani reticolari, quella plastica è assimilabile ad una vera e propria traslazione relativa:



Nel primo caso, al cessare della sollecitazione i piani del reticolo ritornano alla posizione iniziale, mentre nel secondo lo spostamento relativo non si può più azzerare del tutto a causa del fatto che la sollecitazione ha rotto alcuni legami che non è più possibile ricostituire. Permane una deformazione residua che è detta deformazione plastica.

Le caratteristiche base della curva tensione-deformazione sono sostanzialmente il modulo elastico e la resistenza limite o ammissibile.

Facendo riferimento alla teoria classica dell'elasticità, in base alla legge di Hooke, il modulo elastico è la grandezza fisica che lega la tensione alla deformazione:

$$\sigma = E \cdot \epsilon$$

e rappresenta la rigidezza di un materiale.

La rigidezza è la capacità di un materiale di assorbire stati tensionali in seguito all'applicazione di carichi.

Dato un carico q , infatti, lo stato tensionale che ne consegue è proprio funzione di q :

$$\sigma = \sigma(q)$$

mentre la deformazione è funzione della sollecitazione attraverso una matrice di rigidezza, di cui il modulo elastico è parte fondamentale, per cui si può scrivere:

$$\epsilon = \sigma/E$$

Si osserva pertanto che, a parità di stato tensionale, maggiore è il modulo elastico, maggiore è la rigidezza della struttura e minore è la sua deformazione.

Definita inoltre la resistenza limite come lo stato tensionale oltre il quale si verifica la rottura del materiale, ne consegue che, a parità di tale caratteristica, all'aumentare del modulo elastico, la rottura si verifica con deformazioni sempre minori.

MATERIALI
DA COSTRUZIONE

LE STRUTTURE
IN ESERCIZIO

DIAGNOSI
DELLE STRUTTURE

RESTAURO
E CONSOLIDAMENTO

Questo per sottolineare come la maggiore evidenza della rigidezza di un materiale sia proprio la ridotta deformazione e deformabilità, essendo la deformabilità definita appunto come l'inverso della rigidezza.

Per quanto detto, risulta evidente l'influenza del modulo elastico sulla forma della curva tensione-deformazione, limitatamente al tratto iniziale elastico.

Nel successivo tratto plastico, la legge di Hooke non risulta più valida, e il comportamento meccanico del materiale è convenientemente descritto da un modello reologico di tipo viscoso, caratterizzato da un coefficiente di smorzamento h che impedisce alla deformazione di rientrare del tutto una volta cessato il carico.

La deformazione cresce in funzione del tempo t con legge:

$$\varepsilon = \sigma \cdot t / h$$

e si mantiene costante anche al cessare della sollecitazione.

La curva tensione-deformazione descrive il fenomeno fisico che consiste nel fornire una quantità crescente di energia fino a provocare la rottura.

Definita come *tenacità* l'area sottesa alla curva tensione-deformazione, risulta chiaro che essa rappresenta il lavoro di deformazione necessario per rompere un provino, ovvero la quantità di energia che occorre fornire ad un materiale per romperlo.

In base alla tenacità si può ripensare la classificazione già suggerita in precedenza: i materiali duttili possiedono infatti un'alta tenacità, mentre quelli fragili presentano un basso valore di tale caratteristica.

La presenza di legami interni meno forti e di una maggiore libertà di moto a livello molecolare fanno sì che un materiale debba accumulare una maggiore quantità di energia prima di rompersi, per cui, una volta rotti i legami intermolecolari più deboli, esso entra nella fase plastica e si rompe non appena la tenacità ha raggiunto il valore necessario per la rottura.

Nel caso dei materiali fragili, invece, il lavoro di deformazione di rottura ha un valore più basso, che viene raggiunto mentre il materiale ha un comportamento ancora sostanzialmente elastico e per valori di deformazione decisamente più bassi³.

I materiali da costruzione sono soggetti, in esercizio, a stati di sollecitazione definiti, tipici di condizioni di carico definite.

