



Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein
Société suisse des ingénieurs et des architectes
Società svizzera degli ingegneri e degli architetti

Durabilità del calcestruzzo

Causa dei danni

Prevenzioni

Risanamenti

Gruppo specializzato SIA per la costruzione industrializzata

SIA-Sezione Ticino

**Gruppo tecnico scientifico per la conservazione di monumenti
ed il risanamento di costruzioni (WTA), Sezione Svizzera**

SIA Documentazione D 007

**SIA, Società svizzera degli ingegneri e degli architetti
Casella postale, CH-8039 Zurigo, Tel. 01 / 201 15 70**

Analisi del calcestruzzo in laboratorio

M. Collepari, Ancona

1. Aggressione del calcestruzzo da parte di agenti naturali ed artificiali

La durabilità del calcestruzzo è la capacità del materiale a resistere agli attacchi chimico-fisici dell'ambiente. Esistono fondamentalmente due tipi di attacchi: quelli provocati da agenti (come il mare, il gelo-disgelo, ecc.) e quelli provocati da agenti artificiali (per esempio i prodotti delle industrie chimiche quali acidi forti, le sostanze zuccherine, ecc.).

In generale, la tecnologia attuale consente di produrre un calcestruzzo durevole qualunque sia il tipo di attacco proveniente da agenti naturali, purché si prendano le opportune misure preventive nelle seguenti cinque operazioni del confezionamento del calcestruzzo: proporzionamento degli ingredienti, miscelazione, trasporto, compattazione e stagionatura. In genere tutte le costruzioni dell'ingegneria civile (dai ponti alle opere idrauliche, dalle autostrade agli edifici) sono sottoposte, salvo rarissime eccezioni, solo all'attacco degli agenti naturali, mentre le strutture in calcestruzzo destinate agli altri settori dell'ingegneria (particolarmente quelli dell'ingegneria chimica, mineraria, e meccanica) possono venire in contatto anche con agenti aggressivi artificiali coinvolti nel particolare processo chimico, minerario, ecc. Queste costruzioni particolari vanno affrontate caso per caso esaminando l'agente aggressivo artificiale coinvolto, e se quest'ultimo dovesse risultare particolarmente aggressivo nei confronti del calcestruzzo (si pensi ad esempio ad un condotto o serbatoio

per acido nitrico) il problema dovrà essere risolto rivestendo la struttura in calcestruzzo con un materiale inattaccabile dallo specifico agente chimico (1).

E' pertanto necessario limitare questo breve rapporto solo ai casi di aggressione e durabilità di strutture in calcestruzzo destinate all'ingegneria civile ed esposte all'attacco di agenti aggressivi naturali. I principali agenti aggressivi naturali sono costituiti da solfati, cloruri ed anidride carbonica abbondantemente presenti sul nostro pianeta; agli attacchi derivanti da questi composti chimici va aggiunto quello provocato da un fenomeno fisico come il gelo-disgelo; verrà inoltre presa in considerazione la reazione alcali-aggregato per le sue nefaste conseguenze anche se questo fenomeno non può essere a rigore considerato come un attacco aggressivo dell'ambiente nei confronti del calcestruzzo, ma piuttosto un deterioramento che avviene all'interno del materiale causato da una non corretta scelta di due componenti del calcestruzzo: il cemento ed in particolare l'aggregato.

2. Diagnosi in laboratorio del tipo di aggressione

Il presente rapporto ha per scopo di esaminare i metodi disponibili in laboratorio per una diagnosi del tipo di aggressione. Una corretta diagnosi della degradazione del calcestruzzo consente da una parte di evitare di ripetere l'errore nel calcestruzzo che dovrebbe essere ancora confezionato in condizioni ambientali

analoghe a quelle che hanno provocato il deterioramento, dall'altra di scegliere più adeguatamente il materiale più idoneo nella eventuale operazione di restauro della struttura degradata.

