

2013

Quadrimestrale

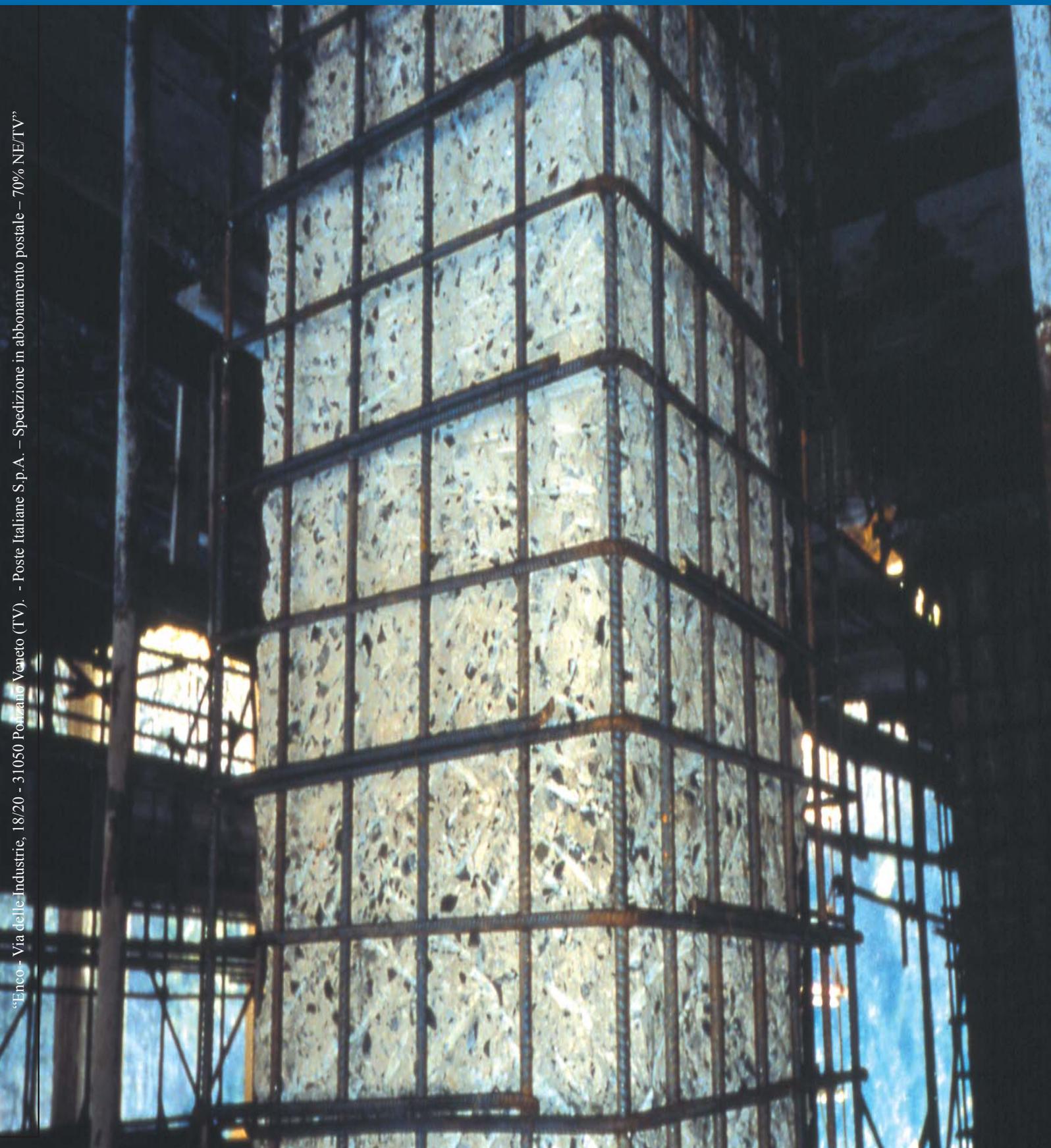
Anno XVIII

Numero 58

ENCO

JOURNAL

PERIODICO SULLA TECNOLOGIA DEI MATERIALI DA COSTRUZIONE



Per calcestruzzi
dinamici

CHRYSO® Fluid Premia 340

longrine +33 (0)4 90 14 48 48 - (20260-11/11)

Le prestazioni del CHRYSO® Fluid Premia 340 si estendono su 360° per soddisfare l'insieme delle vostre esigenze nell'ambito della prefabbricazione.

Vi sarà già nota la qualità della gamma CHRYSO® Fluid Premia, rivolta alla produzione di calcestruzzi armati e precompressi. Scoprite ora CHRYSO® Fluid Premia 340: il giusto compromesso tra prestazioni finora inedite, flessibilità di utilizzo ed elevate resistenze meccaniche.

Usufruirete dei seguenti benefici:

- calcestruzzo regolare e omogeneo;
- getto facilitato nelle casseforme;
- livello di Rc raggiungibile alle brevi stagionature, accomunato alle più stringenti esigenze di sicurezza.

CHRYSO: abbiamo le soluzioni per costruire il futuro che immaginate.

CHRYSO Italia Sr.l. - Via Madonna - 24040 Lallio-Bergamo - ITALIA - Tel. +39 035 693 331 - Fax +39 035 693 684

CHRYSO

LA CHIMICA AL SERVIZIO DEI
MATERIALI DA COSTRUZIONE

www.chryso.com

PERIODICO SULLA TECNOLOGIA DEI MATERIALI DA COSTRUZIONE

Quadrimestrale - Anno XVIII - Numero 58

Direttore Mario Collepari

QUALI LAVORI IN PERIODO DI CRISI

Questo numero è interamente dedicato ad attività nel settore delle costruzioni che possano essere privilegiate in mancanza di grandi finanziamenti per grandi opere. Esso comprende 4 articoli il primo dei quali è dedicato ad un sintetico esame delle numerose cause che possono provocare il **degrado** delle opere in CA e CAP suddivise per:

- il meccanismo di degrado (chimico, fisico, meccanico, biologico);
 - il componente del calcestruzzo armato (acciaio, aggregato, pasta cementizia) che è coinvolto nel degrado.
- Da un punto di vista della gravità e della frequenza del fenomeno la corrosione dell'acciaio appare decisamente il più importante. Tuttavia le nuove Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC) dovrebbero augurabilmente in futuro ridurre il fenomeno del degrado della corrosione dei ferri di armatura se si rispetteranno i vincoli composizionali e prestazionali in accordo alla norma UNI EN 11104 che prevede:
- per le opere esposte all'aria (XC4) e quindi a corrosione da carbonatazione: rapporto $a/c \leq 0,50$; $R_{ck} \geq 40$ MPa; $c_{priferi} (cf) \geq 30$ mm per CA e ≥ 40 mm per CAP;
 - per le opere esposte al contatto dell'acqua di mare (XS3) e quindi a corrosione da cloruro: rapporto $a/c \leq 0,45$; $R_{ck} \geq 45$ MPa; $c_f \geq 45$ mm per CA e ≥ 55 mm per CAP;
 - per le opere esposte al contatto dei sali disgelanti (XF4): rapporto $a/c \leq 0,45$; $R_{ck} \geq 35$ MPa; aria inglobata $\geq 3\%$; $c_f \geq 45$ mm per CA e ≥ 54 mm per CAP.

L'attività di **diagnosi**, in questo momento di crisi grave, è particolarmente presente in quanto con essa ci si prepara alla fase di recupero delle costruzioni danneggiate non appena la recessione sarà trascorsa: Ha da passata a nuttata, avrebbe detto il grande Eduardo. Essa è incentrata su quattro stadi:

- raccolta dei dati storici sulla costruzione danneggiata (quando e come fu costruita, quali materiali furono impiegati, ecc.);
- esame visivo del degrado (rilevamento della tipologia e frequenza dei danni in forma di fessure, delaminazioni, espulsioni di copriferro, ecc.);
- impostazione delle prove in situ e in laboratorio sulla base dei dati raccolti nei due precedenti stadi;
- esame dei risultati ottenuti nelle prove congiuntamente con la raccolta dei dati storici e dell'esame visivo per emettere la diagnosi del degrado.

Accertate le cause del degrado si può passare alla progettazione del **restauro** prevedendo tre aspetti operativi:

- rimozione del calcestruzzo danneggiato;
- pulizia dei ferri di armatura corrosi;
- applicazione dei materiali da restauro.

Tenendo conto delle diverse tipologie di intervento e dei differenti materiali disponibili (iniezione di microcemento o di resina liquida, proiezione di malta cementizia tixotropica, collaggio di malta cementizia fluida, rivestimento con materiali polimerici, fasciatura con tessuto in fibre di carbonio mediante resina epossidica) occorre completare il processo con adeguata stagionatura umida dei materiali cementizi e preferibilmente con protezione pellicolare per uniformare esteticamente il colore della costruzione restaurata.

Tutte le indicazioni politiche suggeriscono che i finanziamenti pubblici per gli interventi di restauro saranno privilegiati rispetto a quelli destinati alle nuove costruzioni. Tuttavia, non si può trascurare l'importanza delle nuove tecnologie che fanno del calcestruzzo un materiale tutt'altro che "maturo" e ancora tutto da migliorare anche per un piccolo cantiere come dimostra il quarto articolo di questo numero di Enrico Genova, Salvatore Lo Presti e Angelo Mulone.

P.S. Tutti i nostri lettori della copia cartacea di Enco Journal sono stati informati che il progresso informatico si dirige ormai inesorabilmente verso la copia elettronica. Tuttavia, per quei lettori (ed io fra loro) che preferiscono ancora leggere una copia cartacea potranno molto semplicemente stampare l'articolo di loro interesse: buona lettura.

In copertina: pulizia dei ferri di armatura prima del getto della malta da restauro

Mario Collepari
ACI Honorary Member



SOMMARIO

**DEGRADO DELLE STRUTTURE
IN CALCESTRUZZO**

di M. Collepari

(pag. 5)

**DIAGNOSI DEL DEGRADO
DELLE STRUTTURE
IN CALCESTRUZZO**

di S. Collepari

(pag. 6)

**RESTAURO DELLE
STRUTTURE IN
CALCESTRUZZO
DEGRADATO**

di R. Troli e F. Simonelli

(pag. 10)

ENCO QUIZ

(pag. 24)

**LA QUALITA' FIORISCE
ANCHE NEL PICCOLO
CANTIERE EDILE**

di E. Genova, S. Lo Presti,
A. Mulone

(pag. 25)

ENCO Journal
PERIODICO SULLA TECNOLOGIA
DEI MATERIALI DA COSTRUZIONE
Ponzano Vito (TV) - Via delle Industrie, 18/20
Tel. 0422.963771 - Fax 0422.963237
info@encosrl.it

**Direttore
Responsabile**

MARIO COLLEPARDI

Redazione

ROBERTO TROLI
SILVIA COLLEPARDI
ANTONIO BORSOI
J. JACOB OGOUMAH OLAGOT
FRANCESCA SIMONELLI

EDITORE

ENCO SRL

Ponzano Vito (TV) - Via delle Industrie, 18/20
Tel. 0422.963771 - Fax 0422.963237
info@encosrl.it

COMPOSIZIONE

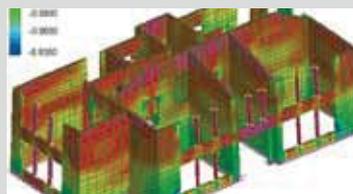
ISABELLA CAPOGNA
ALESSANDRA GALLETTI
MARA MENEGHEL

Grafica e Stampa

GRAFICHE TINTORETTO
di Rino Lucatello & C. S.R.L.
31050 Castrette di Villorba (TV)
Via Verdi 45/46

COSA PUÒ FARE ENCO PER VOI

**Diagnosticare
il degrado e il dissesto
delle costruzioni**



**Riparare le costruzioni
danneggiate**

**Mettere a punto il
calcestruzzo per le
nuove costruzioni**



**Assistenza nelle
contestazioni legali**



**Corsi di
formazione e di
specializzazione
on line**



DEGRADO DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO



Mario Collepari

*Enco, Ponzano Veneto (TV) - info@encosrl.it

Come è mostrato schematicamente nella Tabella 1 le cause di degrado dovute all'ambiente possono essere formalmente suddivise in chimiche, fisiche, meccaniche e biologiche. In questa Tabella non è previsto l'aggressione da parte di sostanze naturali come il vino, l'aceto, l'olio combustibile, ecc. che debbono essere valutati caso per caso.

In realtà, difficilmente in un processo di degrado esiste un solo fenomeno aggressivo; spesso sono più cause che concorrono al deterioramento del materiale esaltandosi vicendevolmente. Per questo motivo è necessario tener conto di un **approccio olistico** per esaminare il **degrado delle strutture in C.A.**

Tabella 1 - Cause più frequenti di degrado delle strutture in calcestruzzo

Cause di degrado di tipo:			
CHIMICO*	FISICO	MECCANICO	BIOLOGICO
Sali di NH ₄ ⁺ ed Mg ²⁺	Variazioni termiche	Urto	
Solfati (SO ₄ ⁻) e solfuri (S ⁻)	Gelo-disgelo	Erosione	
Anidride carbonica (CO ₂)	Ritiro da essiccamento	Abrasione	Muschi
Cloruri (Cl ⁻)	Incendio	Cavitazioni	Alghe
Alcali (Na ⁺ e K ⁺)	Calore di idratazione	Vibrazioni	Funghi

* Sono escluse le sostanze di provenienza naturale (acidi, oli, solventi, ecc.) che richiedono una specifica valutazione

Come è mostrato nella Figura 1, le cause di degrado possono anche essere suddivise per componente del calcestruzzo: **armature metalliche, inerte e pasta cementizia.**

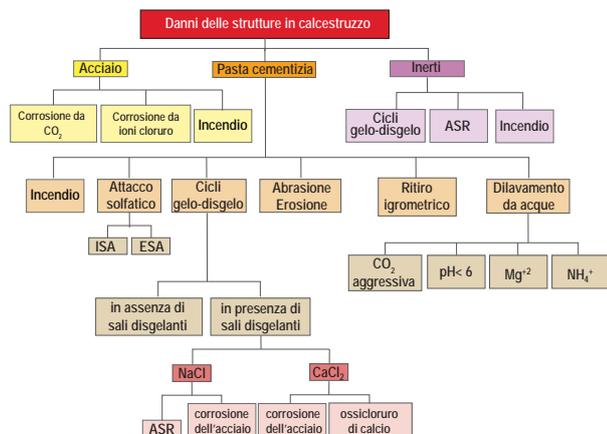


Fig. 1 - Degrado del calcestruzzo nei suoi vari componenti

Degrado delle armature metalliche

Il degrado dei ferri di armatura può essere dovuto a due fe-

nomeni: corrosione promossa dalla **carbonatazione** o corrosione promossa dal **cloruro**.

Degrado degli inerti

Il deterioramento del calcestruzzo dovuto all'**inerte** è sostanzialmente dovuto ai **cicli di gelo-disgelo**, alla **silice alcali-reattiva** e al **carbonato alcali-reattivo**, identificati con CAR.

Degrado della pasta cementizia

Tra le cause più frequenti di degrado della pasta cementizia ci sono le **aggressioni chimiche** che includono: **attacco solfatico**, **attacco dei solfuri**, **attacco dei sali ammoniacali**, **attacco dei sali di magnesio**, **attacco dell'anidride carbonica**, **attacco dei cloruri**, **attacco del sodio**, **attacco del potassio** e **attacco degli alcali**.

Occorre innanzitutto distinguere le cause riguardanti gli agenti aggressivi naturali, quali, per esempio, l'**acqua di mare**, e quelle concernenti gli agenti chimici "artificiali" prodotti dall'uomo, quali gli acidi inorganici, le sostanze organiche, ecc., derivanti quasi sempre dagli scarichi industriali. In linea di massima, è sempre possibile confezionare un calcestruzzo durevole capace di resistere all'azione aggressiva degli agenti definiti "naturali". Più difficile è, invece, garantire la **durabilità** di un calcestruzzo a contatto con agenti aggressivi "artificiali", a meno che non si ricorra ad un rivestimento protettivo per esempio a base di **resina epossidica**.

In aggiunta alle **aggressioni chimiche**, esistono anche cause di degrado imputabili a fenomeni fisici e meccanici. Per quanto concerne le cause definite fisiche, connesse cioè a fenomeni come la variazione di temperatura e l'evaporazione dell'acqua, mentre è possibile confezionare calcestruzzi di durata praticamente illimitata in ambienti con alternanze termiche intorno a 0°C resistenti ai **cicli di gelo-disgelo** mediante l'impiego di **additivo aerante** capace di produrre **aria inglobata**, diventa pressoché impossibile eliminare le conseguenze del ritiro igrometrico consistenti in **fessurazioni** derivanti dall'evaporazione dell'acqua del calcestruzzo in climi asciutti o a seguito di trattamenti ad alte temperature. In questi casi, impiegando un normale calcestruzzo, si possono ridurre gli inconvenienti entro limiti accettabili in relazione alla funzionalità della struttura. Una completa eliminazione delle fessure dovute al ritiro igrometrico può essere realizzata solo ricorrendo a calcestruzzi speciali come il **calcestruzzo a ritiro compensato** o a particolari tecniche operative consistenti nella "sigillatura" del materiale con pellicole impermeabili e flessibili per evitare l'asciugamento della struttura in calcestruzzo.