Gli stati di sollecitazione cui un materiale da costruzione è soggetto sono:

- la compressione;
- la trazione;
- la flessione;
- la torsione;
- il taglio puro.

a questi si uniscono le varie combinazioni, ad esempio la presso-flessione, ovvero lo stato di sollecitazione determinato dall'azione simultanea di uno sforzo normale e di un momento.

Ciascuno degli stati elencati è determinato dall'azione di una delle tre caratteristiche di sollecitazione (sforzo normale, momento, taglio) agente in base a particolari modalità. Le caratteristiche di sollecitazione indotte dall'applicazione di un carico generano, come detto, uno stato di sollecitazione a cui il materiale offre una resistenza in forma di tensione limite⁴.

La deformazione che ne consegue, in base alla teoria dell'elasticità, dipende dalla rigidezza del materiale, ovvero dalle costanti elastiche e, in particolare, dal modulo elastico.

³ Come verrà meglio chiarito più avanti, l'energia di deformazione non è in realtà una caratteristica propria del materiale, ma piuttosto di un complesso strutturale, ovvero è fortemente influenzata da fattori quali la scala, lo schema statico, il grado di iperstaticità, la tipologia di sollecitazione e di carico in atto e la geometria.

⁴ Lo schema di ragionamento proposto si basa naturalmente sulla teoria delle tensioni ammissibili. La più moderna teoria degli stati limite, sulla quale si basa la nuova normativa europea degli Eurocodici, è fondata piuttosto sul concetto di carico limite.

Si riporta qui di seguito un prospetto con le principali caratteristiche dei materiali da costruzione di più comune impiego.

MATERIALE	MODULO ELASTICO IN kg/cmq	RESISTENZA A COMPRESSIONE IN kg/cmq	RESISTENZA A TRAZIONE IN kg/cmq
Granito	500.000	1.500	40
Porfido	600.000	1.000 – 2.500	7
Basalto	1.000.000	3.000	80
Arenaria	300.000	400 – 1.300	10 – 40
Tufo	30.000 – 150.000	50	8
Calcare	600.000	500 – 1.500	30 – 70
Calcestruzzo C25	250.000	250	12
Legno resinoso ⁵	120.000	400	80
Legno dolce	100.000	300	80
Legno forte	140.000	550	100
Legno lamellare	110.000	100	100
Acciaio FeB44k	2.000.000	4.400	4.400
Vetro normale	700.000	4.000	400
PVC	28.000	-	500
Laterizio pieno	500.000	250	50

Si noti come il modulo elastico cresce per i materiali che presentano capacità prestazionali migliori:

- PVC circa 25.000 kg/cm²
- legno circa 120.000 kg/cm²
- calcestruzzo C25 250.000 kg/cm²
- materiali lapidei 500.000 kg/cm²
- acciaio FeB44k 2.000.000 kg/cm²

e come la duttilità o la fragilità di un determinato materiale sia caratterizzata dal rapporto fra la resistenza limite e il modulo di Young: nel caso dell'acciaio, che è un materiale duttile, tale rapporto è nell'ordine di grandezza di 1/1.000, mentre per il vetro, che è un materiale fragile, tale rapporto vale circa 1/100.

1.2. Il calcestruzzo

Il calcestruzzo è, nel mondo, il materiale da costruzione più impiegato nel campo delle costruzioni, nel settore edilizio come in quello delle grandi infrastrutture.

Solo all'inizio degli anni ottanta, in Italia sono stati prodotti più di cento milioni di metri cubi di calcestruzzo all'anno.

Il confezionamento di tale materiale non rappresenta un processo tecnologicamente complesso, soprattutto oggi, ma spesso, in passato, la mancata conoscenza delle reali caratteristiche del prodotto finito ha fatto commettere errori piuttosto gravi.

Il calcestruzzo è il prodotto combinato di acqua, inerti di varia pezzatura e di un legante.

I leganti sono prodotti inorganici che, mescolati con acqua, formano una pasta dall'aspetto cremoso che perde nel tempo plasticità acquistando consistenza prima e resistenza poi. I leganti possono essere aerei oppure idraulici e il legante idraulico per eccellenza è il cemento.

Fra i cementi il più importante è il cemento Portland, costituito da una miscela di gesso biidrato e dal prodotto della cottura a 1.500°C di una miscela di argilla, calcare, sabbia e ceneri di pirite, oltre ad altre sostanze presenti in misura minore.