Nei paragrafi che seguono verranno succintamente esaminati come diagnosticare le cinque cause di degradazione elencate nel paragrafo precedente tenendo presente che nella pratica non è infrequente il caso in cui le cause di degradazione possano essere più di una, soprattutto laddove il calcestruzzo sia stato confezionato senza rispettare alcune raccomandazioni di carattere generale sempre valide indipendentemente dal particolare tipo di attacco aggressivo (1); queste raccomandazioni generali sono:

- a) impiegare un rapporto acqua/cemento relativamente basso (molto spesso nell'intervallo 0,40-0,50) allo scopo di ottenere un calcestruzzo con la minore microporosità capillare e quindi con la massima impermeabilità all'acqua ed agli agenti aggressivi;
- b) compattare al massimo il calcestruzzo dopo la messa in opera per rimuovere tutta l'aria intrappolata (quella residua non dovrebbe superare l'1-2%) al fine di ottenere un calcestruzzo privo di vespai esterni e/o interni riducendo la microporosità del calcestruzzo;
- c) stagionare il più a lungo possibile con bagnatura, con agenti stagionanti anti-evaporanti o con protezione meccanica (teli), il calcestruzzo dopo la rimozione delle casseforme: una lunga stagionatura favorirà una più completa idratazione del cemento (con conseguente diminuzione della microporosità capillare) ed una minore fessurazione provocata dal ritiro plastico e da quello di essiccamento.

Accanto alle suddette raccomandazioni di

carattere generale ve ne potranno essere delle altre specifiche per il tipo di attacco (2). Esse sono:

- a) per l'attacco solfatico: uso di cementi resistenti ai solfati (cementi Portland a basso tenore di C_3A , cementi di miscela con pozzolana, cenere volante, loppa d'altoforno);
- b) per l'attacco dei cloruri: uso dei cementi di miscela, copriferri di spessore non inferiore a 40 mm;
- c) per l'attacco dell'anidride carbonica: uso dei cementi di miscela (solo per i calcestruzzi non armati) laddove si teme che l'anidride carbonica aggressiva possa dilavare il $Ca(OH)_2$ ed il $CaCO_3$, l'uso di copriferri di spessore adeguato laddove la carbonatazione può ridurre il contenuto di $Ca(OH)_2$ che esercita una benefica azione protettiva nei confronti delle armature (in tal caso è raccomandabile l'uso di cemento Portland);
- d) per l'attacco del gelo-disgelo: inglobamento di microbolle d'aria (diametro 100-200 micron e volume 4-6%);
- e) per la reazione alcali-aggregato: uso di cementi di miscela laddove non sia possibile impiegare cementi con basso contenuto di alcali ($\leq 0,6\%$) ed aggregati non reattivi.

2.1 Diagnosi dell'attacco solfatico

Il solfato attacca il calcestruzzo in quanto provoca la formazione di gesso, ettringite e thaumasite (3). Tutti e tre i processi sono accompagnati da fenomeni espansivi che esteriormente si manifestano attraverso fessurazioni, rigonfiamenti, distorsioni delle strutture e distacchi da parte di materiale. La Tavola 1 mostra un eclatante fenomeno di



Tavola 1 Muro all'interno di una galleria fessurato e distorto per effetto di un attacco solfatico.

degrado consistente nella vistosa deformazione di un nuovo calcestruzzo all'interno di una galleria, in conseguenza della formazione di ettringite prima e thaumasite dopo.

L'attacco dei solfati deve essere sospettato in presenza di acque selenitrose e di terreni con tenore di solfato superiore allo 0,2%, di acque marine di ambienti industriali che emettono nell'atmosfera vapori o gas ricchi di SO_2 e/o SO_3 .