Anche per le cause di degrado definite meccaniche non sempre è possibile confezionare un calcestruzzo che di per sé sia in grado di resistere all'azione degradante degli **urti**, dell'**abrasione**, dell'**erosione** e della **cavitazione**. Occorrerà, in questi casi, migliorare al massimo la qualità superficiale del calcestruzzo, ricorrendo, se necessario, a rivestimenti protettivi capaci di rinforzare ulteriormente la resistenza in superficie del materiale.

Ancorché non provochino effettivi degradi della struttura, la formazione di **muschi**, **alghe** e **licheni** genera danni estetici deturpando la superficie.

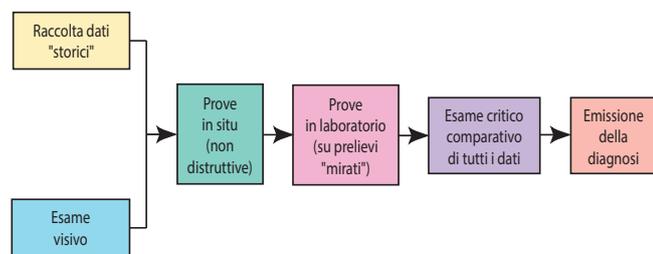
DIAGNOSI DEL DEGRADO DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO



Silvia Collepari

Enco, Ponzano Veneto (TV)- info@encosrl.it

La diagnosi del deterioramento di un edificio o di una struttura in calcestruzzo si basa sull'esame visivo del degrado e sulla raccolta di dati storici che – unitamente ai risultati di prove eseguite in sito o in laboratorio su frammenti di materiale prelevati dalla struttura – consentono di stabilire le cause del degrado della struttura in genere, e del deterioramento dei materiali in particolare (M. Collepari, S. Collepari, J.J. Ogoumah Olagot, F. Simonelli e R.Troli, "Diagnosi del degrado e restauro delle strutture in C.A.", Seconda Edizione Tintoretto, Villorba, TV, 2010). Nella Figura che segue è illustrato schematicamente il processo per arrivare alla emissione di una diagnosi del degrado:



Schema del processo per emettere una diagnosi di degrado di una struttura in calcestruzzo

Si può dividere il processo di diagnosi in tre stadi:

- esame visivo del degrado;
- raccolta dei dati storici;
- prove in situ ed in laboratorio.

Esame visivo del degrado

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 all'emissione della diagnosi. La Tabella che segue 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: **fessurazioni**, **corrosione dei ferri di armatura** scoperti, **delaminazioni superficiali** o distacchi profondi di calcestruzzo.

Per esempio, l'apparizione di fessure di forma irregolare e magari localizzate sulle pavimentazioni, ma non sulle strutture cassate (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. D'altra parte, la presenza di fessure dislocate quasi regolarmente — per

esempio in corrispondenza di determinati ferri di armatura— lungo strutture cassate può segnalare indicativamente l'apparizione di fessure indotte successivamente per effetto del **ritiro igrometrico** a causa di un'eccessiva quantità di **acqua di impasto** e/o **dosaggio di cemento** nel calcestruzzo. 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 di contrazione eseguito tardivamente.

Esempi di utili elementi da registrare durante il sopralluogo (esame visivo)

TIPO DI DEGRADO	OSSERVAZIONI
Fessurazioni	Irregolari/regolari
	Frequenza (lunghezza cumulativa in mm/m ²)
	Geometria (spessore e lunghezza)
	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	Macchie di ruggine
	Ferri scoperti
	Estensione delle aree coinvolte
	Frequenza
	Aspetto della corrosione (generalizzata/localizzata)
	Riduzione del diametro dei ferri
	Tipo di ruggine (compatta/porosa)
	Spessore del copriferro
Delaminazioni superficiali del calcestruzzo	Estensione delle aree coinvolte
	Frequenza
	Spessore
	Aspetto del delaminato (duro/incoerente)
	Presenza di efflorescenze, sub-efflorescenze, incrostazioni
	Posizione delle aree coinvolte
Distacchi del calcestruzzo	Spessore
	Localizzazione (spigoli, superfici, ecc.)
	Estensione delle aree coinvolte
	Aspetto del calcestruzzo danneggiato (duro/incoerente)
	Estensione
	Frequenza
	Posizione delle aree coinvolte

Analoghe considerazioni possono essere estese alla registrazione della situazione sullo stato dei ferri scoperti oppure alle 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 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 per esempio in spigoli, pareti, zone di bagnasciuga, scarichi pluviali, ecc. presenti nell'*intradosso* o nell'*estradosso* 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.).

Raccolta dei dati storici

La raccolta di tutti i dati sulla "storia" della struttura — dal periodo della costruzione fino alla manifestazione dei segni di degrado — unitamente agli elementi raccolti attraverso il sopralluogo dall'esame visivo, può essere molto utile all'individuazione delle possibili cause di degrado, i cui riscontri potranno essere trovati attraverso poche ma ben mirate prove in situ sulla struttura o di laboratorio nel seguito discusse.

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

E' 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 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 da ponte dopo pochi giorni o mesi di esercizio, 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. E' 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 l'emissione di una diagnosi.

Esempi di elementi da registrare durante il sopralluogo (raccolta di dati storici)

TIPO DI DATI STORICI	INFORMAZIONE RICHIESTA	
Periodo di costruzione	Precisare le date di inizio e fine della costruzione segnalando le particolari condizioni climatiche in corso d'opera	
Caratteristiche dei materiali impiegati	Calcestruzzo	Ferri di armatura
	R_{ck}	Tipo di acciaio
	Lavorabilità	Dimensioni
	Composizione (dosaggio di cemento, ecc.)	Altre caratteristiche
	Tipo di cemento	Posizione delle aree coinvolte
	Tipo di aggregato	
	Trattamenti superficiali	
Luogo	Altre eventuali caratteristiche	
	Posizione geografica	
Data dei primi segni di degrado	Condizioni climatiche	
	Descrivere lo sviluppo temporale dei segni di degrado	
Altre informazioni utili	Condizioni climatiche e trattamenti in esercizio (per esempio sali disgelanti)	
	Carichi statici e dinamici in esercizio	
	Ambiente circostante: terreni, acque, ecc.	
	Eventuali contestazioni in corso d'opera per i materiali e l'esecuzione	
	Precedenti interventi di restauro	

Prove in situ ed in laboratorio

La raccolta di risultati sperimentali determinati in situ o in laboratorio si basa sull'esecuzione di prove che possono essere suddivise in *prove distruttive* o *semi-distruttive* e *prove non-distruttive*.

La distinzione tra prove distruttive e prove non-distruttive consiste fondamentalmente nel fatto che le prime si basano su prove sperimentali, generalmente eseguite in laboratorio, effettuate su provini o campioni prelevati dalla struttura: ne consegue che esse prevedono in genere lo scrostamento di frammenti di intonaco, il sollevamento sia pure parziale di un rivestimento del pavimento, il carotaggio di una muratura, ecc., tutte operazioni che possono arrecare una compromissio-

ne, sia pure modesta o trascurabile, a costruzioni quantomeno sospettate di essere coinvolte da un processo di deterioramento. Le prove semi-distruttive provocano un danno più limitato, rispetto alle prove distruttive, e confinato solo allo spessore corticale della struttura.

Le prove non-distruttive, invece, presentano il vantaggio di fornire elementi utili alla interpretazione del potenziale deterioramento in atto, senza minimamente danneggiare lo stato dell'edificio o della struttura dal punto di vista estetico o strutturale. Le prove non-distruttive consistono in misure di carattere prevalentemente fisico o fisico-meccanico, come per esempio la determinazione della durezza superficiale —*sclerometria*— o della velocità delle *onde ultrasoniche* da eseguire in sito sulla struttura; le prove distruttive, invece, sono prevalentemente di carattere chimico o chimico-fisico da effettuare in laboratorio. Inoltre, le prove non-distruttive in sito forniscono dei dati soprattutto sul dissesto delle strutture (per esempio: cedimenti di fondazioni, sovraccarichi, ecc.) che non necessariamente coinvolgono il degrado dei materiali. Le prove distruttive effettuate in laboratorio, invece, sono prevalentemente finalizzate alla valutazione del degrado dei materiali (per esempio: distacco parziale di intonaco, rigonfiamento di una muratura, corrosione di un metallo, ecc.) che non necessariamente significano un dissesto strutturale dell'edificio.

In generale, è molto difficile che con le sole prove non-distruttive si possa arrivare ad una diagnosi corretta del degrado di una struttura. Molto spesso, esse devono essere comparate con quelle distruttive. L'accoppiamento di prove distruttive e non-distruttive, oltre al carattere di complementarità e di completezza dell'informazione desunta, presenta anche il vantaggio di ridurre globalmente il numero totale delle prove da eseguire e quindi il costo generale della diagnosi: infatti, in linea di massima, il costo della singola prova di laboratorio è relativamente basso, ma si richiede un numero relativamente elevato di prove sui diversi prelievi, rispetto alle prove non-distruttive, per poter emettere una diagnosi.

Prove Distruttive

Nella Tabella che segue sono schematicamente riassunte le caratteristiche delle prove distruttive a confronto con quelle delle *prove non-distruttive*.

Caratteristiche generali delle prove distruttive e non distruttive

Tipo di prova	Distruttiva	Non distruttiva
Carattere prevalente	chimico chimico-fisico	fisico fisico-meccanico
Costo unitario	basso	alto
Numero delle prove	alto	basso
Contributo interpretativo	buono	mediocre
Valutazione della localizzazione e dell'estensione del degrado	scarsa costosa lenta	buona economica rapida

Lo scopo principale delle prove non-distruttive eseguite in sito sulla struttura è quello di fornire elementi utili non tanto

e non solo per emettere direttamente una diagnosi, quanto e soprattutto per guidare il tecnico in un prelievo finalizzato dei campioni e dei provini da sottoporre a poche e ben mirate prove distruttive di laboratorio.

Il contributo delle prove distruttive all'interpretazione del degrado dei materiali è molto maggiore che non di quelle non-distruttive. Infatti, le prove non-distruttive possono evidenziare dove e in che misura il degrado è in atto nell'ambito globale di un edificio (per esempio: un processo fessurativo localizzato in una parete) ma non sempre, senza le prove di laboratorio, potranno spiegare perché il degrado si è innescato e propagato. D'altra parte, senza una comprensione del meccanismo di degrado, si rischia con una diagnosi incompleta di mettere in atto un restauro inefficace e che, a distanza di tempo, ripropone, e talvolta aggrava, i mali originari.

Nei paragrafi che seguono verranno esaminate le principali prove non-distruttive e distruttive, precisando subito che nelle seconde, salvo quelle di carattere meccanico, la massa del campione occorrente per la singola prova è in genere piuttosto modesta (da qualche milligrammo a qualche grammo).

Prove Non-Distruttive

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

Rispetto alle *prove distruttive* quelle non-distruttive sono in genere caratterizzate dalle seguenti proprietà:

- mantengono sostanzialmente integra la struttura indagata;
- informano in modo globale, rapido e semplice;
- forniscono risultati sia qualitativi che quantitativi (o comunque comparativi).

Principali prove non-distruttive

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

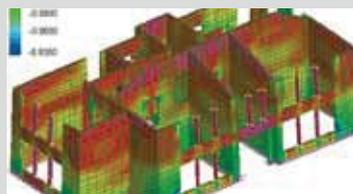
Prove Semi-Distruttive

Sono prove eseguite in situ sulla superficie della struttura in calcestruzzo: sono così chiamate perché provocano un danno superficiale inferiore a quello provocato dalle *prove distruttive*.

Le prove semi-distruttive comprendono la *pistola di Windsor* e la prova di *pull-out*.

COSA PUÒ FARE ENCO PER VOI

**Diagnosticare
il degrado e il dissesto
delle costruzioni**



**Riparare le costruzioni
danneggiate**

**Mettere a punto il
calcestruzzo per le
nuove costruzioni**



**Assistenza nelle
contestazioni legali**



**Corsi di
formazione e di
specializzazione
on line**



RESTAURO DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO DEGRADATO



Roberto Troli* - Francesca Simonelli**

*Enco srl - info@encosrl.it - **Libera Professionista

Sulla base degli elementi emersi nella **diagnosi del degrado delle strutture in calcestruzzo** è opportuno scegliere il materiale più idoneo per il restauro che sia in grado di resistere a quelle sollecitazioni di carattere chimico, fisico o meccanico alle quali il calcestruzzo originale non è stato in grado di resistere (M. Collepari, S. Collepari, J.J. Ogoumah Olagot, F. Simonelli e R. Troli, "Diagnosi del degrado e restauro delle strutture in C.A.", Seconda Ediz. Tintoretto, Villorba, TV, 2010). Una prima distinzione tra i materiali da impiegare nel restauro può essere fatta tra:

1. prodotti a base di **cemento**;
2. **materiali polimerici**;
3. **sali di litio**;
4. **FRP** oppure **FRMC**.

Come è mostrato nella Figura 1 la scelta dei materiali per il restauro deve tener conto anche della tecnica esecutiva che si intende adottare per il restauro.

1. Prodotti a base cementizia

Un primo requisito di questi prodotti è di essere resistenti all'attacco che ha provocato il degrado; per esempio nel caso di un degrado per **attacco solfatico** il materiale cementizio adottato per il restauro deve resistere a questo tipo di attacco.

Un secondo importante requisito dei prodotti a base

cementizia riguarda l'adesione al substrato in calcestruzzo da riparare: da questo punto di vista il **ritiro igrometrico** del materiale cementizio con cui si esegue il restauro provoca un distacco rispetto al substrato in calcestruzzo danneggiato che ha ormai scontato ogni ritiro e si presenta più stabile; la contrazione del materiale cementizio (malta o calcestruzzo), con cui eseguire il restauro, provoca il distacco dal substrato e/o la fessurazione del materiale da restauro esposto a tensione di trazione che superano la sua resistenza meccanica a trazione.

Per ovviare a questo grave inconveniente le malte o i calcestruzzi da restauro debbono contenere **agenti espansivi** per compensare il ritiro igrometrico e **additivi anti-ritiro** per rendersi quanto più indipendenti dall'accuratezza della **stagionatura umida**.

Altri componenti nei prodotti cementizi per il restauro del calcestruzzo sono:

- **cemento Portland ferrico** a basso C_3A , o **cemento resistente ai solfati** se si teme un degrado da attacco solfatico;
- **fumo di silice** per ridurre la **penetrazione del cloruro** e la **reazione ASR**;
- **micro-fibre polimeriche** per ridurre le **fessurazioni** provocate dal **ritiro plastico**;
- **fibre** in acciaio per migliorare la **resistenza all'urto**;
- **additivi superfluidificanti** per ridurre il **rapporto a/c** e la

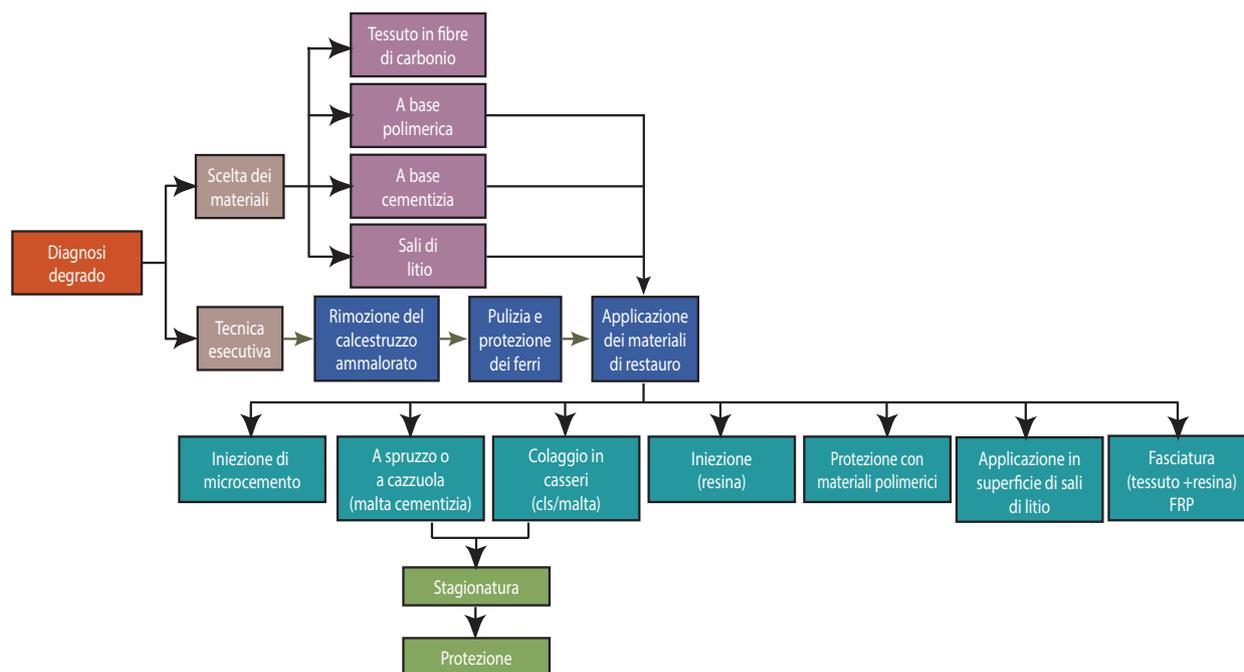


Fig. 1 - Interventi di restauro delle strutture in calcestruzzo degradato

permeabilità all'acqua;

- *additivi aeranti* in caso di strutture danneggiate dai *cicli di gelo-disgelo*.

