

MATERIALI E TECNOLOGIE PER IL RESTAURO DELLE OPERE IN CALCESTRUZZO

MARIO COLLEPARDI (*), LUIGI COPPOLA (**), CARLO PISTOLESI (***)
(* Dipartimento di Scienze dei Materiali e della Terra, Università di Ancona.
(**) ENCO, Engineering Concrete, Spresiano (TV).
(***) MAPEI, Milano.

ABSTRACT

Two different types of materials may be used to repair deteriorated concrete structures: cementitious or polymeric materials. Cement-based grout or mortars are in general recommended to repair thick layer of concrete structures (1-10 cm), whereas polymeric materials are in general used in form of thin coating (1-2 mm) to protect concrete structures against very aggressive environmental attacks.

1. INTRODUZIONE

La scelta dei materiali più idonei da impiegare per il restauro di opere in calcestruzzo degradate dipende fortemente dalle considerazioni emerse nella diagnosi del degrado di una determinata struttura e, quindi, dalle cause che l'hanno provocato (attacco solfatico, gelo-disgelo, fessure di origine termica, ecc.). I materiali da impiegare, quindi, debbono essere 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. Una prima distinzione netta tra i materiali da impiegare nel restauro può essere fatta tra:

- materiali a base cementizia;
- materiali a base polimerica (resine epossidiche, poliuretaniche, ecc.).

La scelta dei materiali per il restauro, inoltre, deve tener conto anche della tecnica esecutiva che si intende adottare per l'intervento di ripristino.

2. I PRODOTTI A BASE CEMENTIZIA

Per quanto concerne i prodotti a base cementizia, un primo criterio da adottare per la scelta dei materiali da restauro va ricercato tra le raccomandazioni fornite dalle normative nazionali ed europee [1, 2] sulla progettazione di un calcestruzzo durabile. Così, per esempio, se il degrado diagnosticato si basa sull'attacco dei solfati è evidente che il materiale da impiegare nel restauro deve essere capace di resistere a questo specifico tipo di attacco.

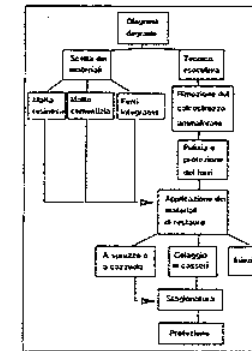


Fig. 1 - Schematizzazione del processo di restauro per la scelta dei materiali e della tecnica esecutiva.

Accanto a questo criterio di carattere generale, il materiale impiegato nel restauro deve aggiuntivamente presentare un'ottima aderenza al calcestruzzo originale: i materiali per il restauro a base cementizia, infatti, presentano l'inconveniente del ritiro igrometrico a causa del quale essi subiscono una contrazione differenziale rispetto al calcestruzzo originale, nel quale il ritiro si è ormai quasi completamente esplicito. Da ciò deriva l'esigenza, per i prodotti a base cementizia da impiegare nel restauro, di compensare il ritiro attraverso l'impiego di agenti espansivi.

Sulla base di queste considerazioni le malte e i calcestruzzi da impiegare nel restauro sono caratterizzati in generale dai seguenti parametri composizionali:

- impiego di superfluidificanti per abbassare il rapporto a/c ed ottenere quindi un calcestruzzo impermeabile;
- impiego di fumo di silice per migliorare ulteriormente la resistenza agli attacchi chimici (cloruri, solfati, alcali);
- impiego di agenti espansivi per compensare il ritiro ed evitare il distacco.

In aggiunta a queste materie prime, quasi sempre presenti in tutti i prodotti cementizi per il restauro, possono essere adottati altri particolari accorgimenti composizionali per soddisfare le specifiche esigenze prestazionali:

- impiego di cementi Portland a basso tenore di C_3A per resistere ai solfati;
- impiego di cementi d'altoforno per resistere all'attacco dei cloruri;
- impiego di fibre polimeriche per contrastare gli effetti fessurativi del ritiro plastico;
- impiego di fibre metalliche per migliorare la duttilità e la resistenza agli urti;
- impiego di agenti aeranti per contrastare gli effetti dei cicli di gelo-disgelo.