La semplice analisi chimica quantitativa del contenuto di solfato in un calcestruzzo può evidenziare la degradazione provocata da questo tipo di attacco. Normalmente in un calcestruzzo è presente una certa percentuale di solfato, in virtù del fatto che il cemento contiene del solfato di calcio (dal 3 al 4% come SO_3 rispetto al peso di cemento) come regolatore della presa. Se si considera il contenuto di cemento in $1 m^3$ di calcestruzzo (normalmente da 300 a 400 kg) ed il peso specifico (normalmente da 2400 a 2500 kg/m^3), si può facilmente calcolare il contenuto di solfato che ci si può aspettare nel

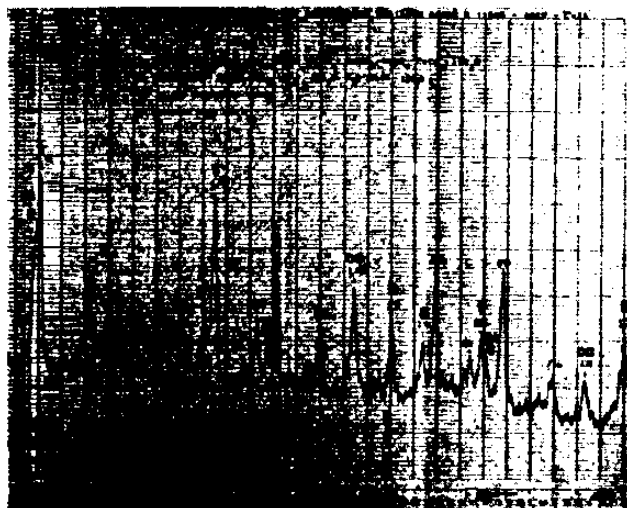
calcestruzzo (mediamente da 0,4 a 0,6% rispetto al peso di calcestruzzo). Pertanto un contenuto di SO_3 nel calcestruzzo decisamente superiore ad un 0,6% è sintomo che il degrado lamentato è da attribuirsi all'attacco solfatico. Nel caso in cui non si conosca il contenuto di SO_3 nel cemento impiegato, né il contenuto di cemento con cui si confezionò il calcestruzzo, un ottimo espediente per calcolare quale avrebbe dovuto essere il contenuto di SO_3 "normale", è quello di analizzare il solfato in una o più porzioni di calcestruzzo prelevate in una zona della struttura sicuramente non ancora degradata. Se il contenuto di solfato risulta essere significativamente maggiore (per esempio più del 30%) rispetto al contenuto "normale" di SO_3 si può fortemente sospettare che l'attacco sia di natura solfatica. In genere, se il campione è prelevato in una zona degradata per effetto dei solfati, il contenuto di SO_3 risulta essere almeno il doppio di quello "normale".

Tuttavia, la differenza tra il valore di SO_3 trovato nel calcestruzzo danneggiato ed il suddetto valore "normale" dipende fondamentalmente da tre fattori: a) dalla quantità di solfato penetrato dall'ambiente nel calcestruzzo; b) dallo strato di calcestruzzo penetrato dal solfato; c) dalle modalità di prelievo del campione. Su quest'ultimo fattore val la pena di precisare che se il campione è prelevato solo nella porzione di materiale presumibilmente degradato dall'attacco solfatico (per esempio la parte superficiale di un muro immerso in acqua del mare) il contenuto di SO_3 risulterà molto elevato. Se, invece, il campione da analizzare è stato prelevato in una zona poco o per nulla coinvolta nel fenomeno degradante, il contenuto di SO_3 nel calcestruzzo danneggiato risulterà pressoché coincidente con il suddetto valore "normale" di SO_3 nel calcestruzzo. Per quanto quest'aspetto del problema appaia di una banalità sconvolgente, tuttavia la maggior parte delle diagnosi errate sulle cause di

degradazione del calcestruzzo (non solo per l'attacco solfatico ma anche per gli altri agenti aggressivi) risultano tali non già per errore dell'analista ma per effetto di un prelievo del campione scarsamente o affatto significativo.

Un'analisi qualitativa per diffrazione dei raggi X sul calcestruzzo (possibilmente privato dei suoi inerti e prelevato da una zona di sicuro degrado) confermerà o meno la presenza di $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, (gesso biidrato), di $\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ (ettringite) e/o di $\text{CaSO}_4 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot \text{CaSiO}_3 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$ (thaumasite). In genere il gesso e l'ettringite presenti in una pasta di cemento "giovane" (meno di una settimana) come conseguenza della presenza del solfato di calcio nel cemento, non sono più rilevabili con i raggi X in una pasta di cemento "matura". La Tavola 2 mostra un esempio di diffrattogramma in un campione di calcestruzzo (privato grossolanamente dagli inerti grossi) degradato per effetto dell'attacco solfatico: nel diffrattogramma appaiono molto evidenti i picchi relativi all'ettringite ed alla thaumasite.