Com'è illustrato nella Figura precedente, tre sono le possibili tecniche applicative di materiali cementizi: malta con comportamento *tixotropico* applicata a spruzzo o a cazzuola; malta o *calcestruzzo colabile* da introdurre tra vecchia struttura e cassaforma senza compattazione; *pasta cementizia* a base di *microcemento* superfluida da iniettare nelle macro-cavità del calcestruzzo danneggiato. In ogni caso prima delle varie applicazioni è necessario preparare la struttura da consolidare (scarificare il calcestruzzo danneggiato, saturare il sottofondo con acqua, pulire i ferri, ecc.). Nei paragrafi che seguono sono descritte le modalità operative per i tre specifici interventi.

1.1 Intervento a spruzzo o a cazzuola di malte tixotropiche

L'intervento è destinato all'applicazione di malte espansive a consistenza plastica con comportamento *tixotropico* per riparare grandi estensioni superficiali (pareti, volte, soffitti) di spessore relativamente ridotto (in genere da 2 a 4 cm). L'intervento comprende:

- preparazione del sottofondo;
- produzione della malta;
- applicazione della malta;
- stagionatura del rivestimento.

1.1.1 Preparazione del sottofondo

In linea di massima è necessario che il sottofondo di calcestruzzo sul quale si deve applicare la malta da restauro si presenti sano, irruvidito e saturo di acqua. I ferri di armatura, inoltre, debbono essere privati della loro ruggine incoerente. Occorre, pertanto:

- rimuovere, mediante scarifica meccanica o idrodemolizione, il materiale danneggiato fino ad arrivare ad un calcestruzzo meccanicamente resistente e irruvidito come è mostrato nella Figura che segue:



Fig. 2 - Scarifica del calcestruzzo danneggiato per rimuovere gli agenti aggressivi penetrati e predisporre un substrato irruvidito per migliorare l'aderenza alla malta da restauro

Lo spessore di calcestruzzo rimosso deve essere almeno eguale a quello che, in base alla diagnosi del *degrado delle strutture in calcestruzzo*, risulta essere ormai penetrato dagli agenti aggressivi (cloruro, solfato, ecc.) anche se ancora non completamente danneggiato; i residui di precedenti interventi non perfettamente aderenti, come anche oli, grassi, vernici superficiali, ecc., dovranno essere ugualmente rimossi; un irruvidimento ideale del sottofondo corrisponde ad una superficie con asperità di circa 5 mm;

- pulire i ferri di armatura da polvere e ruggine incoerente mediante sabbatura come mostrato nella seguente Figura:

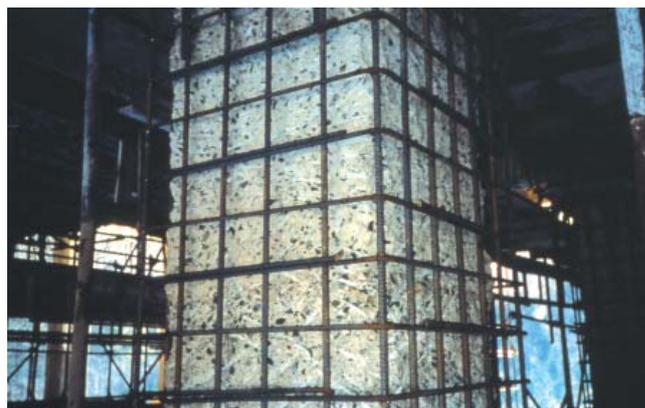


Fig. 3 - Ferri di armatura puliti con rimozione della ruggine pre-esistente contaminata da cloruri

- applicare eventualmente nuovi ferri di armatura se previsti dal progetto di restauro come è mostrato nella Figura che segue:



Fig. 4 - Applicazione di nuovi ferri di armatura

- applicare una *rete elettrosaldata* per spessori di malta fino a 25 mm come è mostrato nella Figura che segue.

La rete va applicata direttamente sul sottofondo e fissata con chiodi in modo da garantire un copriferro di almeno 15 mm; nel caso di spessori di malta fino a 50 mm —fermo restando il copriferro di almeno 15 mm— è consigliabile, mediante distanziatori, sistemare la rete elettrosaldata in modo che non sia a diretto contatto del sottofondo (ma disposta simmetricamente nello strato di malta) per uti-

lizzare al massimo l'azione di contrasto della rete stessa nei confronti dell'espansione della malta; ad ogni modo, per spessori maggiori di 25 mm è consigliabile applicare il prodotto a più strati ciascuno dei quali per non più di 25 mm; spessori di malta inferiori a 15 mm possono essere applicati anche in assenza di rete elettrosaldata, purché il contrasto all'espansione della malta sia assicurata dalle asperità (5 mm) del sottofondo in calcestruzzo;



Fig. 5 - Applicazione della rete elettrosaldata sulla superficie di calcestruzzo scarificato

- saturare di umidità il sottofondo bagnando con acqua a pressione come è mostrato nella Figura che segue al fine di evitare sottrazione di acqua alla malta da applicare con conseguente perdita delle caratteristiche espansive; una tecnologia ottimale è quella basata sull'impiego delle macchine per lavaggio ad acqua delle autovetture con rimozione dell'eccesso di acqua mediante aria compressa o stracci per ottenere un sottofondo saturo di acqua a superficie asciutta.

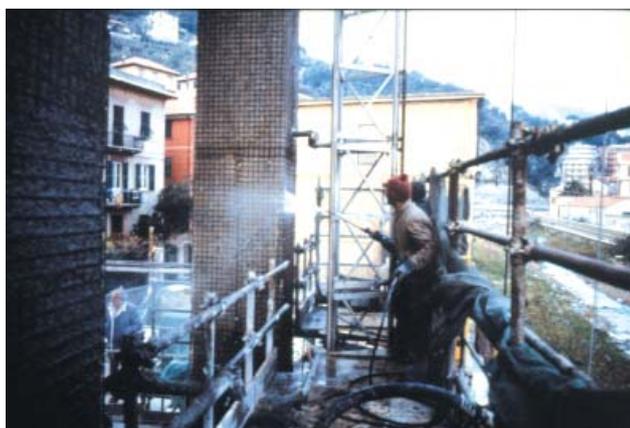


Fig. 6 - Applicazione di acqua a pressione per saturare la superficie del calcestruzzo

1.1.2 Produzione della malta tixotropica

Prima di iniziare la produzione della malta è necessario aver predisposto le attrezzature occorrenti (betoniera, macchina intonacatrice, cazzuola, spatola, frattazzo) ed accertare che il quantitativo di prodotto sia sufficiente per l'esecuzione del lavoro (di solito da 1900 a 2000 kg per 1 m³ di malta).

Si procede, quindi, alla miscelazione della malta in betoniera seguendo le istruzioni del produttore per quanto con-

cerne la quantità di acqua da impiegare e le modalità operative.

Nel caso di climi caldi (>35°C) si raccomanda di immagazzinare i prodotti occorrenti alla preparazione della malta in luoghi protetti dalla diretta insolazione; in inverno, se la temperatura scende al di sotto di 10°C, è consigliabile conservare i prodotti in ambienti chiusi al riparo dalle intemperie. Queste precauzioni evitano fenomeni di *presa* rapida in estate o lenta in inverno della malta. Per lo stesso motivo è consigliabile l'impiego di acqua raffreddata (0-10°C) o riscaldata (40-60°C) rispettivamente nei periodi di clima caldo o freddo.

1.1.3 Applicazione della malta tixotropica

L'applicazione può essere eseguita a cazzuola o, più produttivamente ed efficacemente a spruzzo con macchina intonacatrice come è mostrato a titolo di esempio nella Figura che segue:



Fig. 7 - Applicazione a spruzzo della malta da restauro proiettata all'intradosso di un solaio in calcestruzzo

Subito dopo si può procedere, con una spatola di legno, a rendere più o meno planare la superficie rimuovendo la malta dalle zone di maggior accumulo. La finitura finale, mostrata nella Figura che segue, può essere eseguita (con frattazzo di legno, di ferro o di spugna sintetica) in un tempo successivo (circa 30-60 min) quando, appoggiando la mano sulla superficie, le dita non affondano ma lasciano solo una

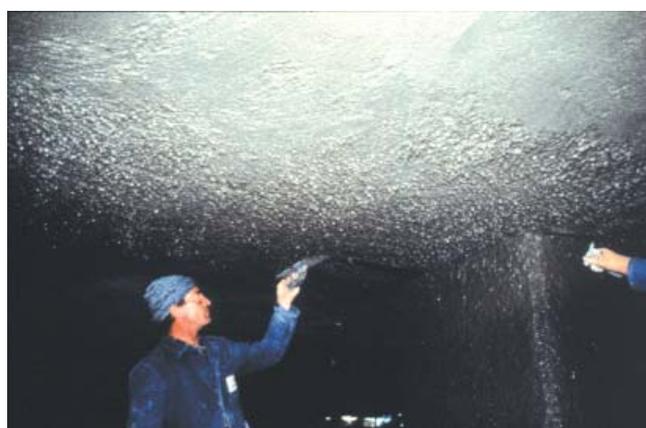


Fig. 8 - Finitura con frattazzo metallico della malta spruzzata

leggera impronta.

Se la malta ha da poco iniziato la presa l'operazione di frattazzatura superficiale può essere agevolata se è accompagnata dall'applicazione di acqua nebulizzata.

1.1.4 Stagionatura

Subito dopo la finitura finale, le superfici della malta applicata debbono essere stagionate con teli costantemente umidi per almeno 24 ore e fino a 2 giorni in ambienti caldi (> 30°C), asciutti (UR < 70%) e ventilati (velocità del vento > 10 km/ora). In alternativa, subito dopo la finitura le superfici possono essere trattate con *agente stagionante* per creare una *membrana anti-evaporante* come è mostrato nella Figura che segue.



Fig. 9 - Applicazione di un agente stagionante nebulizzato sulla superficie della malta da restauro

Questa operazione è sconsigliata se si debbono applicare ulteriori rivestimenti protettivi o vernici, a meno che non si provveda successivamente a rimuovere la pellicola dell'agente stagionante mediante spazzolatura.

1.2 Intervento per colaggio

L'intervento è destinato all'applicazione di una *malta* o di un *calcestruzzo a ritiro compensato* a consistenza superfluida (autolivellante) per riparare superfici verticali (pareti, muri, pilastri), orizzontali (pavimentazioni) o per riempire cavità interne (fori praticati in strutture armati con barre). Il metodo, quando in alternativa è impiegabile quello a spruzzo o a cazzuola, si fa preferire per spessori relativamente elevati (> 50 mm) che consentano un facile riempimento del prodotto. In questo caso l'intervento comprende:

- preparazione del sottofondo;
- cassetatura;
- produzione della malta o del calcestruzzo;
- colaggio della malta o del calcestruzzo;
- stagionatura della superficie.

1.2.1 Preparazione del sottofondo

Valgono le stesse raccomandazioni già descritte nel summenzionato paragrafo 1.1.1 con la variante che non è prevista la rete elettrosaldata ma solo eventuali ferri integrativi di

quelli già esistenti.

1.2.2 Cassetatura

Le *casseforme*, in materiale resistente ed impermeabile, debbono essere ancorate e contrastate per resistere alla pressione idraulica dell'impasto fluido. Nei climi caldi e asciutti è consigliabile saturare con acqua le casseforme in legno (se poroso) per evitare sottrazione di acqua all'impasto. Prima del getto è necessario applicare il *disarmante* per facilitare il distacco dei casseri. Per favorire l'immissione della malta occorre predisporre nei casseri un'imboccatura a tasca in modo da garantire un battente di carico. Qualora ci siano perdite di malta attraverso le connessioni tra i casseri è necessario che queste siano sigillate con listelli di polistirolo, materiali collanti o anche con la stessa malta a consistenza plastica del prodotto cementizio impiegato per il restauro.

1.2.3 Produzione della malta o del calcestruzzo

Valgono le stesse raccomandazioni già descritte nel summenzionato paragrafo 1.1.3 con la variante che la consistenza della malta o del calcestruzzo deve essere superfluida per rendere agevole l'applicazione per colaggio.

1.2.4 Applicazione della malta o del calcestruzzo

La malta o il calcestruzzo autolivellante deve essere colato, come è mostrato nella Figura che segue in modo da favorire lo spostamento dell'aria pre-esistente nelle zone casserate da riempire:



Fig. 10 - Applicazione per colaggio della malta entro i casseri predisposti sulla struttura da riparare precedentemente saturata con acqua

Ove possibile, è consigliabile gettare o *pompare* l'impasto fluido da un solo lato favorendone la fuoruscita da quello opposto. Ad ogni modo occorre evitare di gettare o pompare l'impasto simultaneamente su due lati opposti per evitare che l'aria (sotto forma di macrobolle) venga intrappolata dai due flussi di malta in controcorrente. Nel caso di riparazione di pavimenti, solette o solai, l'impasto autolivellante deve essere stagiato subito dopo il getto. Il completo riempimento delle cavità può essere agevolato dall'impiego di tondini flessibili per rimuovere la malta fluida in eccesso e facilitare

l'espulsione dell'eventuale aria residua, mentre è sconsigliabile ricorrere a vibratori ad ago o a parete.

1.2.5 Stagionatura

In aggiunta alle raccomandazioni già descritte nel summenzionato paragrafo 1.1.4, che valgono anche per i getti colati su superfici orizzontali non casserate (pavimenti, solai, ecc.), le superfici verticali, se la scasseratura avviene prima di 24 ore, debbono essere protette con agente stagionante o con teli umidi per almeno altre 24 ore se il clima è caldo (>30°C), asciutto (UR < 70%) e ventilato (velocità del vento >10 km/ora).

1.3 Iniezione di boiaccia cementizia

Nel caso che si debba restaurare una struttura che presenti difetti interni (vespai) o esterni (fessure) non penetrabili dalle malte, è possibile procedere ad un consolidamento mediante iniezioni di una **boiaccia** a base di una pasta superfluida di **microcemento**. In genere, nel caso di fessure, è preferibile un consolidamento con **liquidi polimerizzabili** più penetrabili che non le boiacche cementizie.

Prima di applicare la boiaccia di cemento è opportuno saturare con acqua tutta la struttura interna da consolidare. A questo scopo, utilizzando gli stessi fori attraverso i quali verrà eseguita l'iniezione della boiaccia, si procede alla completa bagnatura interna delle strutture nel giorno che precede l'intervento di consolidamento vero e proprio, per consentire lo smaltimento dell'eventuale acqua libera ristagnante all'interno.

Le perforazioni dovrebbero essere disposte simmetricamente, possibilmente ai vertici di un reticolo a maglie quadrate con lato da 50 a 100 cm. Nelle strutture di spessore inferiore a 60 cm i fori vengono di solito eseguiti su un solo lato, mentre in quello con spessori superiori è opportuno procedere all'iniezione su entrambi i lati. I fori (diametro: 3-4 cm) possono essere orizzontali o inclinati e sono muniti di appositi bocchigli di plastica del diametro di 10-15 mm attraverso i quali verrà iniettata a pressione la boiaccia cementizia dopo aver provveduto ad otturare le possibili vie di fuga.

Prima di iniettare la boiaccia occorre sigillare le fessure o procedere all'applicazione di un intonaco provvisorio – da rimuovere a consolidamento effettuato – per impedire la fuoriuscita della boiaccia iniettata.

Si procede, quindi, alla preparazione della boiaccia mescolando per 5 minuti il microcemento e l'acqua in un miscelatore ad alta turbolenza o con trapano munito di frusta fino ad ottenere un impasto fluido come olio (con uno svuotamento del **cono di Marsh** del primo litro di boiaccia: minore di 30 sec) e privo di **bleeding**.

La boiaccia deve essere utilizzata per il consolidamento delle strutture entro il tempo raccomandato dal produttore (di solito 30-60 min) e riaggiate di acqua per conservare la fluidità dell'impasto possono essere eseguite solo entro i limiti esplicitamente previsti dalle raccomandazioni tecniche di impiego.

Si inizia il consolidamento mediante iniezione attraverso un foro alla quota più bassa procedendo successivamente

alla chiusura degli altri fori non appena si registra la fuoriuscita della boiaccia cementizia. Si procede quindi con l'iniezione attraverso altri fori disposti più in alto.

