

LA DIAGNOSI DEL DEGRADO DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO

LUIGI COPPOLA (*)

1. INTRODUZIONE

Le cause di degrado delle opere in calcestruzzo, ancorchè non numerose e relativamente ben definite, non sempre sono evidenziabili attraverso un semplice sopralluogo e talvolta neppure attraverso prove di laboratorio più o meno sofisticate. Talvolta la diagnosi del degrado si presenta molto complessa per il concorso di più cause, alcune delle quali hanno contribuito solo a promuovere il fenomeno (per esempio un processo fessurativo di origine termica o igrometrica) ed altre hanno concorso all'aggravamento del degrado in una fase successiva (per esempio penetrazione di sali aggressivi attraverso le fessure).

In linea di massima si può prevedere che almeno quattro sono le operazioni - non necessariamente tutte sempre richieste - attraverso le quali occorre procedere per arrivare all'emissione di una diagnosi del degrado che ha coinvolto un'opera in calcestruzzo. Nella Fig. 1 sono schematicamente indicate queste quattro operazioni (esame visivo, raccolta dei dati «storici», prove *in situ* e prove di laboratorio) e le loro relative connessioni.

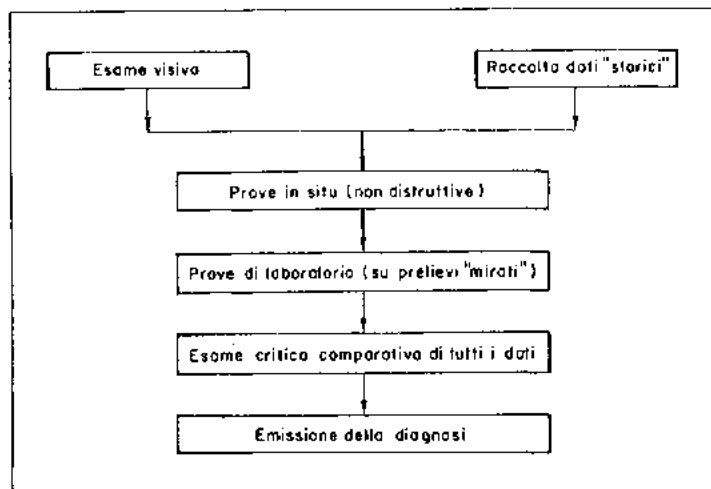


Fig. 1 - Schematizzazione del processo diagnostico.

2. ESAME VISIVO

L'esame visivo può fornire utili indicazioni circa la raccolta di alcuni elementi indispensabili alla preliminare individuazione del fenomeno almeno per come esso si manifesta apparentemente. Un'accurata documentazione fotografica dei difetti, localizzati in relazione ad un disegno dell'opera coinvolta dal degrado, può essere molto utile per la preparazione di un *dossier* finalizzato ad esprimere una della diagnosi. La Tabella 1 riassume schematicamente alcune di queste indicazioni che, attraverso il sopralluogo, è opportuno raccogliere e documentare sistematicamente per inquadrare la tipologia del degrado così come esso si manifesta: fessurazione, ferri scoperti, delaminazioni superficiali o distacchi profondi di calcestruzzo.

L'apparizione di fessure, per esempio, di forma irregolare e magari localizzate sulle pavimentazioni, ma non sulle strutture casserate (travi, pilastri, ecc.), può essere il sintomo di una fessurazione indotta dal ritiro plastico per assenza di stagionatura umida subito dopo la finitura del pavimento [1]. D'altra parte, la presenza di fessure dislocate quasi regolarmente - per esempio in corrispondenza di determinati ferri di armatura - lungo strutture casserate può segnalare indicativamente l'apparizione di fessure indotte successivamente per effetto del ritiro igrometrico a causa di un'eccessiva quantità di acqua nell'impasto del calcestruzzo.

Così, le fessure su una pavimentazione dislocate quasi sistematicamente tra due giunti di contrazione potrebbero far pensare più che al ritiro plastico ad un eccessivo ritiro igrometrico manifestatosi prima del taglio dei giunti eseguito tardivamente.

Analoghe considerazioni possono essere estese alla registrazione della situazione sullo stato dei ferri scoperti oppure situati al di sotto delle tipiche macchie di ruggine sulla superficie della struttura. Il numero, l'estensione e la dislocazione dei difetti in relazione alle condizioni geografiche e micro-climatiche, come anche la distribuzione dello spessore dei copriferri eventualmente divelti, sono tutti elementi utili per stabilire la sintomatologia del degrado.

Infine, i difetti del calcestruzzo in forma di delaminazioni estese e sottili o di danneggiamenti più profondi in corrispondenza di determinate aree (spigoli, pareti, zone di bagnasciuga, scarichi pluviali, ecc.) sono tutti elementi molto importanti da registrare unitamente allo stato di coesione del materiale danneggiato (duro, fragile, polverulento, molle, ecc.) e di eventuali depositi superficiali (efflorescenze, incrostazioni, ecc.).

3. RACCOLTA DEI DATI «STORICI»

La raccolta di tutti i dati sulla «storia» della costruzione - dal periodo della costruzione fino alla manifestazione dei segni di degrado - unitamente agli elementi raccolti attraverso il sopralluogo

(*) Enco, Engineering Concrete, Spresiano (TV).

ESEMPI DI ELEMENTI UTILI DA REGISTRARE DURANTE
II. SOPRALUOGO.