Tavola 2 Diffrattogramma ai raggi X di un campione di calcestruzzo degradato per attacco solfatico con formazione di ettringite e thaumasite.



2.2 Diagnosi dell'attacco dei cloruri

I cloruri penetrando attraverso il calcestruzzo possono provocare una grave corrosione dei ferri di armatura (4). Per effetto dell'ossidazione del ferro, che avviene con aumento di volume, il calcestruzzo del copriferro può essere fessurato, sollevato o completamente espulso come appare nella Tavola 3. Pertanto il cloruro esercita una terribile azione aggressiva nei confronti sia dei ferri che del calcestruzzo. Per questo motivo le normative dei vari Paesi limitano più o meno severamente il contenuto di cloruro nei componenti del calcestruzzo. Tuttavia, nonostante queste restrizioni, il cloruro può penetrare nel calcestruzzo dall'ambiente (soprattutto il mare o zone molto fredde dove si fa uso di sali a base di cloruro per scongelare il ghiaccio che si depositerebbe sulle pavimentazioni stradali, autostradali e pedonali).

Anche il cloruro può essere evidenziato mediante una semplice analisi chimica quantitativa effettuabile, come quella del solfato, in un comune laboratorio di chimica.

Tavola 3 Calcestruzzo degradato per effetto della penetrazione dei cloruri e corrosione dei ferri d'armatura.



Anche per il cloruro valgono le raccomandazioni, sopra riportate al paragrafo 2.1, circa le modalità del prelievo del campione da analizzare e circa il problema del contenuto "normale" di cloruro.

2.3 Diagnosi dell'aggressione da anidride carbonica

L'anidride carbonica (CO_2) può esercitare due tipi di attacchi, entrambi più lenti e molto meno gravi concernenti l'aggressione da solfato o da cloruro (5).

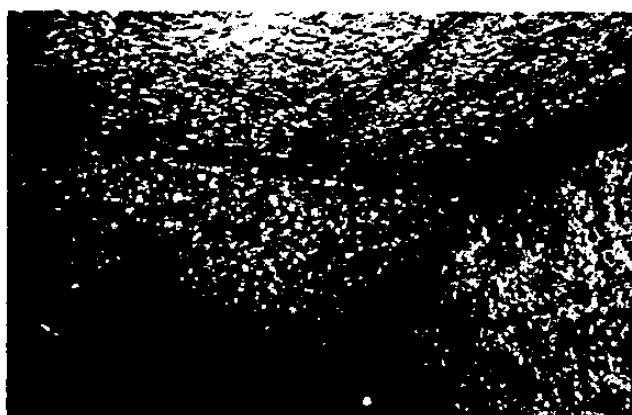
Il primo tipo di attacco da anidride carbonica si esplica attraverso una rimozione parziale della pasta cementizia da parte di acque correnti ricche in CO_2 "aggressiva" (molto spesso acque "dolci" di alta montagna). Il fenomeno che prende il nome di "dilavamento" consiste nella trasformazione del $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (presente normalmente in un calcestruzzo confezionato con cemento Portland) prima in carbonato di calcio, CaCO_3 , relativamente poco solubile, e poi in bicarbonato di calcio, $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$, sale molto più solubile e pertanto dilavabile dall'acqua corrente. Il fenomeno si esplica attraverso una rimozione preferenziale della pasta di cemento rispetto agli inerti (soprattutto se silicei) aventi una microstruttura meno porosa.