2. Materiali polimerici

Esistono vari tipi di **polimero** ed hanno molteplici applicazioni in tutti i settori della vita quotidiana (utensili, macchine, autovetture, componenti per elettronica, pneumatici, mobili, ecc.). Molti di essi sono destinati al settore delle costruzioni. Quelli che maggiormente interessano il campo del restauro delle costruzioni sono prodotti solidi ottenuti per polimerizzazione di un monomero liquido e sono mostrati nella Tabella che segue:

Classificazione dei principali polimeri per il restauro delle opere in calcestruzzo

POLIMERO	TIPO	APPLICAZIONE
Resine epossidiche	Bicomponente	Rivestimento superficiale
		Impregnazione di cavità
		Sigillatura di fessure
		Giunzione tra strutture
Resine poliuretatiche	Bicomponente	Rivestimento superficiale
		Impregnazione di cavità
		Sigillatura di fessure
		Giunzione tra strutture
Resine alchidiche	Monocomponente	Rivestimento superficiale
Resine viniliche	Monocomponente	Rivestimento superficiale
Poliacrilati	Monocomponente	Rivestimento superficiale
Silani	Monocomponente	Impregnazione parziale

I polimeri mostrati nella precedente Tabella sono di due tipi:

- polimeri bicomponenti formati da due prodotti liquidi che, dopo essere stati mescolati, polimerizzano e solidificano;
- polimeri monocomponenti formati da un polimero già solidificato disciolto in un solvente che evapora dopo l'applicazione sulla superficie di una struttura lasciando una pellicola solidificata.

Fanno eccezione a questa definizione i prodotti a base di **silano** i quali sono formati da un monomero che polimerizza in presenza di acqua come è mostrato più avanti.

Di seguito sono illustrate le principali applicazioni.

2.1. Rivestimento impermeabile

Entrambi i tipi di prodotti polimerici —bicomponenti e monocomponenti, con l'esclusione dei **silani** — possono essere applicati sulla superficie di una muratura in calcestruzzo per produrre —a polimerizzazione terminata o a evaporazione ultimata del solvente— un rivestimento pellicolare impermeabile ed aderente al supporto. La Figura che segue mostra schematicamente il risultato ottenuto dopo questo

trattamento:

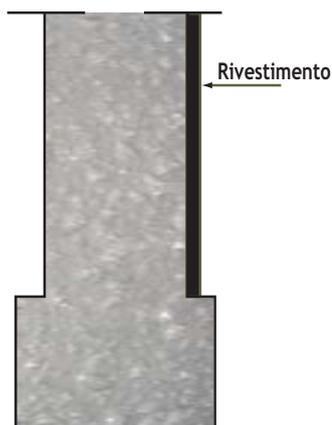


Fig. 11 - Schematizzazione del rivestimento superficiale con resina polimerica bicomponente o monocomponente

2.2. Impregnazione di cavità e fessure in superficie

Se il liquido è relativamente poco viscoso esso può essere iniettato attraverso tubicini in plastica applicati sulla superficie della struttura da consolidare, come si è già descritto al paragrafo 1.3 per l'iniezione di una boiaccia cementizia, e come è mostrato nella Figura che segue:



Fig. 12 - Predisposizione di tubicini attraverso i quali si può iniettare il liquido polimerico per riempire le cavità o le lesioni interne

Per questo tipo di applicazione è impiegabile solo una resina bicomponente poiché quella monocomponente una volta iniettata non può indurire per l'impedimento all'evaporazione del solvente. Nella Figura 13 è mostrato schematicamente il risultato dell'iniezione della resina bicomponente prima e dopo l'impregnazione delle cavità.

Un'altra applicazione, simile alla precedente, riguarda l'iniezione di liquidi monomerici all'interno di fessure della larghezza di qualche frazione di millimetro. In tal caso, il grande potere adesivo dei liquidi monomerici, una volta consolidata, porta fino alla completa saldatura della pre-esistente lesione come è mostrato nella Figura 14.

2.3. Giunzione di due superfici

L'applicazione forse più efficace dei polimeri consiste

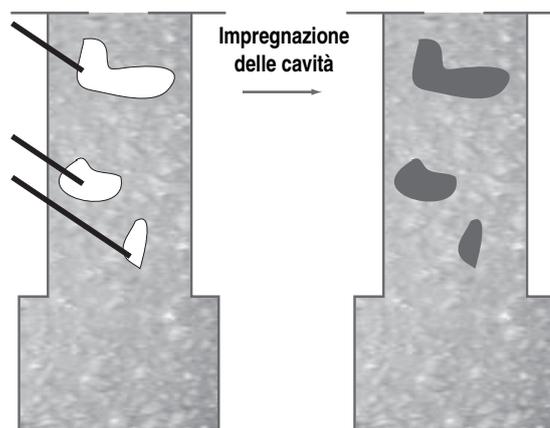


Fig. 13 - Impregnazione e consolidamento di una struttura in calcestruzzo dopo iniezione con resina bicomponente



Fig. 14 - Sigillatura di lesioni superficiali mediante iniezione di liquidi monomerici che successivamente solidificano per polimerizzazione

nel far aderire due superfici, anche di materiale diverso (legno, ceramica, metallo, malta, ecc.), in modo da realizzare una giunzione delle due strutture come è mostrato nella Figura che segue:

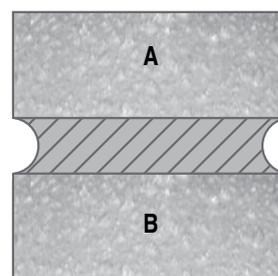


Fig. 15 - Giunzione di due strutture A e B mediante resina polimerica bicomponente

Nel campo delle costruzioni in calcestruzzo questa caratteristica dei materiali polimerici viene utilizzata nel restauro delle strutture rinforzate, mediante applicazione di una lamiera di acciaio, sfruttando la grande capacità di adesione del polimero tanto all'acciaio quanto al calcestruzzo. Nella Figura che segue è mostrata schematicamente la tecnica del *béton plaqué* nel caso di una trave rinforzata all'intradosso con una lamiera metallica:

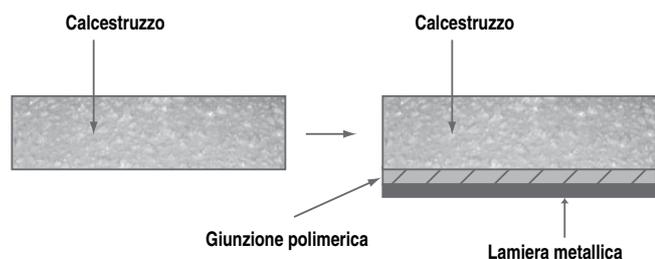


Fig. 16 - Tecnica del béton plaqué realizzata con giunzione di resina polimerica bicomponente tra calcestruzzo ed acciaio

Uno degli appunti più critici che viene sollevato a questa tecnica riguarda l’inaffidabilità della struttura in casi di incendio, sia per la diretta esposizione del metallo alle eventuali fiamme, sia per la scarsa resistenza del polimero alle alte temperature.

2.4. Rivestimento elastico

Un’altra applicazione dei materiali polimerici riguarda il **rivestimento elastico del calcestruzzo** con uno spessore sottile (1-3 mm) di un sistema formato da “cemento + sabbia fine + poliacrilato + acqua” sotto forma di vernice protettiva: questa sospensione una volta indurita, a seguito della reazione tra acqua e cemento, assume caratteristiche elastiche —per la presenza del poliacrilato— tali da poter essere deformata anche del 100-200% prima di fessurarsi. La Figura che segue mostra come questa malta sia flessibile al punto di poter essere piegata senza alcun rischio di fessurazione.

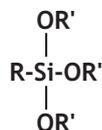


Fig. 17 - Malta cementizia a spessore millimetrico resa flessibile dalla presenza di poliacrilato

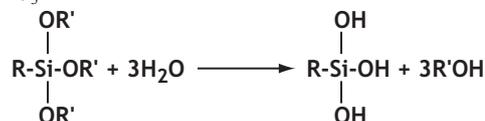
Lo scopo di questo trattamento superficiale è quello di coprire le fessure eventualmente prodotte nel sottostante conglomerato cementizio per cause varie (carichi dinamici, escursioni termiche, cedimenti di fondazioni, ecc.) a causa della sua intrinseca e caratteristica fragilità: la presenza della pellicola superficiale elastica in poliacrilato in corrispondenza delle sottostanti fessure, protegge i ferri di armatura dall’infiltrazione degli agenti aggressivi ambientali.

2.5. Protezione idrofobizzante

I **silani**, abbreviazione di alchil-alcossi-silani, sono prodotti liquidi che hanno la seguente formula:



dove R è un gruppo alchilico come il metile (CH₃), oppure l’etile (-C₂H₅), oppure l’isobutile (-C₃H₇) o anche un alchile più lungo come l’ottile (-C₈H₁₇), ed OR’ è il gruppo alcossilico come per esempio l’etossilico (-O-C₂H₅). Il prodotto, così come si trova nel contenitore prima dell’uso, rappresenta il monomero. Il gruppo Si-O-R’ è suscettibile di idrolizzarsi, cioè di rompersi in presenza di umidità, e produrre R-Si(OH)₃:



Questa reazione di idrolisi, che porta alla formazione di un nuovo monomero R-Si(OH)₃, non avviene fin tanto che il prodotto originale R-Si(OR’)₃ è conservato nel contenitore al riparo dall’umidità (H₂O). Dopo l’applicazione sulla superficie del manufatto da trattare, il prodotto liquido R-Si(OR’)₃ viene assorbito per **suzione capillare** dai pori presenti nel calcestruzzo collegati con la superficie esterna, ed in situ, con l’umidità normalmente presente nel calcestruzzo, avviene la trasformazione di R-Si(OR’)₃ in R-Si(OH)₃ secondo la reazione di idrolisi sopra riportata.

L’assorbimento del prodotto originale R-Si(OR’)₃ e la sua trasformazione nel prodotto di idrolisi R-Si(OH)₃ coinvolge tanto la superficie esterna direttamente esposta all’aria quanto la superficie interna dei pori per una profondità di qualche millimetro. Per garantire un buon assorbimento è necessario che il calcestruzzo non sia saturo di acqua —come si verifica subito dopo una pioggia— per evitare che l’assorbimento capillare del silano sia ostacolato dall’acqua stessa.

La reazione di idrolisi del silano è catalizzata da acidi o basi. Pertanto, nei pori del calcestruzzo, dove è presente la **calce di idrolisi** proveniente dall’**idratazione del cemento Portland**, avviene facilmente la suddetta reazione di idrolisi del silano sia per l’ambiente basico, dovuto alla calce che funge da catalizzatore, sia per la presenza di umidità.

Successivamente, sulla superficie esterna e quella interna dei pori del calcestruzzo, avviene una polimerizzazione tra le varie molecole di R-Si(OH)₃ con formazione di legame Si-O-Si, ed eliminazione dell’acqua che si forma durante il processo. Nella Figura che segue è mostrato il processo di polimerizzazione, limitatamente a tre molecole di monomero R-Si(OH)₃, che portano ad un trimero che conserva tre gruppi (OH) liberi:

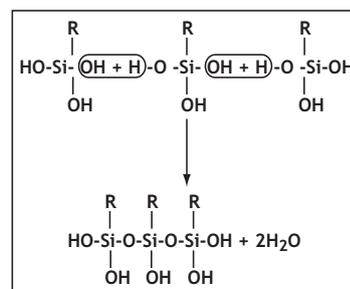


Fig. 18 - Polimerizzazione di tre molecole di silano

Grazie ai gruppi OH residui, il polimero silanico viene attratto ed adsorbito sulla superficie del calcestruzzo dove sono situati altri gruppi OH quali quelli della calce in forma di “—Ca—OH”, come è mostrato nella parte A della Figura che segue:

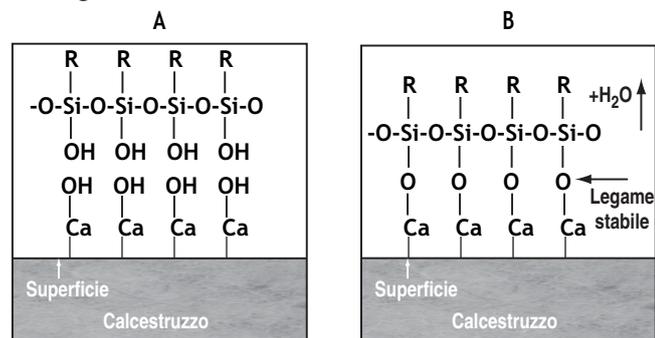


Fig. 19 - A): il silano polimerizzato (Si-O-Si) si attacca alla superficie interna ed esterna del calcestruzzo dove esistono i gruppi —Ca—OH; B): eliminazione dell’H₂O che porta alla formazione di un legame stabile (Si-Ca-Si) tra il polimero silanico e la superficie del calcestruzzo

Successivamente tra i gruppi OH del polimero silanico e quelli presenti sulla superficie del calcestruzzo avviene una reazione che porta all’eliminazione di acqua ed alla formazione di un legame chimico Si-O-Ca molto stabile che consente di fissare definitivamente il polimero silanico sulla superficie del calcestruzzo come è mostrato nella parte B della precedente Figura.

Alla fine di questo trattamento la superficie esterna, come anche la superficie interna dei pori entro i quali il silano è penetrato, risulta ricoperta da un film sottilissimo di polimero silanico che presenta il gruppi alchilico (R) rivolto verso l’esterno rispetto alla superficie trattata come è mostrato nella Figura che segue.

Il gruppo alchilico (R) è fortemente idrofobo, come del resto sono gli idrocarburi da cui deriva. In altre parole la superficie esterna, come anche quella interna dei pori capillari, risulta, dopo il trattamento con silano, rivestita da un sottilissimo strato di gruppi idrocarburici (R) fortemente idrorepellenti.

Nella pratica il trattamento, per essere efficace, deve essere fatto su una superficie che non risulti né assolutamente asciutta, altrimenti non si verifica l’idrolisi da silano a R-Si(OH)₃, né satura di acqua, altrimenti viene ostacolata la penetrazione del liquido silanico all’interno dei pori ed il processo che porta a fissare stabilmente il silano sulla superficie con eliminazione di acqua. Pertanto, l’intervento è sconsigliabile in periodi immediatamente successivi alla pioggia così come dopo prolungata insolazione: in quest’ultimo caso è consigliabile spruzzare un po’ d’acqua sulla superficie ed attendere che si asciughi prima di applicare il silano; l’umidità residua sarà in grado di favorire l’idrolisi da R-Si(OR’)₃ a R-Si(OH)₃.

3. Sali di litio

I sali di *litio* in forma di fluoruri, carbonati o nitrati, sono adatti a prevenire la *reazione alcali-silice* nota come *ASR*

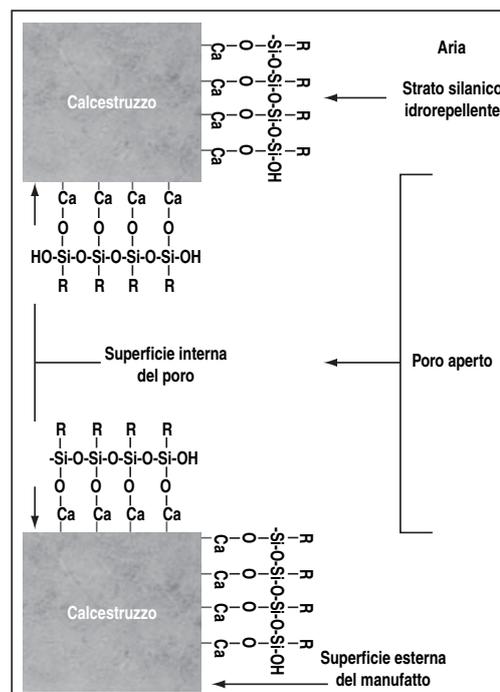


Fig. 20 - Rivestimento con film polimerico di silano idrofobizzante all’interno di un poro di calcestruzzo

acronimo inglese di Alkali-Silica Reaction quando nel calcestruzzo sono presenti inerti a base di *silice alcali-reattiva* (M. Berra, T. Mangialardi, A. E. Paolini, “Efficacia del nitrato di litio come inibitore della reazione espansiva alcali-silice nel calcestruzzo, *Enco Journal* n. 53, 2011). Tuttavia, raramente i sali di litio sono impiegati a questo scopo a causa del loro costo elevato preferendo semmai l’alternativa di *cemento d’altoforno*, *cemento pozzolanico* o *cemento composito* tutti capaci di neutralizzare la pericolosa reazione alcali-aggregato in forma di distacchi localizzati, noti come *pop-out*, che nel caso delle pavimentazioni si aggravano con il traffico veicolare.