TABELLA 1

ESAME VISIVO	
Fessurazioni	
<ul style="list-style-type: none"> - Irregolari/Regolari - Frequenza (lunghezza cumulativa in mm/m²) - Geometria (ampiezza, lunghezza e profondità) - Estensione delle aree coinvolte - Posizione delle aree coinvolte in relazione all'ambiente (interno/esterno), ed alle condizioni micro-climatiche, geografiche e strutturali (intradosso, estradosso, ecc.) 	
Ferri di armatura	
<i>Ferri scoperti</i>	<i>Macchie di ruggine</i>
<ul style="list-style-type: none"> - Estensione delle aree coinvolte - Posizione delle aree coinvolte - Frequenza - Aspetto della corrosione (generalizzata/localizzata) - Riduzione del diametro dei ferri - Tipo di ruggine (compatta/porosa) - Spessore del copriferro 	<ul style="list-style-type: none"> - Estensione delle aree coinvolte - Posizione delle aree coinvolte - Frequenza - Forma delle macchie (circolare, oblunga, irregolare)
Delaminazioni superficiali del calcestruzzo	
<ul style="list-style-type: none"> - Estensione delle aree coinvolte - Posizione delle aree coinvolte - Frequenza - Spessore - Aspetto del calcestruzzo delaminato (duro/incoerente) - Presenza di efflorescenze, sub-florescenze, incrostazioni 	
Distacchi del calcestruzzo	
<ul style="list-style-type: none"> - Spessore - Localizzazione (spigoli, superfici, ecc.) - Estensione delle aree coinvolte - Posizione delle aree coinvolte - Aspetto del calcestruzzo danneggiato (duro/incoerente) - Frequenza 	

TABELLA 2

ESEMPI DI DATI «STORICI» UTILI PER LA EMISSIONE
DELLA DIAGNOSI.

RACCOLTA DEI DATI «STORICI»	
Periodo di costruzione	
<p>Precisare le date di inizio e fine della costruzione segnalando le particolari condizioni climatiche in corso d'opera.</p>	
Caratteristiche dei materiali impiegati	
<i>Calcestruzzo</i>	<i>Ferri di armatura</i>
<ul style="list-style-type: none"> - R_{ck} - Lavorabilità - Composizione (dosaggio di cemento, ecc.) - Tipo di cemento - Tipo di aggregato - Tipo di additivo - Altre eventuali caratteristiche - Trattamenti superficiali 	<ul style="list-style-type: none"> - Tipo - Dimensioni - Altre caratteristiche
Luogo	
<ul style="list-style-type: none"> - Posizione geografica - Condizioni climatiche 	
Data dei primi segni di degrado	
<ul style="list-style-type: none"> - Descrivere lo sviluppo temporale dei segni di degrado 	
Altre informazioni utili	
<ul style="list-style-type: none"> - Condizioni climatiche e trattamenti (per esempio sali disgelanti) in esercizio - Carichi statici e dinamici in esercizio - Ambiente circostante: terreni, acque, ecc. - Eventuali contestazioni in corso d'opera per i materiali e la esecuzione - Precedenti interventi di restauro 	

luogo dall'esame visivo può essere molto utile alla individuazione delle possibili cause di degrado, i cui riscontri potranno essere trovati attraverso poche ma ben mirate prove *in situ* o di laboratorio nel seguito discusse.

I dati «storici», come si può vedere nella Tabella 2, includono quelli relativi al periodo della costruzione, ai materiali impiegati, all'apparizione dei primi segni di degrado, alle condizioni climatiche e di esercizio, ecc.

È molto importante che i dati «storici» raccolti siano confermati da riscontri oggettivi attraverso le prove, perché molto spesso i dati raccolti a distanza di tempo sono inaffidabili, poco attendibili e quindi talvolta fuorvianti. Per esempio, il fatto che alcune fessure si siano manifestate dopo alcuni mesi dal getto di una pavimentazione, indica solo che le fessure sono state *notate* dopo alcuni mesi, ma non esclude che esse si siano innescate, in forma di cavillature poco visibili inizialmente, già

TABELLA 3

ESEMPI DI TIPICHE PROVE *IN SITU* PER LA DIAGNOSI DEL DEGRADO.

PROVE IN SITU	
Velocità delle onde soniche/ultrasoniche	per rilevare fessure, fratture, difetti ed eterogeneità interne non visibili.
Sclerometria	per rilevare la durezza superficiale del calcestruzzo.
Magnetometria	per rilevare la presenza dei ferri e lo spessore del copriferro.
Monitoraggio delle fessure	per registrare l'andamento nel tempo delle fessure.

dopo poche ore dal getto, come spesso si verifica quando si lavora in climi asciutti e ventilati senza alcuna protezione dall'evaporazione dell'acqua dalle superfici delle pavimentazioni.

Così, anche la manifestazione della corrosione dei ferri viene di solito registrata con l'apparizione delle macchie di ruggine che si formano in superficie dopo alcune piogge, e non già quando appaiono sul copriferro le prime microfessure difficilmente rilevabili a vista. D'altra parte, se le microfessure del copriferro appaiono, per esempio, sull'intradosso di una trave dopo pochi giorni o mesi di esercizio della struttura, è probabile che la microfessurazione abbia un'origine meccanica e che essa sia rapidamente seguita da fenomeni di corrosione dei ferri per la facilitata penetrazione degli agenti aggressivi (aria e umidità) attraverso il copriferro già fessurato. Se, invece, le fessure appaiono dopo qualche anno è più probabile che la fessurazione sia stata indotta da fenomeni di corrosione dei ferri (promossa dagli stessi agenti aggressivi attraverso un calcestruzzo poroso ma non fessurato). Nei due esempi ora menzionati, quindi, il tempo di apparizione delle fessure può in via ipotetica indicare se le fessure del copriferro siano la causa o l'effetto della corrosione dei ferri. È evidente, in questo caso, come un esame dello stato di carbonatazione o di penetrazione dei cloruri all'interno del copriferro (uniforme, oppure differenziato ed accentuato in corrispondenza delle fessure) potrà dare conferma o meno alle ipotesi sopra avanzate. Si può notare, in questo caso, come la raccolta dei dati «storici» e l'esame visivo del degrado, se non sono in grado da soli di portare ad una diagnosi ben definita ed attendibile, consentono tuttavia di limitare a pochi, ma ben mirati, prelievi da analizzare in laboratorio per la emissione di una diagnosi.