Il secondo tipo di attacco si esplica, invece, attraverso una penetrazione della CO_2 presente nell'atmosfera nello strato superficiale di calcestruzzo. Esso appare più evidente nelle aree cittadine dove maggiore è la concentrazione di CO_2 proveniente dai gas di scarico delle autovetture. Il fenomeno che prende il nome di "carbonatazione" consiste nella neutralizzazione del $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e formazione di CaCO_3 che rimane in situ. Questo processo rende i ferri di armatura più facilmente ossidabili per la mancata protezione da parte di un ambiente basico (passivazione) e pertanto di per sé esso non è a rigore un vero

e proprio fenomeno di degradazione, anche se potenzialmente crea le condizioni di una corrosione potenziale dei ferri con conseguente espulsione del calcestruzzo.

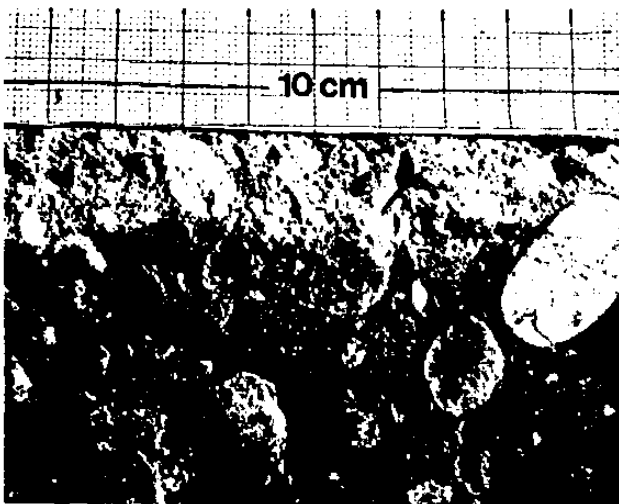
Per evidenziare la presenza in atto del fenomeno del dilavamento è essenziale l'osservazione visiva della superficie del calcestruzzo che si presenterà per lo più con gli inerti in vista più o meno sporgenti a seconda dell'entità dell'attacco (Tavola 4). Purtroppo l'analisi chimica, come anche quelle per diffrazione dei raggi X o di altre tecniche come la DTA e DTG, si rivelano di scarso ausilio nella diagnosi del fenomeno per due ragioni: innanzitutto il prodotto ultimo della reazione degradante, il bicarbonato di calcio, proprio per la sua solubilità viene asportato dall'acqua e non è più rilevabile nel materiale residuo; in secondo luogo il prodotto intermedio della reazione, il carbonato di calcio, è presente anche nella maggior parte degli inerti fini e grossi (soprattutto quelli di natura calcarea), cosicché risulta molto difficile, se non impossibile, differenziare una porzione di materiale attaccato dall'anidride carbonica aggressiva rispetto ad una porzione di calcestruzzo prelevato in una zona più interna della struttura e quindi non ancora aggredito.

Tavola 4 Calcestruzzo dilavato da acque contenenti anidride carbonica aggressiva.



Per evidenziare la presenza in atto del fenomeno della "carbonatazione" si può ricorrere ad un test colorimetrico utilizzando il fatto che una soluzione acquosa di fenolnaftalina si colora in rosso se viene messa a contatto con calcestruzzo molto alcalino ($pH > 10,2$) per la presenza di $Ca(OH)_2$, ed appare incolore se viene a contatto con un calcestruzzo che per effetto della "carbonatazione" non presenta tracce di $Ca(OH)_2$ essendo questo completamente trasformatosi in $CaCO_3$ ($pH \leq 8,6$). La Tavola 5 mostra il diverso colore che assume un provino di calcestruzzo immerso in una soluzione acquosa di fenolnaftalina: nella parte più esposta all'aria dove la carbonatazione si è verificata il provino appare chiaro, mentre nella parte rivolta verso l'interno il provino si colora in rosso. La demarcazione tra i due colori indica, rispetto alla superficie esposta all'aria, lo spessore di calcestruzzo carbonatato e quindi non più capace di proteggere i ferri dalla corrosione. Naturalmente se, in una carota estratta da una struttura in calcestruzzo armato, tutto il copriferro appare incolore, ciò indica che i ferri di armatura sono potenzialmente più

Tavola 5 Calcestruzzo diversamente colorato dalla fenolnaftalina per effetto della parziale carbonatazione. La zona più chiara corrisponde al calcestruzzo penetrato dall'anidride carbonica.



esposti ai processi di corrosione i quali per avvenire, richiedono comunque che vi sia penetrazione di umidità e di ossigeno dell'aria.