I sali di litio diventano invece indispensabili in fase di restauro di costruzioni danneggiate dall’ASR. Infatti, i danni di questa reazione, che sono localizzati in forma discontinua solo in corrispondenza dei *pop-out*, non si manifestano tutti contemporaneamente sulla superficie di una costruzione, e di una pavimentazione in particolare, ma possono dislocarsi nel tempo anche a distanza di mesi e pertanto non si è mai sicuri se, iniziata la riparazione, non abbiano ancora a manifestarsi altri *pop-out*. Applicando, invece, i sali di litio al primo apparire del danno, come è quello mostrato nella Figura che segue, si è sicuri di poter bloccare il fenomeno e si può quindi

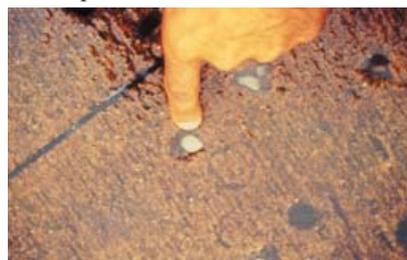


Fig. 21 - Formazione dei primi fenomeni di pop-out in una pavimentazione affetta dalla reazione alcali-aggregato

procedere alla riparazione localizzata rimuovendo il calcestruzzo danneggiato e riparandolo con una malta cementizia tixotropica (descritta nel summenzionato paragrafo 1.1.3.) seguita da un'adeguata stagionatura umida come descritta nel paragrafo 1.1.4.).

Le alternative all'impiego dei sali di litio sono:

- a) attendere che il fenomeno di ASR appena iniziato si esaurisca completamente e poi intervenire nel restauro delle aree danneggiate (scarifica, saturazione con acqua, applicazione di malte da restauro, stagionatura umida);
- b) rimuovere completamente tutta la parte corticale della struttura coinvolta nel danno e riparare integralmente la superficie dell'opera danneggiata.

4.FRP

FRP è l'acronimo Inglese di *Fiber Reinforced Polymer*, cioè, "materiali polimerici fibrorinforzati" e rappresentano la frontiera più avanzata nel settore del restauro e dell'adeguamento statico degli edifici civili e di opere infrastrutturali come i ponti (A. Nanni, "FRP Reinforcement for Bridge Structures", *Proceedings of Structural Engineering Conference, The University of Kansas, Lawrence, KS, March 16, 2000, 5 pp.*).

L'impiego dell'FRP in edilizia riguarda solo in minima parte gli edifici e le infrastrutture di nuova costruzione dove i materiali da costruzione più impiegati sono ancora quelli tradizionali come il calcestruzzo, l'acciaio e il legno decisamente più economici.

L'utilizzo prevalente dell'FRP nelle costruzioni riguarda il settore del restauro statico delle strutture degradate o danneggiate e quello dell'adeguamento statico, in particolare in campo antisismico.

Un intervento di ripristino basato sull'utilizzo di materiali compositi ad alte prestazioni come l'FRP, nonostante il costo più elevato delle materie prime rispetto ai materiali da costruzione tradizionali, può risultare più economico se si estende la valutazione economica ai tempi e alle attrezzature necessarie per l'intervento, ai costi derivanti da eventuali interruzioni dell'esercizio della struttura e alla stima della vita utile della struttura stessa a seguito dell'intervento secondo il criterio del *Life Cycle Cost*. L'FRP, infatti, grazie alla estrema leggerezza, può essere messo in opera senza l'ausilio di particolari attrezzature e macchinari, da un numero limitato di operatori, in tempi estremamente brevi e, spesso, senza che risulti necessario interrompere l'esercizio della struttura.

4.1 Materie prime dell'FRP

La matrice polimerica dell'FRP è prevalentemente formata da una *resina epossidica* e più raramente in *poliestere*.

Le fibre impiegate per il rinforzo della matrice polimerica sono in *carbonio* o in *aramide* o in *vetro* e più raramente in *boro*.

Le fibre, prime del loro impiego nel restauro, vengono trasformate in *tessuti* o *pultrusi* come è descritto rispettivamente nei seguenti paragrafi 4.2 e 4.3.

4.2 Tessuti dell'FRP

La forma più diffusa di rinforzo nell'FRP impiegato nel settore delle costruzioni è basata sull'impregnazione in opera con resine epossidiche di tessuti prodotti con le fibre. I tessuti vengono realizzati per mezzo di telai analoghi a quelli utilizzati nella realizzazione dei prodotti tessili tradizionali e possono essere prodotti secondo una vasta gamma di configurazioni e caratteristiche a seconda dei materiali utilizzati e della disposizione che assumono nel piano del tessuto i vari fasci di fibre.

Dal punto di vista della configurazione geometrica si può fare la distinzione in:

- 1) *tessuti monoassiali*;
- 2) *tessuti biassiali*;
- 3) *tessuti multiassiali*.

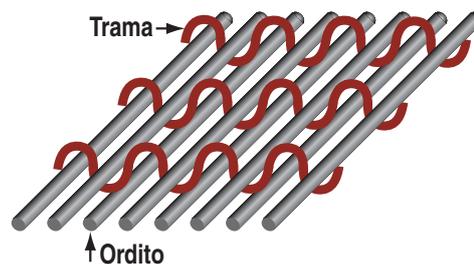


Fig. 22 - Tessuto monoassiale con fasci di fibre tenuti insieme in un'unica direzione da una trama di filamenti di materiale diverso da quello delle fibre

- 1) I *tessuti monoassiali* sono costituiti da fibre o fasci di fibre disposte tutte parallelamente (ordito) e tenute assieme da una trama di filamenti che possono essere dello stesso materiale delle fibre dell'ordito o, più spesso, da un materiale diverso —per esempio il nylon o il poliestere— come è mostrato nella Figura che segue:

Nelle tecniche di rinforzo strutturale per incollaggio all'esterno di fibre ad alta resistenza, i tessuti monoassiali trovano impiego in tutti i casi in cui è noto a priori l'andamento delle linee isostatiche di trazione, ossia delle tensioni principali di trazione. In questo caso, ovviamente, i tessuti vengono posti in opera disponendo le fibre dell'ordito nella direzione del massimo sforzo di trazione. Esempio tipico è il rinforzo a flessione delle travi o delle solette mediante applicazione all'intradosso di tessuti monoassiali con fibre dirette lungo l'asse delle travi o delle solette.

Nei casi in cui non è nota a priori la direzione delle sollecitazioni massime di trazione oppure quando questa può variare lungo l'elemento da rinforzare o in funzione dei carichi esterni applicati, infine, quando nello stato tensionale della struttura da rinforzare esistono due direzioni principali di trazione, si potrà comunque procedere al rinforzo utilizzando tessuti di tipo monoassiale, avendo, però, l'accortezza di disporre più strati di tessuto orientati secondo le diverse direzioni.

- 2) I *tessuti biassiali* vengono ottenuti intrecciando fasci di fibre secondo due direzioni ortogonali. Possono essere realizzati utilizzando sia fibre dello stesso tipo nelle due direzioni che fibre di natura diversa (ad esempio, carbo-

nio in una direzione e aramide nell'altra). In quest'ultimo caso il tessuto viene definito "ibrido". Un tessuto biassiale costituito nelle due direzioni dallo stesso tipo e dalla stessa grammatura (peso per metro quadro) di fibre, viene definito "bilanciato". I tessuti ibridi trovano applicazione nella realizzazione di manufatti in composito dove, nelle due direzioni ortogonali, sono richieste prestazioni meccaniche sostanzialmente diverse. Tuttavia, questi tessuti non trovano alcuna applicazione pratica nel settore delle costruzioni civili.

I tessuti biassiali, se sono caratterizzati da maglie sufficientemente compatte e ravvicinate, possono essere confezionati senza l'ausilio di filamenti di supporto in quanto i due fasci di fibre ortogonali si intrecciano e si mantengono reciprocamente. Tuttavia, nella realizzazione di tessuti biassiali da utilizzare per impregnazioni in situ, si tende a mantenere distanti tra loro i singoli fasci di fibre in modo da lasciare ampi vuoti e consentire una più facile penetrazione della resina all'interno del tessuto. Per mantenere ferma l'inclinazione e la distanza reciproca tra i fasci di fibre del tessuto ed evitare perdite di fibre, si introduce una fitta "legatura" in Inglese *knitting* ottenuta utilizzando, ad esempio, dei filati acrilici o in poliestere come è mostrato nella Figura che segue:



Fig. 23 - Tessuto biassiale bilanciato tenuto assieme da una legatura con fili in poliestere

3) I *tessuti multiassiali* vengono ottenuti, mediante speciali tecniche di tessitura, disponendo le fibre secondo più direzioni tra di loro variamente inclinate. In commercio esistono tessuti triassiali, con fasci di fibre intessuti lungo tre direzioni inclinate di 120° l'una rispetto all'altra, e tessuti quadriassiali caratterizzati dalla presenza di quattro diversi ordini di fibre inclinati di 135° l'uno rispetto all'altro. La realizzazione pratica dei tessuti multiassiali comporta, necessariamente, l'utilizzo di filamenti di knitting che servono a "cucire" e a far stare insieme i vari fasci di fibre i quali, risultano, per lo più, sovrapposti l'uno all'altro senza essere intrecciati come è mostrato nella Figura che segue.



Fig. 24 - Tessuto quadri assiale in fibra di carbonio

Nel settore del rinforzo strutturale i tessuti multiassiali trovano impiego laddove la direzione delle tensioni di trazione non è nota o può variare in funzione dei carichi esterni. Esempi di utilizzo sono: il rinforzo a taglio delle travi inflesse, dove l'inclinazione dei probabili piani di frattura non è più di 45° , come nel caso delle travi in C.A. ma varia in funzione di diversi parametri, o il rinforzo di superfici murarie o voltate, dove l'esatto andamento degli sforzi spesso non è di agevole determinazione. In questi casi, l'applicazione di un tessuto caratterizzato da una distribuzione di fibre secondo più direzioni nel piano, consente di riprendere le tensioni di trazione che si sviluppano nella struttura da rinforzare qualunque sia l'andamento delle loro curve di inviluppo.

4.2.1 Parametri caratteristici dei tessuti

Oltre al tipo e alla disposizione delle fibre esistono ulteriori parametri che caratterizzano un tessuto e che è necessario conoscere per progettare un rinforzo strutturale. Essi sono:

- grammatura (g/m^2);
- larghezza (mm, cm, m);
- sezione resistente unitaria (mm^2/m);
- **resistenza a trazione** (MPa);
- **modulo elastico** (MPa);
- allungamento a rottura (%).

La *grammatura* è il peso, espresso in grammi, di un metro quadro di tessuto e costituisce una indicazione del quantitativo complessivo di fibra presente nel tessuto.

La *larghezza* è la dimensione del tessuto trasversale alla direzione lungo la quale esso risulta arrotolato. I produttori di tessuti tendono a produrre di uno stesso tipo di tessuto varie larghezze commerciali. Per quanto attiene ai tessuti monoassiali che vengono utilizzati per il rinforzo strutturale, le larghezze commerciali più diffuse sono 20 cm, 30 cm e 50 cm. Per i tessuti multiassiali, in genere, si utilizzano larghezze maggiori per consentire un sufficiente sviluppo alle fibre poste in direzione inclinata rispetto alla lunghezza.

La *sezione resistente unitaria* è la sezione complessiva delle fibre di un tessuto aventi una determinata direzione, riferita all'unità di larghezza. È un parametro che viene calcolato dividendo il peso in grammi delle fibre di un tessuto disposte lungo una certa direzione, per il peso specifico assoluto del materiale di cui è costituito il tessuto. A titolo d'esempio, in un tessuto monoassiale da 300 g/m^2 in fibra di carbonio, tenuto conto che il peso specifico del carbonio è di circa $1,8 \text{ g/cm}^3 = 1,8 \cdot 10^6 \text{ g/m}^3$, la sezione resistente unitaria nella direzione (unica) di tessitura delle fibre è data da: $300 / (1,8 \cdot 10^6) = 1,66 \text{ cm}^2/\text{m}$.

I materiali *FRP* sono caratterizzati da un comportamento perfettamente elastico lineare fino alla rottura. Se, cioè, si sottopone un campione di tessuto costituito da carbonio, aramide o vetro ad una prova di trazione diretta fino a portarlo alla rottura, si ottiene un diagramma del tipo di quello riportato nella Figura che segue.

Il comportamento meccanico di un tessuto è completa-

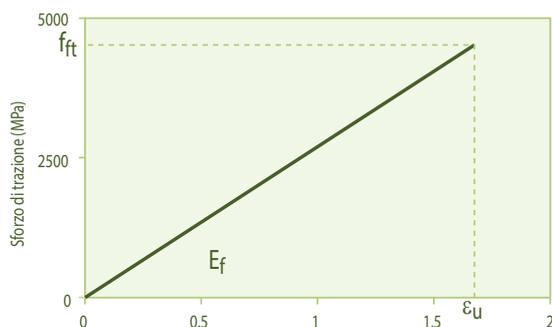


Fig. 25 - Tipico diagramma di allungamento in funzione dello sforzo di trazione

mente definito dai seguenti parametri:

- resistenza meccanica a trazione (f_{ft}), definita come l'ordinata dell'estremo superiore del segmento di retta che individua il comportamento del tessuto;
- allungamento a rottura (ϵ_u), definita come l'ascissa dell'estremo superiore del segmento di retta che individua il comportamento del tessuto;
- modulo elastico a trazione (E_f), definito come la tangente dell'angolo compreso tra suddetto segmento e l'asse delle deformazioni.

4.2.2 Applicazione dei tessuti dell'FRP

La prima operazione da affrontare già in fase di progettazione del rinforzo, è la verifica della consistenza del supporto su cui si deve effettuare l'applicazione dei tessuti. Occorre considerare, infatti, che gli sforzi di trazione portati dal rinforzo vengono trasferiti alla struttura rinforzata attraverso sforzi di taglio trasmessi dalla resina utilizzata per l'incollaggio alla superficie in calcestruzzo. Se quest'ultima non è in grado di sopportare suddetti sforzi di taglio, si verificheranno collassi per peeling termine Inglese per indicare il distacco del copriferro.

Nel caso in cui la superficie su cui applicare i rinforzi sia giudicata meccanicamente idonea a trasmettere gli sforzi, la preparazione del sottofondo consisterà semplicemente nella rimozione di eventuali oli, grassi, sporco e sostanze incoerenti depositate sulla superficie mediante sabbiatura o idropulizia.

Spesso l'elemento strutturale che deve essere rinforzato presenta un certo degrado superficiale con corrosione delle armature metalliche e conseguente distacco del copriferro in calcestruzzo come è mostrato nella Figura che segue:



Fig. 26 - Struttura da rinforzare che presenta un grave degrado per corrosione delle armature metalliche

In questi casi, ma anche quando in assenza di degrado visibile si ha ragione di ritenere che la qualità del conglomerato sia scadente, è tassativo procedere, prima dell'applicazione del rinforzo, ad una vera e propria bonifica del manufatto da rinforzare attraverso le seguenti operazioni:

- scarifica di tutte le parti incoerenti o degradate del supporto fino a mettere a nudo le armature corrose e, quindi, per almeno un centimetro oltre il lembo interno delle stesse;
- pulizia di tutte le armature metalliche, mediante sabbiatura, da eventuali tracce di ruggine fino a riportare a nudo l'acciaio non corroso;
- ripristino della sezione con malta tixotropica di resistenza meccanica adeguata e modulo elastico compatibile con quello del vecchio calcestruzzo.

Nelle Figure che seguono sono mostrate le tre operazioni sopra illustrate di scarifica, di sabbiatura e di ripristino con malta tixotropica:



Fig. 27 - Scarifica del calcestruzzo degradato con completa messa a nudo dei ferri in fase di corrosione



Fig. 28 - Armature metalliche dopo le operazioni di sabbiatura



Fig. 29 - Sezione della struttura in calcestruzzo ripristinata con malta tixotropica

In ogni caso si procederà, poi, alla "smussatura" di tutti gli spigoli vivi in corrispondenza dei quali si intende esegui-

re un risvolto del tessuto. Questa operazione ha lo scopo di evitare l'innescio di tensioni concentrate nel tessuto che ne provocherebbero il prematuro tranciamento.

4.2.2.2 Posa in opera dei tessuti in FRP

Eseguita la preparazione del sottofondo si passa all'applicazione dei tessuti. Questa può essere eseguita secondo due metodologie: A) il "dry lay up", adatto soprattutto a piccoli lavori, e B) il "wet lay up" più idoneo all'esecuzione di lavori su grandi superfici.