4. PROVE *IN SITU*

Le prove *in situ* (Tabella 3) sono quelle, a carattere non distruttivo, effettuate sulle strutture per una delle seguenti ragioni:

— rilevare la presenza di difetti interni non visibili esternamente (fessure, fratture, ecc.) su una estensione considerevole delle strutture senza ricorrere, in alternativa, ad un numero considerevole di carotaggi: ciò può essere eseguito misurando la velocità delle onde soniche o ultrasoniche che, come è noto, dipende dalla continuità o meno del materiale attraversato dalle onde;

— raccogliere informazioni preliminari di carattere comparativo circa la omogeneità del materiale sulla superficie: per esempio le prove sclerometriche eseguite su una pavimentazione o lungo un pilastro possono evidenziare aree localizzate di minor durezza superficiale (e quindi di minor resistenza meccanica) rispetto ad altre, così da individuare in modo preciso le zone della struttura da sottoporre ad eventuali prelievi per le successive prove di laboratorio;

— verificare il posizionamento dei ferri di armatura ed il relativo spessore di copriferro mediante misure magnetometriche;

— stabilire l'andamento temporale delle eventuali fessure attraverso un monitoraggio continuo al fine di accertare se il processo fessurativo è stabilizzato o ancora in atto.

L'esecuzione delle prove *in situ* nel loro insieme può essere meglio organizzata non solo dopo aver esaminato l'aspetto visivo del degrado, ma anche dopo aver valutato criticamente i dati «storici». Questa fase intermedia della diagnosi consente, inoltre, di predisporre un piano finale di prove sperimentali basate su pochi prelievi di campioni (calcestruzzo, ferri, ruggine) e su alcune determinazioni analitiche in laboratorio ben mirate all'obiettivo finale della diagnosi.

5. PROVE DI LABORATORIO

Prima di procedere al prelievo ed alle relative prove di laboratorio è opportuno valutare l'insieme dei dati emersi nelle fasi precedenti (esame visivo, raccolta dei dati «storici», e prove *in situ*) al fine di interpretarli tentativamente sulla base di tutte le possibili cause di degrado. In sostanza, è consigliabile disporre di più ipotesi, in alternativa tra loro, che possano giustificare il degrado registrato. In queste condizioni i prelievi e le relative prove di laboratorio dovranno essere finalizzati a sciogliere gli eventuali dubbi circa le ipotesi tra loro alternative ed a consolidare il meccanismo di degrado soprattutto in relazione alla sequenza ed alla complementarità delle varie cause.

A solo titolo di esempio, si può prendere in considerazione il caso di una soletta da ponte che presenta all'esame visivo in corrispondenza dell'intradosso:

- macchie di ruggine in corrispondenza di fessure;
- fessure spaziate con regolarità.

Si supponga che dalla raccolta dei dati «storici» sia emerso che:

- il calcestruzzo impiegato era di media qualità ($R_{ck} = 30$ MPa);
- l'opera è stata realizzata da 8 anni;
- le fessurazioni e le macchie di ruggine sono state osservate recentemente;
- i carichi dinamici ai quali la struttura è soggetta sono stimati di modesta entità o comunque sono compatibili con le sezioni e l'armatura della soletta;
- l'opera si trova in area con clima temperato e non sono mai state effettuate «salature» per sciogliere il ghiaccio.

Si supponga, inoltre, che dalle prove *in situ* (attraverso, per esempio, misure magnetometriche) risulti che:

- il copriferro si presenta con spessore uniforme di circa 25 mm.

L'esame critico di tutti questi dati può portare a due ipotesi (nel seguito indicate A e B) la prima delle quali è sicuramente più probabile.

L'ipotesi A si basa in sintesi sul seguente meccanismo:

- a) carbonatazione *uniforme* del copriferro;
- b) ossidazione (e rigonfiamento) dei ferri;
- c) fessurazione del copriferro di calcestruzzo in corrispondenza dei ferri;
- d) trasporto della ruggine in superficie (macchie).

L'ipotesi B, meno probabile ma che non può essere esclusa, si basa invece sul seguente meccanismo:

- a) fessurazione del copriferro all'intradosso per effetto dei carichi dinamici provocati dal passaggio dei mezzi di trasporto;
- b) ossidazione dei ferri in corrispondenza delle zone fessurate accompagnata da carbonatazione *localizzata*;
- c) trasporto della ruggine in superficie (macchie).