2.4 Diagnosi della degradazione provocata dalla reazione alcali-aggregato

La reazione consiste in una combinazione degli alcali presenti nel cemento con i cosiddetti aggregati reattivi (per lo più consistenti in silice amorfa o criptocristallina) per formare dei prodotti (generalmente silicati di sodio) che in presenza di umidità tendono fortemente a rigonfiare provocando vistosi fenomeni fessurativi e di distacco del calcestruzzo (6). La soglia critica del contenuto di alcali (espressi come Na_2O) nel cemento è fissata allo 0,6%. Tuttavia la tendenza più recente è quella di valutare il contenuto di alcali globalmente contenuto in un volume di calcestruzzo, giacché cementi ricchi in alcali ma presenti in quantità modesta nel calcestruzzo non apportano un contenuto globale in alcali maggiore rispetto a cementi più poveri in alcali ma presenti in maggior dosaggio. Il valore critico del contenuto in alcali così espresso dovrebbe essere situato tra 2 e 3 kg di Na_2O per m^3 di calcestruzzo.

Anche per questo tipo di aggressione l'osservazione visiva della struttura degradata si rileva assolutamente essenziale ai fini della diagnosi. Infatti i metodi analitici (chimici e strumentali) finora disponibili sono per lo più idonei solo per valutare preventivamente il fenomeno attraverso una determinazione quantitativa degli alcali del cemento, ed attraverso una valutazione chimica (ASTM C 289) o fisica (ASTM C 227) degli inerti che verranno impiegati nel confezionamento del calcestruzzo.

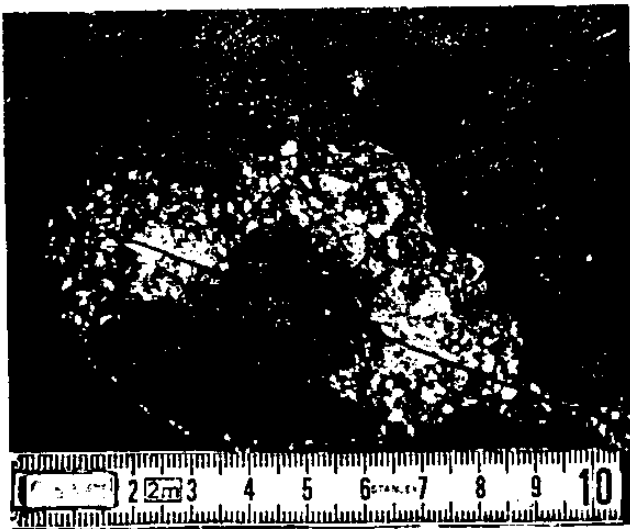
A seconda delle varie circostanze, le fessurazioni causate dalla reazione alcali-aggregato si presentano in forme differenti.



Tavola 6 Calcestruzzo degradato per effetto della reazione alcali-aggregato.

Nel caso di strutture massive in calcestruzzo non armato e contenenti un numero rilevante di granuli di aggregato reattivo distribuiti omogeneamente nel conglomerato, la fessurazione appare distribuita casualmente sotto forma di una ragnatela (Tavola 6). La presenza ed il particolare posizionamento dei ferri di armatura, come anche le particolari forme geometriche della struttura possono interferire favorendo l'apparizione delle