In genere i materiali da restauro a base cementizia sono prodotti industrialmente sulla base di controlli composizionali e prestazionali. Esiste una vasta gamma di questi prodotti in funzione anche delle particolari tecniche applicative (Fig. 1):

- per colaggio di betoncini entro casseri se si tratta di riparare spessori relativamente elevati (> 5 cm);
- a spruzzo (o a cazzuola) se si tratta di riparare, con malte, superfici di grande estensione e di piccolo spessore (< 5 cm);
- per iniezioni di boiacche cementizie se si tratta di consolidare strutture in calcestruzzo difettose per vespaie interne o macrofessure (> 1 mm).

Le principali caratteristiche (non necessariamente tutte) da valutare nella scelta delle malte e dei calcestruzzi impiegati nel restauro sono:

- la consistenza delle malte o calcestruzzi freschi variabile entro valori che dipendono dall'applicazione: da uno spandimento alla tavola a scosse (secondo UNI 7044) di 80-90% per le malte da applicare a spruzzo fino ad uno spandimento di 150-200% per malte autolivellanti; per i calcestruzzi, generalmente impiegati per colaggio entro casseri, si richiede uno *slump* di 22-26 cm;
- l'assenza di *bleeding* (da valutare secondo UNI 8998) indipendentemente dalla consistenza;
- la resistenza meccanica a compressione generalmente compresa tra 60 e 100 MPa;
- la resistenza meccanica a flessione generalmente compresa tra 8 e 10 MPa;
- il modulo elastico variabile da 25000-30000 MPa per le malte e 35000-40000 MPa per i calcestruzzi;
- l'impermeabilità valutata attraverso la penetrazione all'acqua sotto pressione (da 1 a 7 bar) (secondo la norma DIN 1048 o ISO 7031) che deve essere minore di 20 mm [1, 2];
- la resistenza agli attacchi chimici provocati dal solfato, dal cloruro, dagli alcali e dall'anidride carbonica aggressiva;
- la compensazione del ritiro attraverso un'espansione contrastata (secondo le norme UNI 8147 e 8148) superiore a 300 $\mu\text{m}/\text{m}$ per le malte e 200 $\mu\text{m}/\text{m}$ per i calcestruzzi;
- l'assenza di fessure da ritiro plastico (grazie alla presenza di fibre polimeriche) per le malte da applicare a spruzzo;
- la duttilità, da valutare attraverso la curva carico-deflessione (secondo ASTM C-1018), su provini di malta o calcestruzzo rinforzati con fibre metalliche;
- la resistenza agli urti da valutare con la prova di caduta da 460 mm di una sfera di acciaio (massa di 4.5 Kg) secondo ACI Committee 544;
- la resistenza all'abrasione da valutare mediante riduzione dello spessore di una lastra sottoposta ad usura standardizzata (abrasimetro di Amstler o di Taber);
- la resistenza alla formazione del ghiaccio (grazie alla presenza di agenti aeranti) nei materiali destinati al restauro di opere esposte ai cicli di gelo-disgelo (UNI 7087).

Nel caso di boiacche cementizie, da impiegare per l'iniezione ed il consolidamento di strutture macroporose o fessurate, le principali caratteristiche prestazionali, in alternativa alle prime due sopra riportate ed in aggiunta a tutte le altre, sono:

- la fluidità da valutare mediante lo svuotamento del cono di Marsh (meno di 20-30 s), per favorire l'impregnazione consolidante;
- l'assenza di *bleeding* per evitare vuoti interni laddove si raccoglie l'acqua essudata.

Val la pena di precisare che, allo stato attuale, non esistono normative per tutti i requisiti composizionali e prestazionali dei prodotti cementizi da impiegare nel restauro. Esistono, però, molte norme nazionali (UNI) ed estere (ASTM) sui metodi di prova delle varie caratteristiche (impermeabilità, compensazione del ritiro, resistenza ai cicli di gelo e disgelo, resistenza meccanica, ecc.) che un prodotto cementizio destinato al restauro dovrebbe possedere. In sostanza, stabilito attraverso la diagnosi il tipo di degrado delle strutture in calcestruzzo danneggiate, l'utente dovrebbe orientarsi, nella scelta del materiale più idoneo, verso quei prodotti per i quali esiste una consolidata documentazione di prove sperimentali eseguite secondo metodi "normati" oppure, ancorché non normati, descritti in dettaglio.