Sorvolando su considerazioni specifiche inerenti la chimica del cemento, in particolare per quanto riguarda le fasi presenti e i rapporti che dovrebbero intercorrere fra di esse al fine di ottenere un

MATERIALI
DA COSTRUZIONE

LE STRUTTURE
IN ESERCIZIO

DIAGNOSI
DELLE STRUTTURE

RESTAURO
E CONSOLIDAMENTO

⁵ Per quanto riguarda il legno, le resistenze sono da intendersi in direzione parallela alla fibra.

cemento di idonee caratteristiche, basti dire che esso rappresenta l'elemento fondamentale del calcestruzzo.

Con il nome di pasta si indica la miscela fra cemento e acqua. Il cemento reagisce con l'acqua formando composti in parte colloidali e in parte cristallini provocando un progressivo indurimento della pasta. Il calcestruzzo è una miscela in cui la pasta di cemento avvolge materiali inerti di varie dimensioni, detti aggregati, trasformandoli in una massa simile alla pietra. Si indica con il termine di malta il calcestruzzo in cui gli inerti presenti abbiano tutte dimensioni ridotte, ossia siano costituiti da sabbia. In opera, il calcestruzzo non viene mai utilizzato da solo, ma sempre accoppiato con adeguate quantità di acciaio disposte, in base a specifici calcoli, a formare una vera e propria ossatura, detta gabbia. Tale gabbia viene predisposta e posizionata all'interno di una casseratura di dimensioni adeguate ad accogliere il getto di calcestruzzo che, indurendo, imprigiona al suo interno l'armatura. Il materiale da costruzione così ottenuto è comunemente detto cemento o calcestruzzo armato.

Questa rapida descrizione ha il solo fine di mostrare quanto il cemento armato sia un materiale eterogeneo. Per quanto detto finora, infatti, lo si può dire costituito da almeno quattro elementi base: cemento, acqua, inerti e acciaio.

L'insieme così ottenuto, per quanto possa essere considerato, in generale, chimicamente neutro, non è esente da reazioni interne; basti soltanto pensare al fatto che, almeno in linea teorica, il processo di indurimento, che interessa la matrice cementizia del materiale, ha durata pressoché infinita.

Mentre però tale processo ha valenza benefica sia in termini di prestazioni sia in termini di durabilità, esistono numerosi altri fenomeni che avvengono all'interno della pasta di cemento, molti dei quali hanno quale ultimo risultato il danneggiamento e la disaggregazione dell'insieme.

L'insieme di tali fenomeni rappresenta il meccanismo in base al quale il calcestruzzo subisce un progressivo declino che può portarlo, con il tempo, a non essere più in grado di assolvere le funzioni per le quali è stato concepito all'interno di una struttura.

1.2.1. Il meccanismo di invecchiamento del calcestruzzo

A causa delle interazioni con l'ambiente esterno, il calcestruzzo e il calcestruzzo armato in opera sono soggetti ad una fitta serie di fenomeni di natura chimico-fisica che influenzano e progressivamente cambiano la natura del materiale e la sua capacità strutturale.

I materiali da costruzione devono essere in grado di assolvere determinate funzioni all'interno delle strutture di cui fanno parte, e la capacità di assolvere tali funzioni è detta capacità prestazionale. Tale caratteristica non è costante nel tempo, in quanto i materiali subiscono in genere delle variazioni importanti sotto il profilo fisico e, di conseguenza, meccanico. Il progressivo allontanamento dalla capacità prestazionale iniziale è di fatto l'invecchiamento del materiale.

La proprietà di mantenere nel tempo la capacità prestazionale è detta durabilità.

Come già accennato, sono numerosi i fenomeni che incarnano il meccanismo in base al quale il calcestruzzo invecchia, ma tutti conducono sostanzialmente ad un effetto deformativo che coinvolge la pasta di cemento oppure l'insieme pasta-inerte o, ancora, l'intero insieme cemento armato.