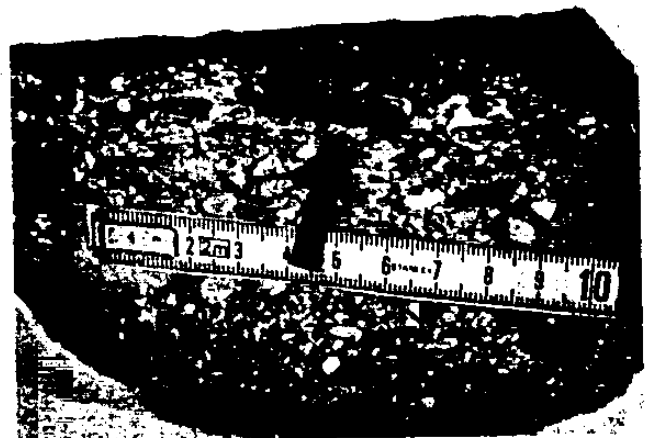
Tavola 7 Provino di calcestruzzo proveniente da una pavimentazione degradata per effetto del pop-aut causato da un granulo di inerte reattivo.



fessure secondo forme meno casuali e disordinate. In ogni caso il fenomeno fessurativo (a differenza di quello provocato dal ritiro plastico o da essiccamento) é accompagnato da un rigonfiamento (soprattutto nelle zone più esposte all'umidità ambientale) che può arrivare anche a vistose distorsioni o pericolosi sollevamenti di tutta la struttura.

Qualora la presenza di aggregati reattivi sia limitata a pochi granuli, per lo più situati in vicinanza della superficie esposta all'umidità, si verifica il fenomeno del "pop-out" consistente nel sollevamento o espulsione di un'areola di calcestruzzo attorno al granulo reattivo. La Tavola 7 illustra un campione di pavimento in calcestruzzo nel quale é in atto un fenomeno di "pop-out". Sezionando il campione attraverso la zona di calcestruzzo sollevato si può evidenziare il granulo dell'aggregato reattivo fonte del fenomeno degradante (Tavola 8). Un prelievo del granulo consentirà, mediante un'analisi chimica e diffrazione dei raggi X di confermare la diagnosi. L'assenza di solfato nel granulo di aggregato porterà ad escludere che il fenomeno sia stato provocato

Tavola 8 Sezione del provino della Tavola 7 illustrante l'inerte reattivo che ha causato il pop-aut.



dalla accidentale presenza di gesso o anidride (CaSO_4) dell'aggregato. La presenza di una banda diffusa intorno ai 22°C nel diffrattogramma ai raggi X (Tavola 9) confermerà la presenza in atto della reazione alcali-aggregato dovuta a silice amorfa. Infine un'analisi chimica del contenuto in alcali della pasta cementizia intorno all'inerte potrà fornire altre utili conferme circa la effettiva causa del degrado.

2.5 Diagnosi della degradazione provocata da cicli di gelo-disgelo

L'alternarsi della temperatura ambientale intorno allo 0°C , la presenza di umidità all'interno del calcestruzzo ed infine l'assenza di microbolle di aria inglobata nella pasta di cemento del conglomerato, sono le tre condizioni necessarie e sufficienti per il manifestarsi del degrado provocato dalla formazione di ghiaccio (7). Il fenomeno si presenta sotto forma di sollevamenti di calcestruzzo sulla superficie della struttura ("scaling") per lo più appartenente a costruzioni idrauliche o consistente in pavimentazioni esposte al ristagno di acqua piovana. Dopo aver accertato la esistenza delle altre due condizioni (temperatura ed

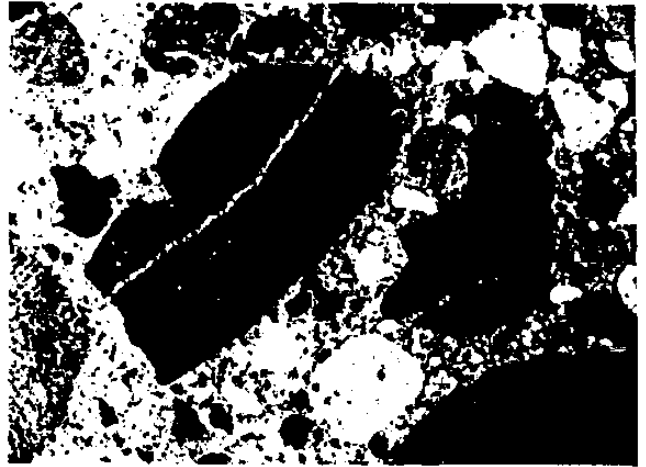


Tavola 10 Provino di calcestruzzo privo di microbolle di aria osservate al microscopio ottico.