Se, per esempio, in un pavimento industriale la diagnosi ha evidenziato che il degrado è dovuto a cause meccaniche ed in particolare a carichi dinamici ed urti, la scelta del materiale per il restauro dovrà essere orientata ovviamente verso quei prodotti capaci di resistere a questo tipo di sollecitazione: tra i vari materiali candidati all'impiego dovranno essere scartati non solo i prodotti manifestamente inidonei, ma anche quei prodotti che - pur presentati nella loro letteratura tecnica come adatti allo scopo specifico - non presentino una quantificazione delle prestazioni richieste (per esempio resistenza agli urti e duttilità nella prova di sforzo-deformazione). Dopo questo *screening* iniziale, per eliminare i prodotti inidonei o non accompagnati da documentazione di dati, i rimanenti prodotti candidati all'impiego verranno esaminati per valutare sperimentalmente sia le caratteristiche di carattere generale (favorabilità, resistenza meccanica, compensazione del ritiro, impermeabilità), sia quelle in relazione all'impiego specifico (resistenza agli urti e curva di carico-deflessione).

3. APPLICAZIONE DEI PRODOTTI A BASE CEMENTIZIA

Come è illustrato in Fig. 1, tre sono le possibili tecniche applicative: a spruzzo o cazzuola, per colaggio e per iniezione. In ogni caso prima dell'applicazione è necessario preparare la struttura da consolidare (saturare il sottofondo, pulire i ferri, ecc.). Nei paragrafi che seguono sono descritte le modalità operative per i tre specifici interventi.

3.1 Intervento a spruzzo o a cazzuola

L'intervento è destinato all'applicazione di malte espansive a consistenza plastica per riparare grandi estensioni superficiali (pareti, volte, soffitti) mediante l'applicazione di una malta di spessore relativamente ridotto (in genere da 2 a 4 cm).

L'intervento comprende: la preparazione del sottofondo, la produzione della malta, l'applicazione della malta e la stagionatura del rivestimento.

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

- rimuovere, mediante scarificazione meccanica o idrodemolizione, il materiale ammalorato fino ad arrivare ad un calcestruzzo meccanicamente resistente e irruvidito: lo spessore di calcestruzzo rimosso deve essere almeno eguale a quello che, in base alle indagini diagnostiche, 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 ed applicare una rete elettrosaldata o nuovi ferri di armatura eventualmente previsti dal progetto di restauro; la rete elettrosaldata (per spessori di malta fino a 25 mm) 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 maggiori di 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 utilizzare 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 di spessore non superiore a 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;
- saturare di umidità il sottofondo bagnando con acqua a pressione 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.

Per la produzione della malta è opportuno miscelare gli ingredienti in betoniera seguendo le istruzioni del produttore per quanto concerne la quantità di acqua da impiegare e le modalità operative.

Nel caso di climi caldi ($> 35^{\circ}\text{C}$) si raccomanda di immagazzinare i prodotti occorrenti alla preparazione della malta in luoghi protetti dalla diretta insolazione, ed in quelli freddi ($< 10^{\circ}\text{C}$) in ambienti chiusi al riparo dalle intemperie. Questa precauzione evita fenomeni di presa rapida o lenta della malta. Per lo stesso motivo è consigliabile l'impiego di acqua raffreddata ($0-10^{\circ}\text{C}$) o riscaldata ($40-60^{\circ}\text{C}$) rispettivamente nei periodi di clima caldo o freddo.

L'applicazione può essere eseguita a cazzuola o, più produttivamente ed efficacemente a spruzzo con macchina intonacatrice. Immediatamente 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 (con frattazzo di legno, di ferro o di spugna sintetica) può essere eseguita in un tempo successivo (circa 30-60 min) quando, appoggiando la mano sulla superficie, le dita non affondano ma lasciano solo una 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.

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 ($> 30^{\circ}\text{C}$), asciutti ($\text{UR} < 70\%$) e ventilati (velocità del vento $> 10 \text{ Km/ora}$). In alternativa, subito dopo la finitura le superfici possono essere trattate con agente stagionante per creare una

pellicola anti-evaporante: questa operazione è sconsigliata se si debbono applicare ulteriori rivestimenti protettivi o vernici, a meno che non si provveda successivamente a rimuovere la pellicola mediante spazzolatura.

3.2 Intervento per colaggio

L'intervento è destinato all'applicazione di malte o calcestruzzi espansivi 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 (paragrafo 3.1), si fa preferire per spessori relativamente elevati (> 50 mm) che consentano un facile riempimento del prodotto. In questo caso l'intervento comprende la preparazione del sottofondo, la cassetatura, la produzione della malta o del calcestruzzo, l'applicazione della malta o del calcestruzzo e la stagionatura.