A) Dry lay up. Questa tecnologia applicativa deve il suo nome ad un omonimo metodo di produzione manuale di manufatti in vetroresina da cui, sostanzialmente, deriva. Essa consiste nelle seguenti fasi:

1. si applica un *primer epossidico* molto fluido (generalmente a solvente) che ha il compito di penetrare nel supporto cementizio creando le migliori condizioni per l'adesione come è illustrato nella Figura che segue:



Fig. 30 - Applicazione del primer epossidico fluido

2. se il sottofondo è particolarmente irregolare, si provvede ad applicare una malta epossidica con spatola metallica come è mostrato nella Figura che segue:



Fig. 31 - Applicazione a spatola della resina epossidica in pasta

3. si applica il primo strato di tessuto avendo cura di allineare perfettamente le fibre nella direzione voluta come è mostrato nella Figura 32;
4. si impregna il tessuto mediante una resina epossidica fluida applicata con rullo o pennello come è mostrato nella Figura 33;
5. si perfeziona l'applicazione del tessuto con una o più passate di un rullo di gomma rigida e di uno speciale rullo



Fig. 32 - Stesura a secco del tessuto da impregnare

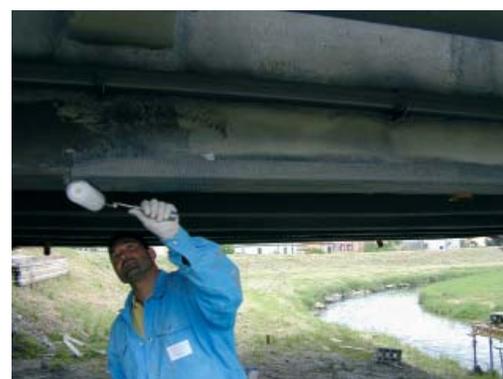


Fig. 33 - Impregnazione del tessuto con resina epossidica stesa a rullo

metallico al fine di rimuovere eventuali bolle d'aria o di solvente evaporato;

6. si procede, se necessario, ad applicare ulteriori strati di tessuto ripetendo le operazioni da 3 a 5.

B) Wet lay up. Questa tecnica applicativa si differenzia dalla precedente nei punti 3 e 4 nei quali si procede come segue:

3. immediatamente dopo aver applicato la malta epossidica, si impregna il tessuto, preventivamente tagliato nella misura desiderata, immergendolo direttamente in una vaschetta contenente la resina epossidica fluida; tolto il tessuto dalla vaschetta, lo si lascia sgocciolare e, premendo tra le mani protette da guanti impermeabili di gomma, si rimuove la resina in eccesso ed eventuali bolle di aria o di solvente evaporato; questa operazione di "strizzatura" può essere effettuata più rapidamente ed efficacemente utilizzando una semplice macchina a rulli per strizzare la biancheria;
4. infine, si procede all'applicazione del tessuto alla struttura avendo cura di orientare bene le fibre nella direzione voluta.

I passi successivi e la reiterazione di questi sono analoghi a quelli descritti nel metodo precedente.

A polimerizzazione avvenuta (dopo almeno 48 ore dall'applicazione del rinforzo) è bene, in entrambi i metodi applicativi, proteggere il rinforzo dai raggi ultravioletti con

una verniciatura opaca di tipo acrilico come quella mostrata nella Figura 34:



Fig. 34 - Protezione finale dei rinforzi in FRP dai raggi ultravioletti con un rivestimento flessibile in polimerocemento

Se, in alternativa, si prevede una finitura con un prodotto a base cementizia è bene che, all'atto di applicazione dell'ultimo strato di tessuto, si provveda a seminare sulla superficie di resina ancora fresca, un po' di sabbia fine per irruvidirne la superficie stessa e rendere più facile l'adesione del rivestimento protettivo.

4.3 I manufatti pultrusi per l'FRP

I pultrusi sono manufatti in polimero fibrorinforzato che vengono prodotti industrialmente attraverso un processo completamente automatizzato chiamato pultrusione. Il nome deriva dal termine Inglese pultrusion il quale, a sua volta, nasce dalla contrazione di due parole: *pull* (tirare) ed *extrusion* (estrusione). La tecnologia, infatti, prevede la produzione di manufatti in composito attraverso un processo di estrusione, analogo a quello utilizzato nel settore dei laterizi, nel quale le fibre continue vengono sottoposte ad una sollecitazione di trazione che ha il compito di garantirne un perfetto allineamento prima della polimerizzazione della matrice.

Un tipico impianto per la produzione di manufatti pultrusi comprende:

- 1) una stazione di svolgimento dalle bobine di fibra continua;
- 2) un sistema di allineamento delle fibre;
- 3) una vasca per l'impregnazione in resina delle fibre;
- 4) una stazione di formatura e stagionatura dove viene rimossa la resina in eccesso e viene eseguita una stagionatura accelerata a caldo o a microonde per consentirne la rapida polimerizzazione;
- 5) un sistema di cingoli o ganasce che servono ad esercitare la forza di trazione e a consentire l'avanzamento del prodotto;
- 6) una stazione di taglio del prodotto finito nella lunghezza voluta.

La Figura 35 riassume schematicamente il processo produttivo dei materiali pultrusi sopra illustrato:

Il processo di pultrusione consente la produzione di manufatti caratterizzati da un uniforme allineamento delle fibre e da un contenuto di rinforzo (espresso come percentuale di volume di fibre rispetto al volume totale) elevatissimo e non raggiungibile con nessun'altra tecnologia. Normalmente un manufatto pultruso ha un tasso di rinforzo variabile tra il 50% e il 60% che è circa il doppio di quello che si può conseguire con tecniche di layout manuale. Inoltre, la percentuale di rinforzo e, quindi, le prestazioni finali del composito, sono controllabili con estrema precisione.

Il limite della pultrusione sta nella possibilità di realizzare esclusivamente manufatti a sezione costante e con fibre tutte orientate in un'unica direzione. Pertanto, con questa tecnologia, vengono prodotti esclusivamente lamine, profilati e barre di varia sezione.

Nel settore delle nuove costruzioni i manufatti pultrusi, soprattutto in vetroresina, stanno trovando applicazioni nella realizzazione di opere di finitura come infissi (in sostituzione dell'acciaio e dell'alluminio) o pannelli leggeri autoportanti per il tamponamento di opere prefabbricate. Poche sono, invece, sempre con riferimento alle nuove costruzioni, le ap-

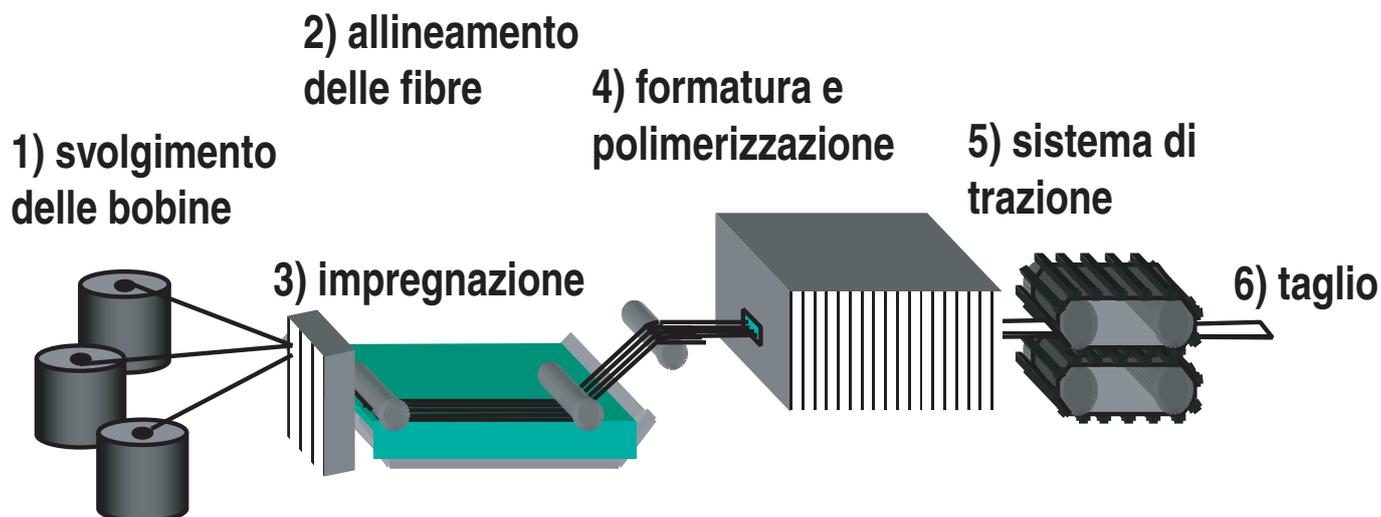


Fig. 35 - Schematizzazione di un impianto di produzione di materiali pultrusi

plicazioni di manufatti pultrusi in ambito strutturale e si limitano, soprattutto, ad alcuni tentativi effettuati di sostituire i tradizionali profilati in acciaio per carpenteria metallica con analoghi elementi in *FRP* pultrusi. Sono intuitibili i vantaggi che conseguirebbero, in termini di leggerezza e, quindi, di facilità di posa in opera, da questa sostituzione; esistono, però, problemi irrisolti legati, soprattutto, alla fragilità dei sistemi di connessione tra vari elementi. Inoltre, nel settore delle nuove costruzioni, i manufatti compositi pultrusi presentano un limite dovuto al loro costo che risulta ancora eccessivo rispetto ai sistemi costruttivi tradizionali. Esistono, infine, in commercio barre cilindriche pultruse in fibra di vetro o carbonio da utilizzare in sostituzione delle tradizionali armature in acciaio nella realizzazione di strutture in C.A. esposte ad ambienti particolarmente aggressivi per le armature stesse (strutture portuali o in adiacenza al mare, ponti stradali in zone montane in cui si fa uso corrente di sali disgelanti). Il limite di applicazione, in questo caso, sta nel fatto che le barre in *FRP* non possono essere lavorate, così come si fa con le barre metalliche, per ottenere staffe o pezzi sagomati. Questi pezzi speciali, infatti, possono essere ottenuti solo per stampaggio in appositi impianti con evidente complicazione e limitazione nelle forme e nelle dimensioni ottenibili.

Più frequente è l'utilizzo dei manufatti pultrusi nel restauro strutturale dove gli innegabili vantaggi che si possono conseguire rispetto a tecniche tradizionali di intervento e la grande facilità di posa in opera compensano quasi sempre l'elevato costo di questi materiali rendendone economicamente conveniente l'utilizzo. Negli interventi di restauro, i manufatti pultrusi vengono utilizzati soprattutto in forma di lamine e, meno spesso, in forma di barre. Lamine pultruse in fibra di carbonio vengono ormai correntemente utilizzate per il rinforzo a flessione di travi e solai in sostituzione delle

lastre metalliche che venivano utilizzate nella tecnica nota come *béton plaqué*. Le lamine vengono incollate all'elemento da rinforzare mediante resine epossidiche in pasta la cui viscosità è generalmente sufficiente a tenerle in posizione, anche se applicate all'*estradosso*, senza bisogno di inserire puntelli e sostegni così come, invece, risulta necessario se si fa uso di piastre metalliche.

Rispetto all'utilizzo di tessuti direttamente impregnati in opera l'applicazione di lamine pultruse presenta dei vantaggi in termini di facilità e rapidità di posa in opera e di sicurezza della riuscita dell'intervento. La loro relativa rigidità, però, ne limita le possibilità di utilizzo a superfici piane o caratterizzate da grande raggio di curvatura (serbatoi e volte a botte di grandi dimensioni).

4.3.1 Il rinforzo delle strutture mediante incollaggio di lamine pultruse

Anche nel caso di rinforzo per incollaggio di lamine pultruse occorre eseguire preventivamente una preparazione o, se necessario, una bonifica del sottofondo in calcestruzzo. Successivamente, si procede come segue:

1. stendere uno strato di resina in pasta per uno strato di 1-2 mm di spessore;
2. applicare un equivalente strato di adesivo sull'apposito lato ruvido della lamina;
3. applicare il rinforzo alla struttura esercitando una pressione uniforme con le mani o, preferibilmente, con un rullo di plastica dura;
4. rimuovere la resina in eccesso.

Dopo circa 24 ore, normalmente, si può procedere all'applicazione di un rivestimento protettivo nei confronti dei raggi ultravioletti.

Prof. Riccardo Sersale

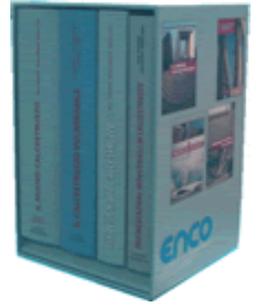


Il 6 Aprile, nella sua casa di Napoli, si è spento il Prof. Riccardo Sersale, Professore Emerito di Scienza e Tecnologia dei Materiali dell'Università Federico II di Napoli.

Molti di noi lo ricorderanno, con affetto e commozione, per la tenacia e la grande passione per lo studio che l'hanno tenuto attivo e lucido fino agli ultimi giorni.

Il 14 aprile avrebbe compiuto 92 anni.

ENCO Quiz



Cinque risposte per vincere un cofanetto di libri Enco

Per partecipare al concorso Enco Quiz occorre rispondere alle cinque domande ed inviare le risposte al fax 0422 96 32 37 oppure per email a info@encosrl.it

Sulla risposta ritenuta corretta va apposta una croce. Per ogni risposta corretta saranno assegnati 4 punti; per ogni risposta errata saranno tolti 2 punti; per ogni risposta non data saranno assegnati zero punti. A parità di punteggio, vincerà chi invierà le risposte per primo.

Domanda 1 - Tra due calcestruzzi con diametro massimo (D_{max}) di 12 e 38 mm quale possiede un maggior volume di aria intrappolata dopo completa compattazione?

A - Calcestruzzo con $D_{max} = 12$ mm

B - Calcestruzzo con $D_{max} = 38$ mm

C - Il volume è uguale nei due calcestruzzi



Domanda 2 - A parità di tutti gli altri parametri (tipo e classe di cemento, classe di consistenza, ecc.) quale è il calcestruzzo con la R_{ck} maggiore se la classe di esposizione è XS₄ o XF₄?

A - $R_{ckXS_4} > R_{ckXF_4}$

B - $R_{ckXF_4} > R_{ckXS_4}$

C - $R_{ckXS_4} = R_{ckXF_4}$



Domanda 3 - A parità di classe di esposizione e di resistenza quale cemento (tra CEM II B/LL 32,5 R e CEM II A/LL 42,5 R) richiede un maggior rapporto acqua/cemento (a/c)?

A - CEM II B/LL 32,5 R

B - CEM II A/LL 42,5 R

C - Nessuno dei due



Domanda 4 - Per confezionare un calcestruzzo a ritiro compensato quale di questi additivi è preferibile impiegare accanto ad un agente espansivo a base di CaO?

A - Aerante

B - Idrofobizzante

C - SRA



Domanda 5 - Per confezionare un SCC quale additivo occorre impiegare se si vuole ridurre il filler senza aumentare il dosaggio di cemento?

A - Fluidificante

B - Superfluidificante

C - Viscosizzante

LA QUALITA' FIORISCE ANCHE NEL PICCOLO CANTIERE EDILE



Enrico Genova¹, Salvatore Lo Presti², Angelo Mulone³,

¹Neulaureato Ingegneria Palermo - ²Università di Palermo - Facoltà Ingegneria - ³Geolab Srl

PREMESSA

Marco Vitruvio Pollione (I secolo a.c.) è stato un architetto e scrittore romano; fu il più famoso teorico dell'architettura di tutti i tempi con il suo trattato "*de architectura*". Vitruvio esortava i costruttori del suo tempo, che avessero voluto realizzare edifici di qualità, a seguire la sua triade: "*venustas, utilitas, firmitas*". Già quindi in epoca romana il concetto di "*qualità*" era presente anche nel mondo dell'edilizia; tuttavia oggi per ottenere la qualità nelle costruzioni edili non possiamo più accontentarci della triade vitruviana, essenzialmente rivolta all'arte del costruire bene; oggi per ottenere la qualità in edilizia è necessario affiancare alla vitruviana una nuova triade, quella della: "*durabilità, sostenibilità, fattibilità*"; tre concetti che implicano la scelta dei materiali più idonei a soddisfare le esigenze dell'utenza. Questo criterio vale anche e soprattutto per il mondo del calcestruzzo dove il progettista deve saper scegliere quello più idoneo, quello cioè che sia in possesso delle "*proprietà*" necessarie per poter realizzare gli elementi costruttivi le cui "*prestazioni*" corrispondano al miglior grado di soddisfacimento delle "*esigenze*" dell'utenza espresse in "*requisiti*". Quindi, secondo questo criterio, non esiste la qualità in senso assoluto e può dunque essere definito di qualità anche un calcestruzzo con alto rapporto a/c, e quindi dotato di scarsa resistenza meccanica, se è confezionato per realizzare una sottofondazione (il cosiddetto magrone). La qualità dunque può svincolarsi dal maggior costo; per tornare all'esempio di prima, una sottofondazione realizzata con un calcestruzzo molto resistente, e quindi più caro, non può essere definita di maggiore qualità rispetto all'analogo ma di resistenza meccanica minore poiché l'utenza non richiede al "*magrone*" prestazioni meccaniche significative. Oggi si parla di calcestruzzi "*high tech*", molto costosi, che sono pensati per realizzare elementi costruttivi atti a fornire elevate prestazioni ma poco diffusi proprio per gli elevati costi che occorre affrontare. La volontà di attingere alla qualità quindi spesso cozza contro il muro dei maggiori costi che ne scoraggiano l'adozione.