Per emettere la diagnosi definitiva (da cui evidentemente dipende il successivo intervento di restauro) è necessario mirare i prelievi e finalizzare le prove di laboratorio per stabilire quale delle due ipotesi A e B risulti la più attendibile. A questo scopo è sufficiente determinare il profilo della carbonatazione all'interno del calcestruzzo in corrispondenza dell'intradosso:

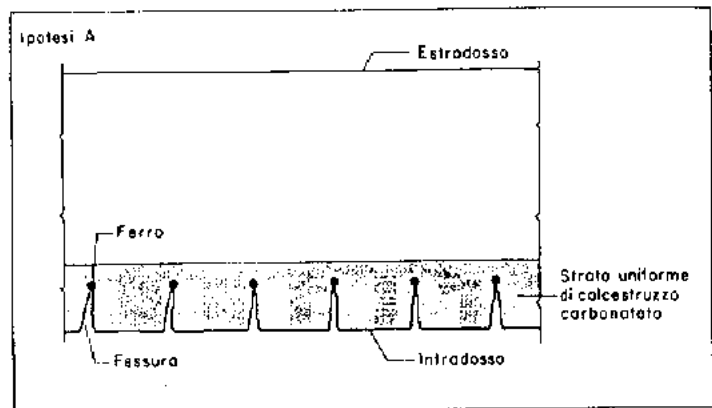


Fig. 2 - La carbonatazione ha provocato l'ossidazione dei ferri e quindi la fessurazione del copriferro.

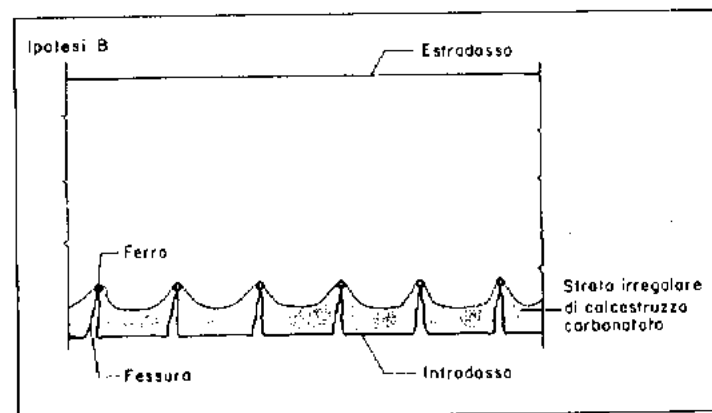


Fig. 3 - La fessurazione (per carichi dinamici) ha provocato l'ossidazione dei ferri ed una irregolare carbonatazione localizzata.

Ipotesi A: profondità di carbonatazione uniforme e maggiore dello spessore di copriferro (Fig. 2);

Ipotesi B: profondità di carbonatazione irregolare e maggiore dello spessore di copriferro solo in corrispondenza delle fessure (Fig. 3).

Val la pena di sottolineare che, nel caso sia l'ipotesi B la causa che ha promosso il degrado, il profilo della carbonatazione, pur irregolare e più profondo in corrispondenza delle fessure, potrebbe presentarsi ovunque maggiore dello spessore di copriferro a causa di un prelievo effettuato tardivamente rispetto all'innesco del degrado in atto (Fig. 4).

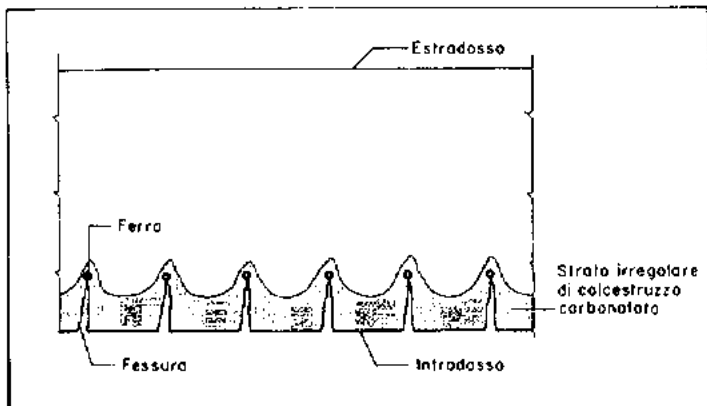


Fig. 4 - Come nel caso ipotizzato in Fig. 3 ma con rilevamento tardivo della profondità di carbonatazione rispetto all'innesco del degrado.

5.1. DIAGNOSI DELL'ATTACCO SOLFATICO

L'attacco dei solfati deve essere sospettato in presenza di acque e di terreni con tenore di solfato superiore rispettivamente a 500 e 3000 mg/Kg [2], di acque marine e 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 confermare se la degradazione è stata 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 come regolatore della presa (dal 3 al 4% come SO_3 rispetto al peso di cemento). Se si considera il contenuto di cemento in 1 m^3 di calcestruzzo (normalmente da 300 a 400 Kg) ed il peso specifi-

co (normalmente da 2350 a 2500 Kg/m^3), si può facilmente calcolare il contenuto di solfato che ci si può aspettare «fisiologicamente» nel calcestruzzo (mediamente da 0.4 a 0.6% rispetto al peso di calcestruzzo). Pertanto un contenuto di SO_3 nel calcestruzzo decisamente superiore allo 0.6% è sintomo che il degrado lamentato è da attribuirsi all'attacco solfatico. Nel caso in cui non si conosca con precisione 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 «fisiologico» (cioè presente prima dell'attacco solfatico), è quello di analizzare il solfato in una o più porzioni di calcestruzzo prelevate anche in una zona della struttura sicuramente non ancora degradata. Se il contenuto di solfato nella zona danneggiata risulta essere significativamente maggiore (per esempio più del 30%) rispetto al contenuto «fisiologico» 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, cioè «fisiologico».