Le deformazioni che la pasta di cemento può subire possono avere cause fisiche, chimiche o meccaniche. Le cause meccaniche sono caratterizzate dalla presenza di un carico applicato alla struttura, sia esso un campo di sollecitazione o un gradiente termico; le cause fisico-chimiche non discendono dalla presenza di carichi, ma si configurano come fenomeni interni legati alla natura intrinseca del materiale.

Il meccanismo di invecchiamento del calcestruzzo è basato proprio su quest'ultima categoria di fenomeni che avvengono indipendentemente dai carichi e il cui sviluppo è governato, sostanzialmente, solo dal passare del tempo, oltre che, naturalmente, dall'instaurarsi delle condizioni ambientali necessarie.

Semplificando, si può dire che l'invecchiamento è un insieme di reazioni chimiche cui seguono alcuni fenomeni fisici a livello dapprima microscopico poi macroscopico. Tali reazioni sono quasi tutte legate e provocate dalla presenza, all'interno della pasta di cemento, di un certo quantitativo di acqua, detta acqua di impasto.

L'acqua è una componente fondamentale del calcestruzzo in quanto permette il verificarsi delle reazioni con il cemento e assicura il legame fra gli inerti e la pasta di cemento, conferendo all'impasto la necessaria lavorabilità.

Semplici considerazioni sulla porosità capillare della pasta di cemento permettono di identificare il quantitativo di acqua stechiometricamente necessaria per permettere l'idratazione del cemento e di saturare i pori del gel di cemento⁶. Al di là del fatto che tale quantitativo è solitamente aumentato di una frazione tale da permettere una migliore lavorabilità dell'impasto, interessa soltanto considerare il fatto che, dato che i fenomeni di idratazione (presa e indurimento) non sono limitati nel tempo, è sempre disponibile una certa quantità di acqua per partecipare a reazioni chimiche o per influenzare in maniera decisiva alcuni fenomeni fisici.

1.2.1.1. Espansione termica

In virtù di un coefficiente di espansione termica dell'ordine di $10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, il calcestruzzo subisce deformazioni per effetto delle variazioni di temperatura.

La variazione di volume conseguente determina movimenti di dilatazione e contrazione che producono quadri fessurativi in alcuni casi di notevole entità; inoltre, specie a seguito di ripetuti cicli di contrazione/dilatazione, si instaurano campi di sollecitazione interna che tendono a spezzare il legame tra la pasta e gli inerti, causando una vera e propria disintegrazione del materiale.

Si precisa poi che il calcestruzzo risulta indebolito in quanto può accadere che, attraverso le fessure, si insinui acqua, con conseguenze indesiderabili in termini di corrosione delle armature e di lisciaviazione.



Fessurazione di origine termica in una pavimentazione in calcestruzzo

L'effetto delle variazioni di volume sul calcestruzzo è comunque determinato in maniera più che sensibile dal grado di vincolo dell'elemento inserito all'interno della struttura. Per questo motivo risulta particolarmente difficile definire l'entità del danno se non in rapporto all'opera vista nel suo complesso. Strutture con alto grado di iperstaticità subiscono stati di sollecitazione interni di entità maggiore rispetto a strutture isostatiche⁷.

In ogni caso, la fessurazione si verifica quando gli sforzi di tensione interni sono tali da provocare il superamento del limite di resistenza a trazione proprio del calcestruzzo.

Un particolare caso di espansione termica si verifica, al momento del getto, per effetto della generazione di calore provocata dal complesso di reazioni di presa e indurimento, tutte fortemente esotermiche.

Tali reazioni permettono al materiale di acquisire consistenza e robustezza, conferendogli una forma ben precisa, ma la quantità di calore che producono induce un'espansione termica che contrasta il processo stesso di compattazione, inducendo microfessure diffuse e abbastanza estese, oltre ad indebolire la struttura del calcestruzzo, che risulta perciò più fragile e tendente alla frattura.

MATERIALI
DA COSTRUZIONE

LE STRUTTURE
IN ESERCIZIO

DIAGNOSI
DELLE STRUTTURE

RESTAURO
E CONSOLIDAMENTO

⁶ Per ogni 100 kg di cemento che scompare in seguito all'idratazione, si formano 67,9 litri di gel di cemento, dotato di una porosità intrinseca pari al 28%. Ciò implica che per saturare 100 kg di cemento occorrono $0,28 \cdot 97,9 = 19$ litri di acqua, e che, di conseguenza, il minimo quantitativo di acqua necessaria per idratare 100 kg di cemento risulta pari a $23 + 19 = 42$ litri.