Con questa ricerca si è voluto sfatare l'assioma "*maggiore qualità = maggiore costo*" dimostrando che è possibile ottenere un calcestruzzo di grandi proprietà meccaniche e con costi contenuti impiegando maestranze e strumentazioni presenti in ogni piccolo e comunissimo cantiere edile.

L'ingrediente che è necessario aggiungere nel calderone perché si possa ottenere il prodotto di qualità è la "*conoscenza*", senza la quale nessuno obiettivo può essere tragguardato. Nel caso in questione la conoscenza è patrimonio degli esperti tecnologici che operano nel campo dei conglomerati cementizi

che si sono formati e continuano a formarsi attraverso Corsi di Formazione tenuti da docenti di altissimo livello; con riconoscenza citiamo il prezioso impegno del Prof. Mario Collepari che da innumerevoli anni ha forgiato generazioni di esperti e ci piace ricordare anche la figura professionale del "Tecnologo del Calcestruzzo" che scaturisce dai Corsi Nazionali tenuti dall'Associazione ASCI di Palermo. La qualità dunque può essere ottenuta anche operando con pochi mezzi in un piccolo cantiere se ci si avvale della professionalità di tecnici specializzati.

L'ulteriore impegno del gruppo sarà la prosecuzione della ricerca al fine di indagare su altri aspetti, legati alle proprietà del materiale calcestruzzo, che possano condurre alla produzione di manufatti di qualità che, a causa dell'elevato costo, oggi sono poco impiegati.

1. CENNI SUI CALCESTRUZZI AD ELEVATE PRESTAZIONI MECCANICHE

I calcestruzzi ad alte prestazioni meccaniche sono indicati frequentemente come *High Strength Concretes* (HSCs) o *High Performance Concretes* (HPCs); la seconda espressione ha un significato più ampio e indica, seguendola letteralmente, i calcestruzzi le cui prestazioni, sviluppate per particolari applicazioni e per specifici contesti ambientali, non possono ottenersi con i materiali e le composizioni ordinari, talvolta neanche con le normali tecniche di maturazione. In effetti l'espressione *High Performance Concrete* fu adoperata per la prima volta da Mehta e Aïtcin in riferimento a calcestruzzi contraddistinti da significative prestazioni in termini di lavorabilità, resistenza meccanica e durabilità [8]. Spesso tuttavia alle prestazioni meccaniche si assegna un'importanza preponderante. Le Linee guida sui calcestruzzi strutturali ad alta resistenza elaborate dal Servizio Tecnico Centrale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici [3] distinguono i calcestruzzi ad alte prestazioni da quelli ad alta resistenza sulla base del rapporto acqua/cemento (inferiore a 0,45 nei primi e a 0,35 nei secondi) e della resistenza caratteristica cubica a compressione (compresa fra 55 e 75 N/mm² nei primi, fra 75 e 115 N/mm² nei secondi). Secondo Collepari et al. [2] i calcestruzzi ad alte prestazioni meccaniche si caratterizzano per una resistenza meccanica a compressione compresa in genere nell'intervallo fra 60 e 100 N/mm², per conseguire la quale si adoperano: additivi super-riduttori d'acqua (che consentono di contenere il rapporto acqua/cemento entro valori di 0,30÷0,40); aggiunte minerali ad alta attività pozzolanica e/o area superficiale specifica (come il fumo di

silice, la loppa d'altoforno, ma anche [1] metacaolino, cenere di pula di riso e *filler* calcareo); aggregati di frantumazione (basalto, granito) che hanno un'elevata resistenza meccanica e assicurano un'ottima adesione all'interfaccia tra elemento lapideo e matrice cementizia.

L'impiego di questi componenti ha effetti significativi anche sulla lavorabilità, sulla stabilità dimensionale e sulla durabilità del calcestruzzo.

La definizione di "calcestruzzi ad alta resistenza" è comunque strettamente legata all'epoca di produzione: [5] negli anni Cinquanta negli Stati Uniti tali erano considerati calcestruzzi con una resistenza a compressione di 35 N/mm², mentre già negli anni Sessanta erano comunemente in commercio conglomerati che raggiungevano circa 45 N/mm². A partire dal decennio successivo alcuni edifici furono costruiti impiegando calcestruzzi con resistenze prossime ai 70 N/mm²; attualmente sono facilmente disponibili per edifici multipiano conglomerati con resistenze superiori a 75 N/mm².

Adirittura il calcestruzzo a polvere reattiva (*Reactive Powder Concrete*, RPC, sviluppato in Francia da D. Richard e M. H. Cheyrezy nel 1995) può raggiungere in base alla tecnica di maturazione resistenza meccanica a compressione di 200 N/mm² e 800 N/mm².

Le Linee guida del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici [3] indicano che è attualmente possibile raggiungere resistenze a compressione fra 130 e 140 N/mm² senza ricorrere ad aggregati particolari, alla costipazione ad alta pressione o a processi speciali di stagionatura ad alta temperatura. Anche Collepardi et al. [2] sottolineano come sia possibile raggiungere resistenze superiori a 120 N/mm², attraverso un'estrema densificazione della matrice cementizia ottenuta con dosaggi molto elevati di fumo di silice (anche sopra il 30 % rispetto al peso del cemento) e di superfluidificante (6 % sul legante), con rapporti acqua/cemento inferiori a 0,20, ritenendo però necessario sostituire alla miscelazione comunemente adoperata l'utilizzo di premiscelatori.

L'elevata resistenza meccanica degli HSC è quindi dovuta, oltre che al basso rapporto acqua/cemento, all'impiego di alcuni materiali ad elevata attività pozzolanica, in particolare il fumo di silice. Le sue particelle, di dimensioni estremamente ridotte (fra cinquanta e cento volte più piccole di quelle del cemento, essendo il loro diametro compreso fra 0,01 e 1 µm), occupano gli interstizi tra i granuli di cemento, rendendo la struttura più densa, a beneficio della resistenza meccanica e della permeabilità. Proprio per sottolineare lo spiccato addensamento microstrutturale H. H. Bache (1981) ha coniato per i calcestruzzi con fumo di silice la definizione *Densified with Small Particles* (DSP) [2]. Nel confezionamento di malte e calcestruzzi, infatti, il fumo di silice è stato adoperato solo a partire dagli anni Settanta, grazie allo sviluppo dei superfluidificanti. Questi, adoperati con un dosaggio elevato (2 ÷ 4 % sul cemento), diminuiscono notevolmente la richiesta d'acqua mentre parallelamente il fumo di silice ne riduce l'essudazione (*bleeding*) al di sotto degli aggregati lapidei di dimensione maggiore.

Gli effetti dell'impiego di fumo di silice e superfluidificanti sulla zona di transizione sono significativi anche perché questa è la zona più debole del calcestruzzo, quella in cui cominciano a formarsi le fratture. Il notevole miglioramento delle sue caratteristiche meccaniche potrebbe però far sì che la rottura del materiale si inneschi negli aggregati.

Sono quindi necessari aggregati densi e compatti, con tessitura superficiale ruvida, che favorisca la massima adesione tra i componenti in corrispondenza della zona di transizione, e con prestazioni meccaniche superiori a quelle delle comuni rocce calcaree.

2. OBIETTIVI E METODO DI RICERCA

Già da diversi anni è possibile realizzare conglomerati cementizi che superano facilmente, anche in modo sensibile, resistenze meccaniche a compressione di 120 N/mm² dopo ventotto giorni di maturazione, e numerose sono in proposito le miscele riportate in letteratura. Al di là di condizioni particolari di maturazione come quelle ad alta temperatura o in autoclave, in generale il confezionamento di queste miscele resta comunque più complesso rispetto a quello dei calcestruzzi ordinari; ad esempio contenuti molto elevati di fumo di silice rendono necessario l'impiego di un premiscelatore [2].

Il presente studio [6] mira a determinare la composizione di un calcestruzzo che garantisca prestazioni meccaniche quanto più possibile elevate e sia al contempo confezionato con comune attrezzatura da cantiere; infatti anche a livello normativo è accettato che le prestazioni del calcestruzzo gettato in opera siano inferiori a quelle dei provini destinati ai laboratori, che possono essere confezionati e fatti maturare in condizioni ottimali; tuttavia ancora oggi ciò viene spesso addotto a giustificazione del mancato raggiungimento da parte delle opere realizzate in cantiere delle prestazioni previste in sede progettuale. Lo studio si propone dunque di dimostrare come anche un requisito "complesso" quale quello dell'elevata resistenza meccanica a compressione possa essere soddisfatto con le attrezzature più comuni se si impronta il processo esecutivo al principio della qualità, ormai imprescindibile anche per il settore edilizio.

Il contenuto di cemento e di fumo di silice (adoperato come aggiunta minerale) nonché la natura dell'aggregato, il suo diametro massimo e l'assortimento granulometrico, sono stati stabiliti tenendo conto delle indicazioni rintracciate in letteratura e delle "Linee guida sui calcestruzzi strutturali ad alta resistenza" elaborate dal Servizio Tecnico Centrale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici [3]. Sperimentalmente si è determinato il minimo rapporto acqua/cemento conseguibile con i materiali e gli strumenti adoperati, attraverso variazioni del contenuto d'acqua della miscela e del dosaggio di additivo superfluidificante; queste modifiche sono state apportate rispettando la condizione che il conglomerato confezionato ricada in classe di consistenza S5, in modo da favorire l'espulsione dell'aria intrappolata, evitando al contempo fenomeni di segregazione.

Per ciascuna miscela è stata quindi eseguita la prova di abbassamento (*slump test*) con il cono di Abrams e si è misurato lo spandimento; inoltre sono stati confezionati quattordici provini cubici di spigolo lungo 10 cm, dei quali quattro sottoposti a prova di rottura a compressione dopo tre giorni di maturazione, quattro dopo sette giorni e i restanti sei dopo ventotto giorni; in questo modo è stato possibile rappresentare graficamente lo sviluppo nel tempo della resistenza a compressione del calcestruzzo.

Per le due miscele dalle quali era attesa, in base al rapporto acqua/cemento, la migliore resistenza a compressione sono stati confezionati anche due provini prismatici, delle dimensioni di 100 x 100 x 410 mm, sottoposti a prova dopo ventotto giorni di maturazione.

3. MATERIALI ADOPERATI

Per conseguire elevate prestazioni meccaniche è stato utilizzato un cemento bianco di tipo I (cemento Portland) di classe di resistenza 52,5 R (Italbiano). Come aggiunta minerale si è adoperato fumo di silice (BASF Meyco MS 610).



Fig. 1 - Aggregato grosso di granito



Fig. 2 - Sabbia di granito



Fig. 3 - Sabbia monogranulare puramente silicea

Sono stati impiegati un aggregato grosso e una sabbia di granito di frantumazione provenienti da cave della Sardegna, e una sabbia monogranulare puramente silicea. Come risultato delle analisi granulometriche degli aggregati (eseguite secondo le indicazioni della norma UNI 933-1:2012 [9]) le dimensioni attraverso le quali sono stati caratterizzati sono $d/D = 4/11,2$ (mm) per l'aggregato grosso, $d/D = 2/4$ (mm) per la sabbia di

granito (modulo di finezza $M_f = 5,17$), $d/D = 0,250/0,5$ (mm) per la sabbia monogranulare ($M_f = 2,15$). L'aggregato grosso ha quindi un diametro massimo piccolo rispetto a quello comunemente adoperato nei calcestruzzi ordinari. Questa scelta è legata alla necessità di ridurre la frequenza di fratture negli aggregati e soprattutto di migliorare le caratteristiche della zona di transizione; lo scadimento delle sue proprietà meccaniche rispetto al resto della matrice cementizia è connesso infatti all'accumulo di acqua essudata sotto i granuli di maggiori dimensioni, accumulo che determina un locale innalzamento del rapporto fra acqua e cemento e quindi una maggiore porosità. Le due sabbie invece sono pressoché prive della frazione passante al vaglio di 0,250 mm, evitando così un contenuto di particelle molto fini che sarebbe eccessivo, dato l'elevato tenore di cemento e fumo di silice.

La massa volumica dei granuli in condizione di saturazione a superficie asciutta e l'assorbimento d'acqua [10] sono rispettivamente $2,62 \text{ kg/dm}^3$ e $0,66 \%$ per l'aggregato grosso di granito, $2,61 \text{ kg/dm}^3$ e $0,72 \%$ per la sabbia di granito, $2,65 \text{ kg/dm}^3$ e $1,2 \%$ per la sabbia monogranulare.

Per rendere proficuo l'impiego del fumo di silice, che ha una superficie specifica estremamente elevata e determina quindi un sensibile aumento della richiesta d'acqua, si è adoperato un additivo superfluidificante a base di polycarbossilati eteri (BASF Glenium Sky 529), con peso specifico di $1,073 \div 1,113 \text{ g/ml}$ a $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

4. PROGETTO DELLA MISCELA E METODO DI CONFEZIONAMENTO

Per consentire un'eliminazione quanto più possibile completa dell'aria in eccesso intrappolata nel calcestruzzo, si è condizionato il progetto della miscela all'ottenimento di un conglomerato rientrante nella classe di consistenza S5, ma con uno spandimento prossimo a quello minimo richiesto per un calcestruzzo autocompattante, ovvero 600 mm. Queste caratteristiche di lavorabilità richiedono una notevole quantità d'acqua (250 kg/m^3 in assenza di superfluidificante), anche a causa del basso valore del diametro massimo degli aggregati adoperati; di conseguenza per ottenere elevate prestazioni meccaniche è necessario anche un significativo contenuto di cemento. Questo è stato stabilito in 550 kg/m^3 , mentre l'aggiunta di fumo di silice in 50 kg/m^3 , pari al $9,1 \%$ del contenuto di cemento; la percentuale massima consigliata da alcune fonti di letteratura è l' 11% [4]. Il contenuto complessivo di leganti è dunque di 600 kg/m^3 , superiore al valore massimo (550 kg/m^3) indicato dalle Linee guida [3]. L'assortimento granulometrico degli aggregati è stato definito con programmi di ottimizzazione del misto basati sul Fuller modificato; si è così stabilito che il 36% del volume di aggregati sia costituito dal granito grosso, il 33% dalla sabbia di granito e il 31% dalla sabbia monogranulare.

Nel corso della sperimentazione sono state definite sei miscele variando il contenuto d'acqua e il dosaggio di additivo superfluidificante in modo da ridurre il più possibile il rapporto acqua/cemento nel rispetto dei requisiti di lavorabilità. Le miscele sono state confezionate adoperando una betoniera a bicchiere del volume di 190 l e con una velocità di rotazione di ventidue giri al minuto. Dopo l'inserimento degli aggregati la betoniera è stata fatta girare per cinque minuti; è stata mantenuta in azione per un ugual tempo dopo l'aggiunta del cemento e del fumo di silice, dopo l'inserimento di quattro quinti dell'ac-

qua di miscela e dopo l'introduzione dell'additivo. Aggiunta la parte restante dell'acqua è stata mantenuta in funzione per dieci minuti in modo da garantire un'adeguata miscelazione del conglomerato.

I provini sono stati confezionati adoperando cubiere in PVC delle dimensioni di 10x10x10 cm; queste sono state riempite di calcestruzzo sino a un terzo dell'altezza e compattate su un tavolo vibrante; si è proceduto analogamente dopo aver colmato ciascuno dei due terzi restanti. Eliminato l'eventuale materiale in eccesso, i provini, protetti da un telo in polietilene, sono stati fatti maturare in condizioni controllate di umidità e temperatura (U.R. 95 %, 20 ± 2 °C) per ventiquattro ore, trascorse le quali sono stati estratti dalle cubiere e posti in vasca di maturazione.

5. DETERMINAZIONE DEL MINIMO RAPPORTO ACQUA/CEMENTO E PRESTAZIONI MECCANICHE

La prima miscela (M1) è stata confezionata con un contenuto d'acqua di 180 kg/m^3 e una quantità d'additivo pari all'1,8% del peso del cemento. Il rapporto acqua/legante (cemento e fumo di silice) è dunque 0,3; quello con il solo cemento è 0,33. È stato misurato uno spandimento di 70 cm, tuttavia il materiale ha mostrato un'evidente tendenza alla segregazione. Di conseguenza è stata confezionata una seconda miscela (M2) riducendo il contenuto d'acqua a 175 kg/m^3 ($a/c = 0,31$) e mantenendo costante il dosaggio di additivo; ciò ha consentito di ridurre notevolmente il fenomeno della segregazione, seppur persistente.

Avendo confezionato agevolmente un calcestruzzo contenente 175 kg/m^3 d'acqua con un dosaggio di additivo superfluidificante inferiore rispetto a quelli indicati in letteratura (spesso sensibilmente superiori al 2,0%), si è progettata una terza miscela (M3) con un contenuto d'acqua di 150 kg/m^3 e un dosaggio di additivo pari al 2,0%. Tuttavia durante il mescolamento in betoniera il materiale si è raggrumato in granuli di diametro variabile fra pochi millimetri e circa 5 cm, rivestiti esternamente di particelle fini superficialmente asciutte. L'aggiunta di 10 kg/m^3 d'acqua (per un contenuto complessivo di 160 kg/m^3 e un rapporto a/c pari a 0,29) ha consentito di rendere la miscela sufficientemente fluida. Si è misurato uno spandimento di 50 cm.