umidità) la diagnosi deve essere supportata da un'osservazione al microscopio ottico della matrice cementizia: l'assenza di microbolle d'aria (Tavola 10) confermerà la diagnosi del degrado da gelo-disgelo, anche se la sola presenza di microbolle d'aria (Tavola 11) non può necessariamente escludere che la degradazione sia stata provocata dai cicli di gelo-disgelo, in quanto occorre verificare che la dimensione delle microbolle e la loro reciproca distanza siano entrambe di adeguato valore (100-200 micron).

Tavola 9 Diffrattogramma dei raggi X con banda diffusa intorno a 22°C e corrispondente a silice reattiva.

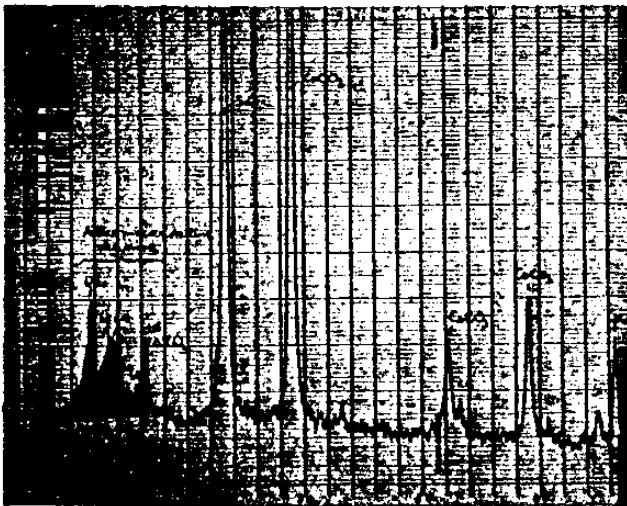
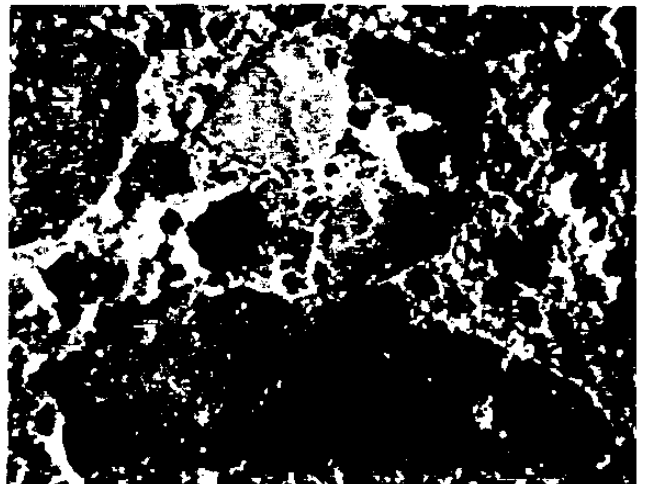


Tavola 11 Provino di calcestruzzo con microbolle di aria osservate al microscopio ottico.



Bibliografia

- (1) M. Collepari, "Durabilità del calcestruzzo", *La Prefabbricazione*, 2, 73-79, (1981).
- (2) M. Collepari, "Degradazione e durabilità del calcestruzzo", *La Prefabbricazione*, 9, 567-575, (1984).
- (3) M. Collepari, *Scienza e Tecnologia del Calcestruzzo*, pg 191, Editore Hoepli, Milano, (1980).
- (4) M. Collepari, *Scienza e Tecnologia del Calcestruzzo*, pg 249, Editore Hoepli, Milano, (1980).
- (5) M. Collepari, *Scienza e Tecnologia del Calcestruzzo*, pg 183, Editore Hoepli, Milano, (1980).
- (6) M. Collepari, *Scienza e Tecnologia del Calcestruzzo*, pg 277, Editore Hoepli, Milano, (1980).
- (7) M. Collepari, *Scienza e Tecnologia del Calcestruzzo*, pg 154, Editore Hoepli, Milano, (1980).