⁷ Le strutture isostatiche non subiscono, secondo la classica teoria delle costruzioni, alcuno stato di sollecitazione per variazioni di volume o cedimenti imposti, ma il grado di iperstaticità è, in tale caso, determinato dal fatto che il calcestruzzo è un materiale continuo e limitatamente elastico, in cui i componenti non godono di libertà di movimento.

Un caso specifico di degrado per cause termiche è quello dell'incendio.

In tale situazione, per temperature di circa 100 – 150°C, la pasta di cemento subisce dapprima una dilatazione, poi una contrazione per effetto della decomposizione dei composti idratati.

Si instaura così uno stato di coazione all'interfaccia pasta di cemento-aggregati, in quanto questi ultimi continuano a dilatarsi; la conseguenza evidente di tale stato tensionale è l'insorgere di microfessure diffuse.

Se la temperatura aumenta ulteriormente (da 500 a 700°C, in base al tipo di inerte), si verifica un netto scollamento, che determina il distacco del copriferro e l'esposizione dei ferri di armatura. Inoltre la resistenza meccanica del calcestruzzo si riduce fino al 30% del valore iniziale.

Se il copriferro non ha uno spessore adeguato o il calcestruzzo è mal compattato o disomogeneo, le armature si surriscaldano prima del calcestruzzo, provocando uno stato tensionale che determina il distacco del copriferro stesso.

1.2.1.2. Formazione di ghiaccio

La formazione di ghiaccio, sebbene strettamente legata all'applicazione di un carico di natura termica, può essere considerato un fenomeno di natura chimico-fisica in quanto dovuto alla presenza dell'acqua di impasto.

Sottoposta ad una specifica temperatura (la temperatura di congelamento), l'acqua subisce un passaggio allo stato solido, con un aumento del volume proprio pari al 9% circa. Dal momento che tale acqua è contenuta all'interno delle cavità di un corpo poroso, a seguito dell'aumento di volume, si instaura un regime di pressione in grado di rigonfiare il materiale, provocando una fessurazione che può degenerare in una vera e propria distruzione del materiale, soprattutto se quest'ultimo è sottoposto a cicli ripetuti di gelo/disgelo.

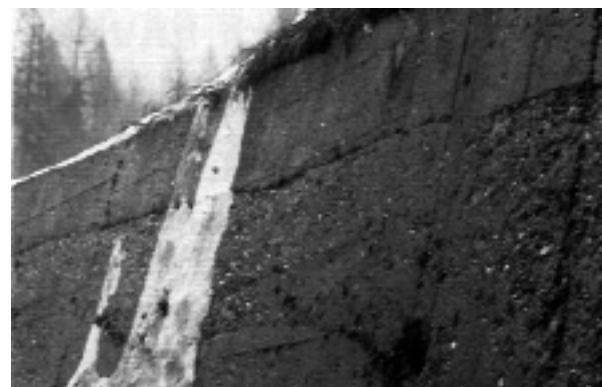
L'azione distruttiva, come accennato, si manifesta sotto forma di fessurazioni più o meno estese, a volte di veri e propri distacchi e sfaldamenti a livello superficiale.

Va precisato che il raggiungimento della temperatura di congelamento non è di per sé una condizione sufficiente per permettere alla formazione di ghiaccio all'interno della pasta di cemento di provocare seri danneggiamenti, a causa del fatto che il grado di saturazione, definito come percentuale di acqua presente rispetto al massimo volume di acqua possibile, risulta mediamente pari al 91%. Teoricamente, perciò, l'espansione potrebbe avvenire senza effetti distruttivi.