Per verificare se fosse possibile mantenere invariato il contenuto d'acqua aumentando quello d'additivo, è stata confezionata una miscela (M4) con 150 kg/m^3 di acqua e il 2,5% di superfluidificante. Ciò nonostante il materiale si è nuovamente raggrumato in granuli, non ricoperti però di particelle fini asciutte. L'aggiunta d'acqua, ancora una volta nella misura di 10 kg/m^3 , ha provocato una forte tendenza alla segregazione del calcestruzzo, per il quale è stato misurato uno spandimento di $70 \div 73$ cm; inoltre ha ritardato notevolmente la presa e l'indurimento del conglomerato, al punto da rendere possibile l'estrazione dalle cubiere solo dopo tre giorni di maturazione.

Anche il dosaggio di additivo del 2,0 % sul peso del cemento, per un contenuto d'acqua di 160 kg/m^3 , è in realtà eccessivo. La miscela M3 non ha mostrato tendenza alla segregazione probabilmente perché l'insufficiente contenuto d'acqua previsto in origine (150 kg/m^3) ha in parte inibito l'azione del superfluidificante. Si è infatti constatato su una miscela di prova che anche un dosaggio dell'1,8 % determina, in presenza di 160 kg/m^3 d'acqua, la tendenza del conglomerato alla segregazione.

Da ciò si è dedotto che il contenuto d'acqua, necessaria-

MISCELA 1	
Granito 4/11,2	557 kg/m ³
Granito 2/4	505 kg/m ³
Sabbia 0,250/0,5	498 kg/m ³
Cem I 52,5 R	550 kg/m ³
Additivo superfluidificante (1,8 %)	9,9 l
Acqua	180 kg/m ³
Fumo di silice	50 kg/m ³

MISCELA 2	
Granito 4/11,2	559 kg/m ³
Granito 2/4	511 kg/m ³
Sabbia 0,250/0,5	501 kg/m ³
Cem I 52,5 R	550 kg/m ³
Additivo superfluidificante (1,8 %)	9,9 l
Acqua	175 kg/m ³
Fumo di silice	50 kg/m ³

MISCELA 3	
Granito 4/11,2	585 kg/m ³
Granito 2/4	534 kg/m ³
Sabbia 0,250/0,5	523 kg/m ³
Cem I 52,5 R	550 kg/m ³
Additivo superfluidificante (2,0 %)	11,0 l
Acqua	160 kg/m ³
Fumo di silice	50 kg/m ³

MISCELA 4	
Granito 4/11,2	583 kg/m ³
Granito 2/4	532 kg/m ³
Sabbia 0,250/0,5	521 kg/m ³
Cem I 52,5 R	550 kg/m ³
Additivo superfluidificante (2,5 %)	13,8 l
Acqua	160 kg/m ³
Fumo di silice	50 kg/m ³

MISCELA 5	
Granito 4/11,2	585 kg/m ³
Granito 2/4	534 kg/m ³
Sabbia 0,250/0,5	523 kg/m ³
Cem I 52,5 R	550 kg/m ³
Additivo superfluidificante (1,8 %)	9,9 l
Acqua	153 kg/m ³
Fumo di silice	50 kg/m ³

MISCELA 6	
Granito 4/11,2	585 kg/m ³
Granito 2/4	534 kg/m ³
Sabbia 0,250/0,5	523 kg/m ³
Cem I 52,5 R	550 kg/m ³
Additivo superfluidificante (1,7 %)	9,4 l
Acqua	153 kg/m ³
Fumo di silice	50 kg/m ³



Fig. 4 - Miscela M6: dopo aver aggiunto ai componenti secchi 150 kg/m^3 d'acqua e l'intero additivo (1,7 %) la miscela si raggruma in granuli di dimensioni variabili da pochi millimetri a 5 cm, rivestiti esternamente di particelle fini non idratate.



Fig. 5 - Miscela M6: aggiunta la parte restante d'acqua (3 kg/m^3) i granuli in cui il calcestruzzo è raggrumato appaiono bagnati in superficie, e cominciano ad aderire l'un l'altro.



Fig. 6 - Miscela M6: le fasi di arresto della betoniera favoriscono l'adesione dei granuli l'uno all'altro e ne facilitano quindi la rottura nelle successive fasi di azione.



Fig. 7 - Miscela M6: dopo due arresti nell'azione della betoniera per far aderire i granuli e facilitarne la rottura, un ultimo mescolamento della durata di dieci minuti consente di ottenere un impasto omogeneo.



Fig. 8 - Prova di abbassamento con il cono di Abrams della miscela M6: lo spandimento è risultato pari a 60 cm e la miscela non ha mostrato alcuna tendenza alla segregazione.

mente superiore a 150 kg/m^3 , può tuttavia essere inferiore a 160 kg/m^3 . Dunque è stata confezionata una quinta miscela (M5) in cui, adoperati inizialmente 150 kg/m^3 d'acqua e l'1,8% di additivo, il materiale si è nuovamente raggrumato in granuli rivestiti di particelle fini superficialmente non idratate. Aggiun-

ta la parte restante d'acqua, ovvero 3 kg/m^3 (per una quantità complessiva di 153 kg/m^3 e un rapporto acqua/cemento pari a 0,28), la betoniera è stata fatta ruotare per cinque minuti e poi arrestata per due, durante i quali i granuli, non più rivestiti di particelle fini, hanno cominciato ad aderire l'uno all'altro; ciò ne ha favorito la rottura una volta riavviata la betoniera. Ripetuta questa procedura una seconda volta, si è ottenuto un impasto omogeneo, che è stato mescolato per altri dieci minuti prima di confezionare i provini. Si è misurato uno spandimento di $63 \div 66 \text{ cm}$.

Poiché anche in questo caso si è evidenziata la tendenza, seppur lieve, alla segregazione, si è definita un'ultima miscela (M6) in cui il contenuto d'additivo è stato ridotto dall'1,8% all'1,7% sul peso del cemento. Il calcestruzzo, confezionato secondo lo stesso procedimento della miscela M5, ha mostrato uno spandimento di 60 cm senza alcuna tendenza a segregare.

La resistenza a compressione dei provini è stata determinata, secondo le indicazioni della norma UNI EN 12390-3:2009 [11], adoperando una pressa idraulica Controls C50/C (3.000 kN). I risultati evidenziano, ovviamente, che i calcestruzzi di maggiore resistenza sono quelli con il rapporto acqua/cemento più basso (0,28). Le miscele M1 ed M2 sviluppano quasi interamente la propria resistenza entro i primi sette giorni di maturazione, mentre è più pronunciato l'incremento sino a ventotto giorni per le altre miscele. La M4, a causa dell'eccessivo contenuto di additivo superfluidificante, è caratterizzata da una maggior dispersione dei risultati e da una resistenza a sette giorni sensibilmente inferiore rispetto agli altri conglomerati, come prevedibile dato il notevole ritardo riscontrato nell'indurimento. Il massimo valore medio di resistenza a compressione è quello relativo alla miscela M6, pari a $101,5 \text{ N/mm}^2$. Molto simili ad esso sono il valore relativo alla miscela M5 ($100,1 \text{ N/mm}^2$), che differisce dalla prima soltanto per il contenuto di

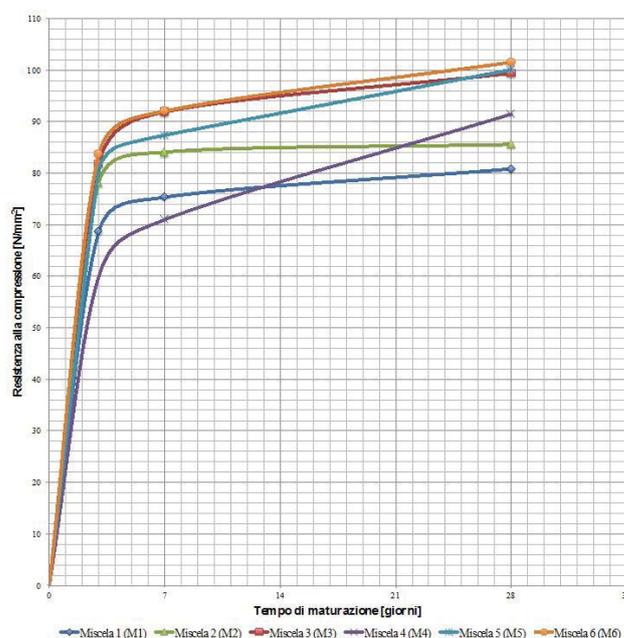


Fig. 9 - Comparazione fra gli andamenti nel tempo della resistenza a compressione delle sei miscele confezionate.

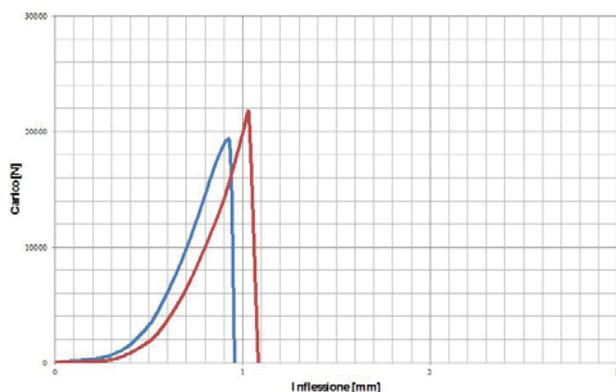


Fig. 10 - Miscela M5: diagrammi carico - inflessione dei prismi (100 x 100 x 400 mm) sottoposti a prova dopo ventotto giorni di maturazione. Il carico massimo è 19.137 N per il primo (blu) e 21.654 N per il secondo (rosso). Le resistenze a flessione sono rispettivamente 5,7 N/mm² e 6,5 N/mm².

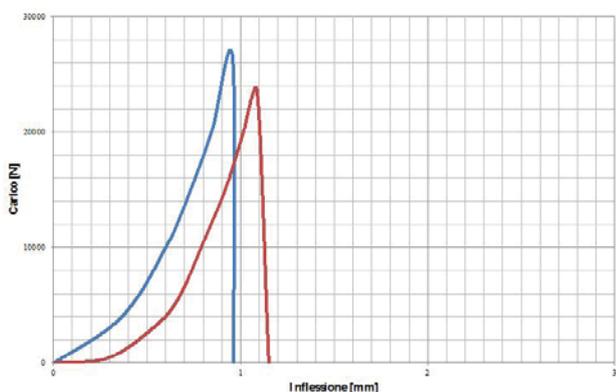


Fig. 11 - Miscela M6: diagrammi carico - inflessione dei prismi (100 x 100 x 400 mm) sottoposti a prova dopo ventotto giorni di maturazione. Il carico massimo è di 26.388 N per il primo (blu) e 23.496 N per il secondo (rosso). Le resistenze a flessione sono rispettivamente 7,9 N/mm² e 7,0 N/mm².

superfluidificante, e quello della miscela M3.

Per le M5 e M6, dalle quali era attesa la maggior resistenza a compressione in virtù del rapporto acqua/cemento, sono stati confezionati due provini prismatici (100 x 100 x 400 mm), sottoposti dopo ventotto giorni di maturazione a prova di flessione con carico a due punti secondo la norma UNI EN 12390-5 [12]. Per la miscela M5 sono stati riscontrati i valori di resistenza a flessione di 5,7 N/mm² e 6,5 N/mm², con un valore medio di 6,1 N/mm²; per la miscela M6 7,9 N/mm² e 7,0 N/mm², con un valore medio di 7,5 N/mm².

6. CONCLUSIONI

La sperimentazione condotta dimostra la possibilità di confezionare un calcestruzzo ad elevate prestazioni meccaniche in cantiere adoperando una comune betoniera a bicchiere. Impiegando aggregati di buone caratteristiche meccaniche (sab-

bia puramente silicea e granito), cemento di tipo Portland di classe 52,5 R e fumo di silice, variando il contenuto d'acqua e il dosaggio di additivo superfluidificante è stata definita la composizione di una miscela di rapporto acqua/cemento pari a 0,28, che ha raggiunto dopo ventotto giorni di maturazione una resistenza media a compressione di 101,5 N/mm². La miscela ha mostrato uno spandimento di 60 cm senza fenomeni di segregazione, riducendo notevolmente i rischi d'intrappolamento d'aria in eccesso e di formazione di vespai che possono essere dovuti a un'insufficiente compattazione o a difficoltà d'esecuzione del getto (ad esempio nelle strutture molto armate). Pertanto, nonostante le limitazioni tecnologiche e i problemi operativi che possono presentarsi in cantiere e che determinano una riduzione delle prestazioni in opera rispetto a quelle potenziali del calcestruzzo, tuttavia le richieste di capitolato, solitamente meno gravose di quelle ipotizzate, possono essere soddisfatte anche con le attrezzature più comuni. A tal fine è fondamentale non solo seguire le buone pratiche per la posa in opera del calcestruzzo, ma improntare al principio della qualità anche il progetto della miscela.

Tuttavia è bene precisare che la sperimentazione ha considerato le caratteristiche meccaniche e reologiche di un calcestruzzo ad alte prestazioni ottenibile anche con comuni attrezzature di cantiere; non ha preso in esame i risvolti tecnologici di un prodotto così particolare, e comunque destinato ad impieghi specifici, che necessita di adeguate condizioni di protezione in opera durante la stagionatura, dato l'eccessivo gradiente termico derivante dall'alto tenore di cemento e aggiunte.

Gli autori del presente lavoro ritengono doveroso rivolgere un sincero ringraziamento a tutta la struttura del laboratorio Geolab s.r.l. di Carini (PA); a tutti gli addetti va la nostra gratitudine per l'ampia disponibilità mostrata sia in merito al proprio impegno personale sia in merito all'utilizzo delle apparecchiature messe a disposizione.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Aitcin, P.C. The durability characteristics of high performance concrete: a review. *Cement and Concrete Composites*, 25 (2003): 409-420.
- [2] Collepardi, M., Collepardi, S. e Troli, R. Il nuovo calcestruzzo, quinta edizione, Edizioni Tintoretto, 2009.
- [3] Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici - Servizio Tecnico Centrale. Linee guida su Calcestruzzi strutturali ad alta resistenza ($75 \text{ N/mm}^2 < R_{ck} \leq 115 \text{ N/mm}^2$).
- [4] Coppola, L. *Concretum*, McGraw-Hill, Milano, 2007.
- [5] Coppola, L. Calcestruzzo ad alta resistenza meccanica. Proprietà fisiche ed elasto-meccaniche. Normative. Realizzazioni strutturali. In: *Il Calcestruzzo alle soglie del 2000*. (2000). Bologna (Italia).
- [6] Genova, E. Calcestruzzi innovativi ad alta resistenza meccanica e fibrorinforzati. Sperimentazioni di laboratorio. Tesi di laurea in Ingegneria Edile-Architettura, Università degli studi di Palermo, a.a. 2010-2011.

➔ SISTEMI

REFOR-tec[®]
Reactive Forces Technologies

Award of Excellence

Presented to

TECNOCHEM ITALIANA SPA

in recognition of the

Structural Restoration of "Domenico Cotugno" Hospital in Bari - Italy

SEISMIC RETROFITTING OF FLOORS WITH LOW THICKNESS

U.H.P.F.R.C.C. MICROCONCRETE

Recognized for Excellence in the Special Projects Category

November 8th, 2012



INTERNATIONAL
CONCRETE REPAIR
INSTITUTE

La Giuria Internazionale dell' ICRI
International Concrete Repair Institute

Illinois - USA

assegna -per l'anno 2012- a

TECNOCHEM ITALIANA S.p.A.

il **1° Premio** nella **Categoria**
"Special Projects"

per il **RINFORZO STRUTTURALE**
con **ADEGUAMENTO SISMICO**
dell' **Ospedale Domenico Cotugno**
di Bari

U.H.P.F.R.C.C.

Ultra High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites

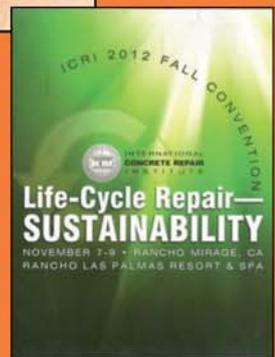
REFOR-tec[®] **GF5/ST-HS**

TECNOCHEM **TECNO ECO**
ITALIANA SPA **LOGICHEM**

Via Sorte 2/4 - 24030 Barzana (BG) Italy - Tel. +39 035 554811 - Fax +39 035 554816

info@tecnochem.it - www.tecnochem.it

La Premiazione è
avvenuta in
occasione del
"ICRI 2012 FALL
CONVENTION"
nell'universale tema
della **SOSTENIBILITÀ**



Ospedale Cotugno di Bari dopo il restauro



*Ospedale Cotugno di Bari
prima del restauro*



technology