Per la preparazione del sottofondo valgono le stesse raccomandazioni già descritte nel paragrafo 3.1 con la variante che non è prevista la rete elettrosaldata ma solo eventuali ferri integrativi di quelli già esistenti.

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.

Relativamente alla produzione della malta o del calcestruzzo valgono le stesse raccomandazioni già descritte nel paragrafo 3.1 con la variante che la consistenza della malta o del calcestruzzo deve essere superfluida per rendere agevole l'applicazione per colaggio.

La malta o il calcestruzzo autolivellante deve essere colato in modo da favorire lo spostamento dell'aria pre-esistente nelle zone cassetate da riempire. Ove possibile, è consigliabile gettare o pompare l'impasto fluido da un solo lato favorendone la fuoriuscita 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 e facilitare l'espulsione dell'eventuale aria residua, mentre è sconsigliabile ricorrere a vibratori ad ago o a parete.

Per la stagionatura, in aggiunta alle raccomandazioni già descritte nel paragrafo 3.1., che valgono anche per i getti colati su superfici orizzontali non cassetate (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).

3.3 Intervento per iniezione

Nel caso 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 boiacche cementizie.

In genere, nel caso di fessure, è preferibile un consolidamento con liquidi polimerizzabili (paragrafo 4) 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 alla 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 cemento e l'acqua in un miscelatore ad alta turbolenza o con trapano munito di frusta fino ad ottenere un impasto fluido come olio (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); raggiunte 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 simmetricamente nell'iniezione per non creare squilibri nella struttura.

4 I PRODOTTI A BASE POLIMERICA

I materiali polimerici [3] sono costituiti da molecole di prodotti organici collegati tra loro fino a formare una catena lineare più o meno ramificata o anche una struttura reticolata tridimensionale. Il processo di collegamento tra le singole molecole (A) fino a formare il polimero (A_n) prende il nome di polimerizzazione, mentre il prodotto di partenza costituito dalle singole molecole è denominato monomero.

Il numero (n) di molecole contenute in un polimero prende il nome di grado di polimerizzazione. Maggiore è n , maggiore è la consistenza del polimero. In genere, il monomero è un gas o un liquido, mentre il polimero è un liquido molto viscoso o più frequentemente un solido. In sostanza, il processo di polimerizzazione comporta sempre una transizione dallo stato gassoso a quello liquido, o da quest'ultimo a quello solido.

Esistono vari tipi di polimeri e 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. In Tabella 1 sono mostrati i prodotti a base polimerica più importanti per il settore delle costruzioni.

Il monomero liquido può essere applicato sulla superficie di una muratura in calcestruzzo o in mattoni per dar luogo, a polimerizzazione terminata, ad un film solido, più o meno impermeabile ed aderente al supporto. E' questo il caso di un rivestimento pellicolare applicato sulla superficie del materiale da proteggere. Se il liquido monomero è caricato con materiale in polvere o granulare si può ottenere una pasta o una malta da applicare come intonaco a spessore centimetrico. Se la carica è costituita da aggregati più grossi di 5 mm si ottiene un vero e proprio calcestruzzo polimerico.

Se il liquido è relativamente poco viscoso esso può essere iniettato all'interno di un solido poroso e, a polimerizzazione terminata, il solido risulta più o meno consolidato a seconda del riempimento dei micropori e delle macrocavità con il liquido monomero. In genere, il riempimento dei micropori con un liquido monomero risulta più efficace che non con una sospensione acquosa cementizia a causa dell'impedimento delle particelle di cemento ad attraversare ed a impregnare pori di dimensione minore della dimensione delle particelle di cemento (1-100 μ m).

Tabella 1 - 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 (impregnazione solo nel pic)
silani	monocomponente	impregnazione parziale

Un risultato migliore, ancorchè inferiore a quello conseguibile con l'impregnazione di liquidi organici monomerici, può essere ottenuto mediante l'iniezione di micro-cemento (1-100 µm) in sospensione acquosa [4]. Tuttavia, per il riempimento delle macrocavità di una costruzione difettosa le "boiacche" cementizie si presentano più vantaggiose che non i liquidi monomerici per il minor costo ed il minor calore sviluppato: infatti, il calore che si libera durante il processo di polimerizzazione è così elevato che può arrivare a riscaldare la massa iniettata anche per alcune centinaia di °C; il fenomeno è tanto più accentuato quanto più grande è il rapporto volume/superficie della 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.