Il fatto che la formazione di ghiaccio risulti comunque in grado di provocare danni al calcestruzzo è dovuto al fatto che il grado di saturazione non è uguale in ogni punto dell'impasto, per cui, in tutte le zone in cui esso assume valore superiore al 91%, l'espansione volumetrica dell'acqua è in grado di provocare seri danneggiamenti alla struttura del calcestruzzo. Concludendo, si aggiunge soltanto che il danneggiamento legato alla formazione di ghiaccio può essere aggravato dalla riduzione della capacità prestazionale del calcestruzzo; già

nel 1968, infatti, Tognon, presentò al 5° Congresso sulla chimica del cemento, i risultati di uno studio da lui condotto, in base al quale la resistenza flessionale del calcestruzzo diminuisce progressivamente tra 0°C e - 90°C, temperatura in corrispondenza della quale presenta un minimo, per poi aumentare di nuovo.

Senza entrare nel merito della discussione ancora in atto sull'argomento, basti pensare che alla ridotta capacità flessionale, segue una ridotta resistenza a trazione e quindi una maggiore predisposizione alla frattura da parte del calcestruzzo, cioè una tendenza al danneggiamento più accentuata.



Degrado per formazione di ghiaccio di un muro in calcestruzzo

1.2.1.3. Il ritiro della pasta di cemento

Essendo un materiale poroso, il calcestruzzo subisce alcune deformazioni al variare dell'umidità relativa dell'ambiente; tali deformazioni costituiscono un fenomeno fisico che prende il nome di *ritiro*. L'entità di tale fenomeno, prima che da qualunque altro fattore, dipende essenzialmente dal valore dell'umidità relativa: per un valore di umidità pari al 94%, infatti, esso risulta nullo, ed aumenta al diminuire di tale valore.

La causa primaria del ritiro del calcestruzzo risiede nelle variazioni di volume della pasta di cemento, in quanto quest'ultima tende a contrarsi o dilatarsi a seguito, rispettivamente, di una diminuzione o di un aumento dell'umidità relativa. In una struttura vincolata iperstaticamente il ritiro induce uno stato di sforzo che, in alcune zone, risulta di trazione. Se il valore di tale trazione supera il limite di resistenza del calcestruzzo (notoriamente basso), si verifica la fessurazione.

Il meccanismo di azione del ritiro è stato in passato spiegato con considerazioni abbastanza semplici, in base alle quali il ritiro era una conseguenza della rimozione di acqua dall'impasto e il rigonfiamento dell'introduzione di un maggiore quantitativo d'acqua all'interno dello stesso impasto. Il fenomeno è però molto complesso e la sua spiegazione è tutt'ora oggetto di studio da parte di molti ricercatori.

Secondo le più recenti teorie, il ritiro ed il rigonfiamento di una pasta cementizia in conseguenza di variazioni di umidità relativa, sono principalmente dovute all'entrata o alla fuoriuscita di molecole d'acqua dagli strati molecolari del gel di cemento.

Da un punto di vista pratico, è utile ricordare la teoria secondo la quale la diminuzione di umidità relativa provoca una riduzione dell'acqua in grado di evaporare dal solido e, quindi, un aumento della tensione superficiale; il ritiro di una massa di calcestruzzo si traduce così in uno stato di pressione applicato alla massa stessa, con relativo stato di microfessurazione interno e aumento della fragilità dell'insieme.

Gli effetti del ritiro, come nel caso dell'espansione per cause termiche, sono rappresentati da una microfessurazione molto estesa che indebolisce il materiale in quanto lo rende più vulnerabile agli attacchi di altre sostanze, quale ad esempio l'acqua.

Aumentando il rapporto acqua-cemento dell'impasto, si verifica un ritiro maggiore perché maggiore è la quantità d'acqua che subisce direttamente l'effetto delle variazioni di umidità. Al contrario, ad un aumento del rapporto inerte-cemento, corrisponde una minore sensibilità nei confronti delle variazioni di umidità e, quindi, un ritiro minore. Scarsa è l'influenza esercitata dal tipo di cemento, mentre alcuni additivi sono in grado di provocare notevoli effetti in termini di ritiro⁸.

⁸ In particolare, gli additivi acceleranti tendono a aumentare il ritiro, mentre i fluidificanti tendono a ridurlo. Alcuni specifici prodotti espansivi, poi, consentono di ridurre il ritiro fin quasi ad eliminarlo.