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 di 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 conglomerato. Per quanto

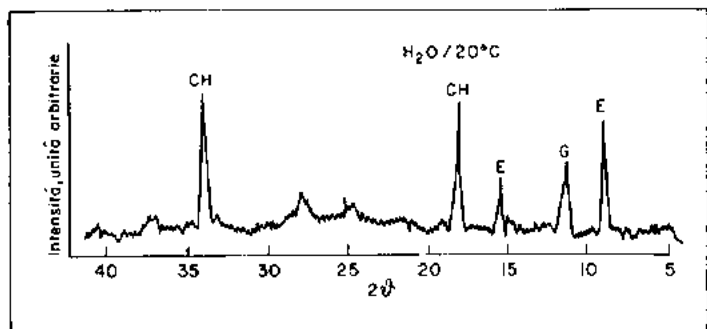


Fig. 5 - Diffattogramma ai raggi X di una pasta di cemento prelevata da calcestruzzo degradato da attacco solfatico: G indica il picco del gesso ed E quello dell'ettringite.

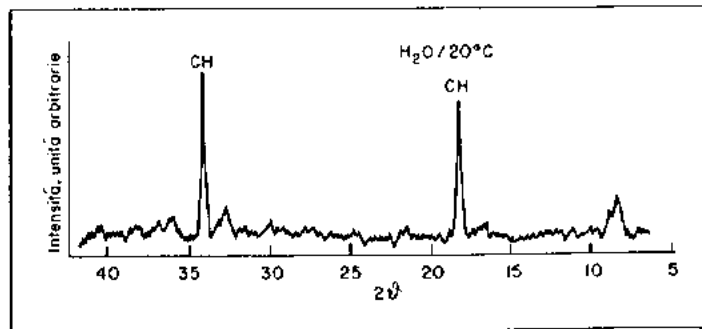


Fig. 6 - Diffattogramma di una pasta di cemento prelevata da calcestruzzo non degradato da attacco solfatico.

quest'aspetto del problema appaia estremamente banale, tuttavia la maggior parte delle diagnosi errate sulle cause di degrado 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.

La semplice analisi chimica del solfato in un calcestruzzo può soltanto indicare se e quanto il suo contenuto attuale è superiore rispetto a quello «fisiologico». Tuttavia, con la sola analisi chimica non si è in grado di stabilire a quale livello di degrado il calcestruzzo sia giunto per effetto della formazione dei prodotti di questo attacco. In sostanza, la penetrazione del solfato all'interno di un calcestruzzo si tramuta in un effettivo degrado allorché si siano formati quei prodotti (gesso, ettringite, thaumasite) responsabili dei disrompenti e localizzati fenomeni espansivi [3].

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), per la presenza del solfato di calcio come regolatore della presa del cemento, non sono più rilevabili con i raggi X in una pasta di cemento «matura». La Fig. 5 mostra un esempio di diffrattogramma in un campione di calcestruzzo (privato grossolanamente degli inerti grossi) degradato per effetto dell'attacco solfatico: nel diffrattogramma appaiono molto evidenti i picchi relativi al gesso, all'ettringite ed alla thaumasite non riscontrabili invece in una pasta di cemento non attaccata dal solfato (Fig. 6).

5.2. DIAGNOSI DELL'ATTACCO DA CLORURI

Anche il cloruro può essere evidenziato mediante una semplice analisi chimica quantitativa effettuabile, come quella del solfato, in un comune laboratorio di chimica. Va tenuto presente che una certa quantità di cloruro può essere presente nel calcestruzzo in quanto introdotto attraverso le materie prime (cemento, acqua, ecc.). In base alle norme ENV 206 e UNI 9858 questa quantità «fisiologica» non dovrebbe superare lo 0,4% e lo 0,2% rispetto al peso del cemento per le strutture in c.a. e c.a.p. rispettivamente. Pertanto, al fine di accertare se nello specifico calcestruzzo in esame il cloruro è penetrato o meno dall'ambiente, è consigliabile determinarne il contenuto in due porzioni di materiale prelevate in zone sicuramente penetrate e non penetrate dal cloruro ambientale.

Accanto all'analisi chimica, che consente di determinare il contenuto di cloruro nel calcestruzzo, è necessario effettuare altre due prove di grande interesse:

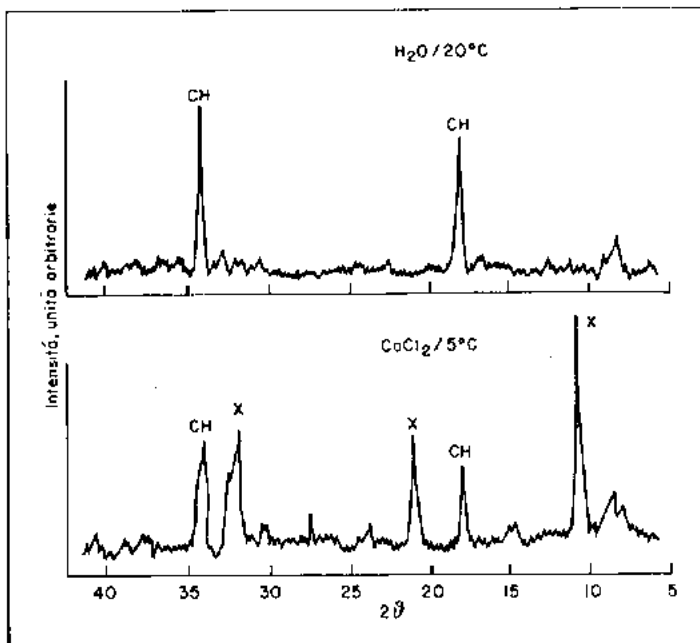


Fig. 7 - Diffrattogramma di una pasta di cemento integra (a) ed attaccata da CaCl_2 (b); CH indica i picchi della calce che diminuiscono in favore di quelli del $3\text{CaO} \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$ contrassegnato con X.

- prova colorimetrica alla fluoresceina;
- analisi per diffrazione dei raggi X.