Infine, è degna di menzione l'applicazione forse più efficace dei polimeri che consiste nel far aderire due superfici anche di materiale diverso (legno, ceramica, metallo, malta, ecc.) in modo da realizzare una giunzione delle due strutture.

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 (*beton plaqué*), sfruttando la grande capacità di adesione del polimero tanto all'acciaio quanto al calcestruzzo. Uno degli appunti più critici che viene sollevato per questa tecnica riguarda la 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.

Tutte le applicazioni sopra descritte riguardano per lo più polimeri il cui processo di polimerizzazione avviene solo *in situ*. Si tratta, in genere, di due componenti monomerici A e B, entrambi liquidi finché sono conservati separatamente. Allorchando sono mescolati insieme, con o senza cariche aggiuntive, reagiscono per produrre, attraverso il processo di copolimerizzazione, un solido *dopo* la loro applicazione sul o dentro il materiale da costruzione. Rientrano in questa categoria le resine epossidiche e quelle poliuretatiche, entrambe basate sull'impiego di due componenti.

Oltre ai processi di polimerizzazione *in situ* di sistemi bi-componenti (resine epossidiche e poliuretatiche) o mono-componenti (stirolo, metilmetacrilato) esistono, però, anche delle applicazioni nelle quali la trasformazione del monomero in polimero è già stato realizzato *prima* dell'applicazione sul o dentro il materiale da costruzione. Rientrano in questa categoria i poliacrilati e le resine viniliche. In questo caso il polimero è stato ottenuto in un impianto chimico di polimerizzazione e viene applicato o disciolto in un solvente organico (resine viniliche) o emulsionato in acqua (lattici poliacrilici). Il prodotto viene quindi applicato su una superficie per ottenere dopo l'evaporazione del solvente o dell'acqua, un rivestimento filmogeno. In questo caso, ovviamente durante l'applicazione non avviene polimerizzazione, ma soltanto un essiccamento del polimero disciolto o emulsionato per evaporazione del solvente.

Questo tipo di applicazione, basata dall'impiego di un polimero solido già formato e disciolto o emulsionato in un solvente che funge da veicolo liquido, non può ovviamente essere utilizzata in quei restauri nei quali l'evaporazione del solvente risulta impedita o comunque ostacolata. Ciò si verifica per esempio nel consolidamento per impregnazione, o per sigillatura di lesioni, o per giunzione di due strutture, dove l'evaporazione del solvente non può avvenire o risulta comunque fortemente rallentata; inoltre, quando anche la rimozione del solvente avvenisse, il polimero solido depositato non è in grado di assicurare il riempimento dei vuoti creati dall'evaporazione del solvente, a meno che il parziale riempimento dei vuoti non sia funzionale, in vista di uno specifico obiettivo, come si verifica per esempio nel caso di alcuni polimeri silanici.

Per questo motivo, i polimeri già formati e disciolti o emulsionati trovano applicazione, quasi esclusivamente, quali rivestimenti superficiali: in questo caso, dopo l'evaporazione del solvente (organico o acquoso) verso l'aria, si forma un sottile strato protettivo del polimero solido sulla superficie della struttura trattata. Un'altra applicazione dei polimeri già formati, dispersi in forma di emulsioni acquose (lattici), è quella di aggiungere questi prodotti ad un impasto fresco di malta o calcestruzzo per migliorarne l'adesione al supporto da riparare: la sottrazione del liquido acquoso, che funge da veicolo del lattice, è assicurata dalla reazione di idratazione del cemento ed il polimero che rimane inglobato nel conglomerato cementizio può così esplicare la sua funzione di migliorare l'adesione tra il supporto ed il nuovo strato di malta o calcestruzzo.

5 CONFRONTO PRESTAZIONALE TRA PRODOTTI CEMENTIZI E POLIMERICI

I prodotti a base polimerica hanno trovato largo impiego nel restauro delle opere in calcestruzzo. Essi presentano caratteristiche in genere complementari ai prodotti a base cementizia, e solo in qualche caso le due categorie di prodotti risultano competitive tra loro per la stessa applicazione (Tabella 2).