La prova colorimetrica alla fluoresceina [4] consiste nello spruzzare su una carota di calcestruzzo una soluzione a base di fluoresceina ed una a base di nitrato d'argento: il calcestruzzo si colora in rosa chiaro nella zona penetrata dal cloruro (grazie ad un complesso chimico che si forma per reazione tra cloruro, argento e fluoresceina), ed in colore scuro nella zona non penetrata dal cloruro (grazie alla formazione di ossido di argento nero). La demarcazione tra la zona rosa e quella scura in varie carote consente di determinare il fronte di avanzamento del cloruro attraverso il copriferro e di stabilire quindi lo spessore di calcestruzzo che deve essere rimosso per impedire che la corrosione dei ferri possa proseguire, se in fase di restauro si ripristina lo spessore di copriferro originale mentre il cloruro è ormai penetrato al di là del copriferro.

L'analisi per diffrazione dei raggi X (Fig. 7) su un campione prelevato nello strato di calcestruzzo penetrato dal cloruro consente di evidenziare l'eventuale formazione di ossicloruro ($3\text{CaO} \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$) responsabile del severo degrado del calcestruzzo esposto al trattamento di sali disgelanti a base di

CaCl_2 [3]. Nel caso che venga accertato questo tipo di degrado, è necessario che il materiale da impiegare per il ripristino sia adeguatamente scelto in vista di un possibile nuovo degrado.

5.3. DIAGNOSI DELL'AGGRESSIONE DA ANIDRIDE CARBONICA

L'anidride carbonica (CO_2) può esercitare due tipi di attacchi: il primo rivolto verso il calcestruzzo, il secondo verso i ferri di armatura.

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 montagna). Il fenomeno che prende il nome di «dilavamento» consiste nella trasformazione del Ca(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, $\text{Ca(HCO}_3)_2$, 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).

Il secondo tipo di attacco si esplica, invece, attraverso una penetrazione della CO_2 presente nell'aria attraverso lo strato superficiale di calcestruzzo. Esso appare più evidente nelle aree dove maggiore è la concentrazione di CO_2 proveniente dai gas di scarico delle autovetture e degli impianti di riscaldamento domestico. Il fenomeno che prende il nome di «carbonatazione» consiste nella neutralizzazione del Ca(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 del calcestruzzo, come è invece il dilavamento, ma 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 (Fig. 8). Purtroppo l'analisi chimica, come anche quella per diffrazione dei raggi X o come altre tecniche, quali l'analisi termica differenziale o termogravimetrica, 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 (quelli di natura calcarea), cosicché risulta molto difficile, se non impossibile, differenziare una porzione di materiale attaccato dall'anidride

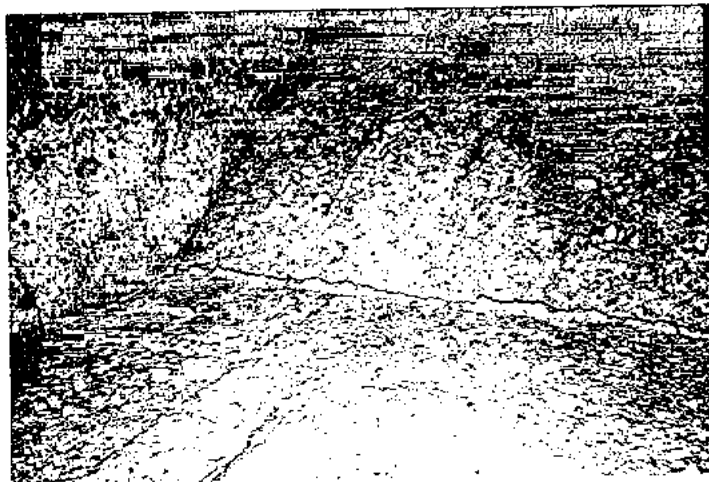


Fig. 8 - Calcestruzzo dilavato da acque correnti contenenti anidride carbonica aggressiva.



Fig. 9 - Calcestruzzo diversamente colorato dalla fenolftaleina per effetto della parziale carbonatazione. La zona più chiara corrisponde al calcestruzzo penetrato dall'anidride carbonica.

carbonica aggressiva rispetto ad una porzione di calcestruzzo prelevato in una zona più interna della struttura e quindi non ancora aggredito.

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 fenolfaleina si colora in rosso se viene messa a contatto con calcestruzzo molto alcalino ($\text{pH} > 10.2$) per la presenza di $\text{Ca}(\text{OH})_2$, ed appare incolore se viene a contatto con un calcestruzzo che per effetto della «carbonatazione» non presenta tracce di $\text{Ca}(\text{OH})_2$ essendo questo completamente trasformato in CaCO_3 ($\text{pH} < 8.6$). La Fig. 9 mostra il diverso colore che assume un provino di calcestruzzo immerso in una soluzione acquosa di fenolfaleina: 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 esposti al processo di corrosione ancorché non ancora evidente. La corrosione, in realtà, verrà innescata con l'apporto di aria umida (ossigeno + acqua) necessaria ad alimentare la trasformazione di ferro metallico in ruggine [3].

5.4. 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. La soglia critica del contenuto di alcali (espressi come Na_2O) nel cemento Portland è generalmente fissata allo 0.6%. Tuttavia, la tendenza più recente è quella di valutare il contenuto di alcali solubili globalmente presente in un volume di calcestruzzo, giacché cementi ricchi in alcali ma presenti in quantità modesta nel calcestruzzo non apportano un contenuto globale in alcali solubili maggiore rispetto a cementi più poveri in alcali ma presenti in maggior dosaggio. Il valore critico del contenuto in alcali reattivi 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 per valuta-

re preventivamente il fenomeno attraverso una determinazione quantitativa degli alcali del cemento, ed attraverso una valutazione chimica [6] o fisica degli inerti che verranno impiegati nel confezionamento del calcestruzzo [7].

A seconda delle varie circostanze, le fessurazioni causate dalla reazione alcali-aggregato si presentano in forme differenti. 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 ragnatela (Fig. 10). La presenza ed il particolare posizionamento dei ferri di armatura, come anche le particolari forme geometriche della struttura, possono interferire sul fenomeno favorendo l'apparizione delle fessure secondo forme meno casuali e disordinate. In ogni caso il fenomeno fessurativo (a differenza di quello provocato dal ritiro plastico o da essiccamento) è 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 nell'espulsione di un'aureola di calcestruzzo attorno al granulo reattivo.

La Fig. 11 illustra un campione di pavimento in calcestruzzo nel quale è in atto un fenomeno di *pop-out*. Estrahendo il frammento di *pop-out* si possono evidenziare i granuli dell'aggregato reattivo fonte del fenomeno degradante (Fig. 12). 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 dalla accidentale presenza di gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) o anidrite (CaSO_4) nell'aggregato. La presenza di una banda diffusa intorno ai 22° nel diffrattogramma ai raggi X confermerà la presenza in atto della reazione alcali-aggregato dovuta a silice amorfa. Infine, un'analisi chimica del contenuto in alcali della pasta cementizia, confezionata con cemento Portland, intorno all'inerte potrà fornire altre utili conferme circa l'effettiva causa del degrado.

Più di recente sono stati proposti altri metodi per accertare se il degrado di un calcestruzzo sia o meno da attribuire ad una reazione alcali-aggregato ancora in atto. Un primo metodo [8] si basa sull'immersione in soluzione acquosa del 10% di NaCl a 40°C di carote estratte da strutture in calcestruzzo sospettate di essere danneggiate dalla reazione alcali-aggregato. Dopo alcuni mesi, in corrispondenza dei granuli reattivi che si affacciano sulla superficie della carota, si formano dei distacchi tra aggregato e pasta di cemento per effetto della reazione tra il sodio della soluzione acquosa e gli aggregati

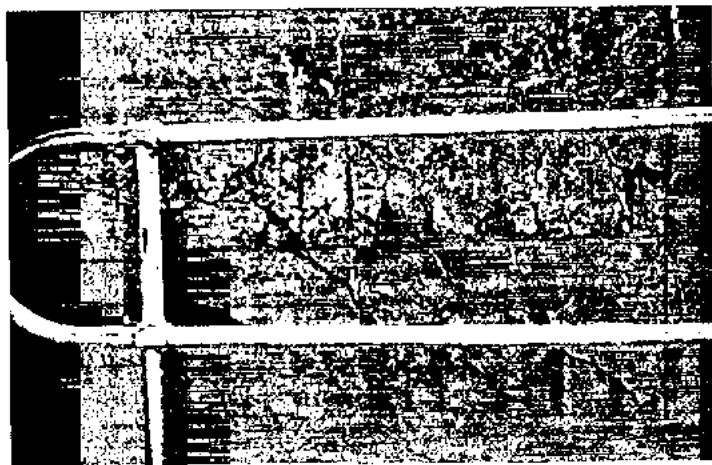


Fig. 10 - Calcestruzzo degradato per effetto della reazione alcali-aggregato [10].

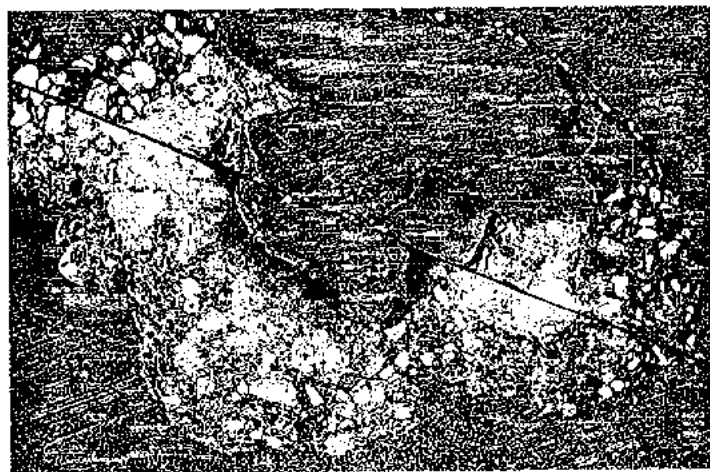


Fig. 11 - Pavimentazione degradata per effetto del pop-out causato da un granulo di aggregato reattivo.



Fig. 12 - Pop-out del pavimento della Figura 11 con i granuli dell'aggregato reattivo parzialmente attaccati allo spolvero della pavimentazione.

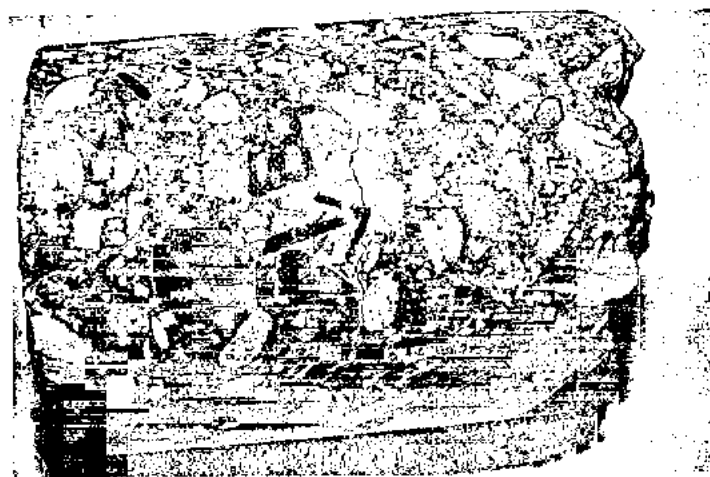


Fig. 13 - Carota di calcestruzzo con aggregati reattivi dopo immersione in soluzione acquosa al 10% di NaCl a 40°C.