In linea di massima i prodotti cementizi (in forma di malte o betoncini) risultano più vantaggiosi, anche per essere più economici, rispetto a quelli polimerici nei lavori di restauro che coinvolgono spessori centimetrici finalizzati ad un consolidamento statico. Se, invece, il rivestimento è di spessore minore (0.1 - 2 mm) ed è finalizzato più ad una protezione superficiale impermeabilizzante e non ad un consolidamento statico, i prodotti polimerici sono prestazionalmente più vantaggiosi. Se, infine, l'intervento è di tipo impregnante - riempimento di cavità e fessure - la scelta tra i due prodotti è tecnicamente a vantaggio dei liquidi polimerici più facilmente iniettabili che non le sospensioni acquose di cemento. Tuttavia, laddove le cavità da riempire coinvolgono volumi relativamente elevati e siano di dimensioni relativamente grosse (> 1 mm) è possibile prendere in considerazione l'alternativa delle iniezioni cementizie soprattutto se a base di microcementi con granuli, cioè, prevalentemente inferiori a 10 µm [4].

Resta, infine, da segnalare l'applicazione congiunta di materiali cementizi, in forma di malte o betoncini, rivestiti superficialmente con uno strato sottile di prodotti polimerici, laddove l'ambiente - per esempio liquidi acidi in trattamenti industriali - risulti fortemente corrosivo nei confronti dei materiali a base di cemento. In questo caso il rivestimento, è costituito da uno spessore centimetrico di malta cementizia protetto superficialmente da uno strato pellicolare di polimero. Rientra in questa categoria di "intervento misto" (Tabella 2), il rivestimento di un conglomerato cementizio con uno spessore sottile (1-3 mm) di sospensione acqua-cemento-sabbia fine-poliacrilato sotto forma di vernice protettiva: questa sospensione, una volta indurita a seguito della reazione tra acqua e cemento assume delle caratteristiche elastiche - per la presenza del poliacrilato - tali da poter essere deformata anche del 100-200% prima di fessurarsi. 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.) e dovute alla sua intrinseca e caratteristica fragilità: la presenza della pellicola superficiale elastica in poliacrilato in corrispondenza delle sottostanti fessure, protegge i ferri di armatura dalla infiltrazione degli agenti aggressivi ambientali. Solitamente lo strato protettivo pellicolare viene prodotto mescolando, poco prima dell'applicazione, due componenti: uno in polvere (cemento + sabbia fine) e l'altro liquido (poliacrilato in acqua).

Qualunque sia l'applicazione del materiale (rivestimento, impregnazione, giunzione, ecc.) occorre comunque tener presente la caratteristica meno affidabile dei polimeri rispetto ai materiali cementizi: la resistenza alle alte temperature ed al fuoco in particolare. Da questo punto di vista, l'applicazione più esposta ai rischi di incendio - anche per il significativo contributo con cui il polimero è chiamato a collaborare nell'intervento di restauro - è certamente quello basato sulla giunzione di una lamiera metallica ad una struttura in calcestruzzo (*beton plaqué*).

Per quanto concerne le tecniche applicative dei prodotti polimerici, esse comprendono di solito l'applicazione a spruzzo, a pennello, o a rullo per i rivestimenti superficiali, e l'iniezione mediante compressori o siringhe nelle impregnazioni di cavità o fessure rispettivamente.

Tabella 2 - Campi applicativi nel restauro con materiali cementizi e polimerici.

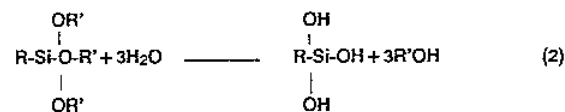
TIPO DI INTERVENTO:	SCOPO:
RIVESTIMENTI CENTIMETRICI: malte di cemento: 1-5 cm; betoncini di cemento: 5-10 cm	consolidamento
RIVESTIMENTI MILLIMETRICI: vernici a base di polimeri	impermeabilizzazione o protezione
RIEMPIMENTO DI PORI E CAVITÀ: iniezioni di vernici polimerizzabili (o iniezioni di microcementi per macrocavità)	consolidamento
SIGILLATURA DI FESSURE: iniezioni di liquidi polimerizzabili	consolidamento o protezione di ferri
GIUNZIONE DI SUPERFICI: adesivi a base di polimeri	placcatura
INTERVENTO MISTO: malte e calcestruzzi cementizi rivestiti da vernici polimeriche o miscele di acqua, cemento, sabbia e polimero	consolidamento e protezione da ambienti corrosivi o processi fessurativi