reattivi (Fig. 13). L'altro metodo [9] si basa sulla misura dell'espansione di una carota di calcestruzzo immersa in una soluzione satura di NaCl a 50°C. Anche questo metodo, come il precedente, è in realtà capace di evidenziare se l'eventuale reazione alcali-aggregato è ancora in atto. In altre parole, se la reazione alcali-aggregato ha danneggiato una struttura in calcestruzzo ed il fenomeno si è ormai esaurito, questi due

metodi non consentono di evidenziare la natura del fenomeno; tuttavia essi si presentano molto utili, una volta accertata la reazione alcali-aggregato, in quanto indicano il momento più opportuno per procedere all'intervento di restauro che non deve mai essere iniziato prima che il fenomeno dirompente della reazione alcali-aggregato si sia completamente esaurito.

L'alternarsi della temperatura ambientale intorno allo 0°C, la presenza di umidità all'interno del calcestruzzo ed infine l'as-

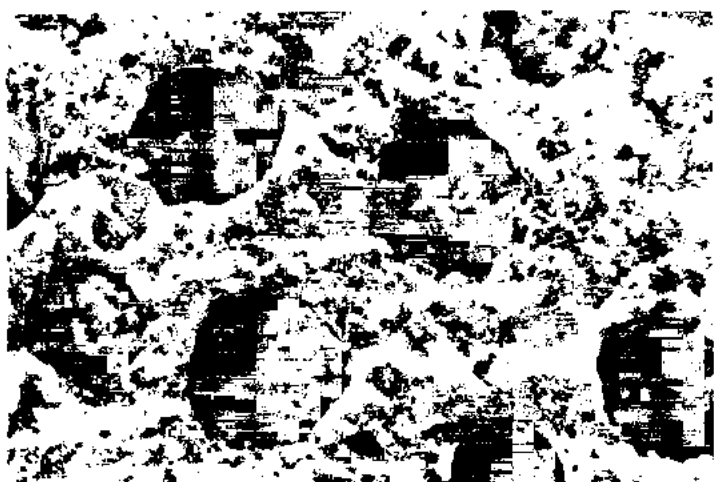


Fig. 14 - Sezione di una pasta di cemento con microbolle d'aria prelevata da un calcestruzzo.

senza 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 [1]. Il fenomeno si presenta sotto forma di delaminazioni 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 l'esistenza delle altre due condizioni (temperatura ed umidità) nella raccolta dei dati «storici», la diagnosi deve essere supportata da un'osservazione al microscopio ottico della matrice cementizia: l'assenza di microbolle d'aria confermerà la diagnosi del degrado da gelo-disgelo. Tuttavia la sola presenza di microbolle d'aria non può necessariamente escludere che il degrado sia stato provocato dai cicli di gelo-disgelo, in quanto occorre verificare anche che la dimensione delle microbolle e la loro reciproca distanza (*spacing*) siano entrambe al di sotto di una certa soglia (200 µm), come è mostrato nella Fig. 14. Infine, anche con una pasta di cemento adeguatamente aerata, il calcestruzzo può presentare fenomeni di degrado legati ai cicli di gelo-disgelo nel caso gli aggregati siano gelivi: in questo caso, un'indagine con il microscopio degli aggregati prelevati in prossimità delle zone fessurate o delaminate dovrà confermare la struttura porosa degli elementi lapidei, responsabile dell'assorbimento di acqua e della conseguente formazione di ghiaccio.

BIBLIOGRAFIA

- [1] COPPOLA L.: "Durabilità del calcestruzzo: teoria, pratica e prescrizioni di capitolato. Parte II: Cause di degrado di tipo fisico e meccanico", *L'Industria Italiana del Cemento*, 675, 199-209, Marzo (1993).
- [2] Norma UNI 9858. Calcestruzzo. Prestazioni, produzione, posa in opera e criteri di conformità, (1991).
- [3] COLLEPARDI M.: "Durabilità del calcestruzzo: teoria, pratica e prescrizioni di capitolato". Parte I: Cause di degrado di tipo chimico, *L'Industria Italiana del Cemento*, 671, 707-726, Novembre (1992).
- [4] UNI 7928 - Determinazione della penetrabilità dello ione cloruro.
- [5] COLLEPARDI M.: "Scienza e Tecnologia del calcestruzzo", pag. 281, Ed. Hoepli, Milano (1991).
- [6] UNI 8520 parte 22^a - Determinazione della potenziale reattività degli aggregati in presenza di alcali.
- [7] ASTM C 227 - 81 - Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Cement - Aggregate Combinations (Mortar-Bar Method).
- [8] COLLEPARDI M., L. COPPOLA, G. MORICONI, M. PAURI: "Diagnosi della reazione alcali-aggregati in calcestruzzi degradati", *L'Industria Italiana del Cemento*, 646, 659 (1991).
- [9] STRUNGE H., S. CHATTERJI, A.D. JENSEN: "Valutazione della capacità di espansione residua delle strutture in calcestruzzo dovuta alla reazione alcali-aggregato", *Il Cemento*, 158, 3 (1991).
- [10] POITEVIN P., M. REGOURD: *Ann. Ist. Tech. Bat. Trav. Publ.*, 413, 112 (1983).