6 I rivestimenti protettivi con silani

I silani, o più esattamente gli alchilalossilani, sono prodotti liquidi che hanno la seguente formula:



dove R è un gruppo alchilico, ed OR' è un gruppo alcossilico. Il prodotto, così come si trova nel contenitore prima dell'uso, è rappresentato dalla formula (1) e costituisce il monomero. Il gruppo $\text{Si-O-R}'$ è suscettibile di idrolizzarsi, cioè di rompersi in presenza di umidità, e produrre R-Si(OH)_3 :



La reazione di idrolisi (2), 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 (H_2O). Dopo l'applicazione sulla superficie del manufatto da trattare, il prodotto liquido R-Si(OR)'_3 viene assorbito per reazione capillare dai pori presenti nel calcestruzzo collegati con la superficie esterna ed *in situ*; quindi, grazie all'umidità normalmente presente nel calcestruzzo, avviene la trasformazione di R-Si(OR)'_3 in R-Si(OH)_3 secondo la reazione (2).

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 dopo una pioggia - per evitare che l'assorbimento capillare del silano sia ostacolato dall'acqua stessa.

La reazione di idrolisi (2) è catalizzata da acidi o basi. Pertanto, nei pori del calcestruzzo, o anche delle malte a calce, avviene facilmente la suddetta reazione di idrolisi 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. Alla fine di questo trattamento la superficie esterna come anche la superficie dei pori entro i quali il silano è penetrato, risulta ricoperta da un film sottilissimo di polimero silanico che presenta il gruppo alchilico (R), fortemente idrofobo, rivolto verso l'esterno rispetto alla superficie trattata.

Per giudicare l'efficacia di un trattamento con silano si può adottare il seguente criterio: con i prodotti silanici disponibili, impiegati puri o diluiti con solventi organici facilmente evaporabili, la superficie del calcestruzzo può essere trattata con rullo o pennello fino a saturazione (la superficie trattata deve rimanere bagnata del prodotto silanico per qualche secondo prima di asciugarsi). Già dopo alcune ore si può evidenziare l'efficacia del trattamento spruzzando una parete verticale con acqua che scorrerà senza bagnare, o adagiando una goccia di acqua su una superficie orizzontale per evidenziare la quasi sfericità della goccia che permane sul materiale senza penetrare all'interno.

Una prova molto più significativa, per valutare comparativamente il trattamento con silano, può essere effettuata attraverso la misura dell'assorbimento di provini trattati (con resina epossidica o silano) e non, immersi in acqua (Fig. 2). Per confronto, una resina epossidica presenta una barriera contro l'assorbimento d'acqua ambientale da parte di una malta o di un calcestruzzo un po' più efficace del silano (Fig. 2) in conseguenza della completa ostruzione dei pori; tuttavia, poiché la resina epossidica sigilla i pori, impedisce lo svuotamento del vapore qualora questo provenga dall'umidità interna per risalita capillare nella struttura (Fig. 3).

L'applicazione del silano sulle strutture in calcestruzzo consente di proteggere il materiale dalla penetrazione dell'acqua e dagli agenti aggressivi in essa contenuti. Da questo punto di vista il silano può essere considerato più un prodotto per prevenire il degrado che non un materiale per il restauro, giacché non è in grado di consolidare una struttura attra-

verso il riempimento di pori, fessure o difetti in genere. La più importante caratteristica del silano - che rappresenta anche il suo maggior pregio - è quella di impedire l'ingresso di acqua liquida dall'esterno (per esempio la pioggia) verso l'interno di una struttura in calcestruzzo, e di consentire nel contempo la lenta fuoriuscita dell'umidità dall'interno verso l'ambiente grazie al passaggio delle molecole del vapore attraverso i pori sostanzialmente vuoti.

Tuttavia, proprio questa caratteristica di bloccare l'acqua liquida ma non le molecole di gas, rende i pori trattati con silano penetrabili dai gas come l'anidride carbonica, l'ossigeno e l'umidità dell'aria: pertanto, nel caso si voglia proteggere una struttura armata dalla corrosione dei ferri promossa dalla carbonatazione, un trattamento silanico deve essere seguito da un rivestimento (per esempio poliacrilato) capace di bloccare in superficie la penetrazione all'interno dei gas e dell'anidride carbonica in particolare.

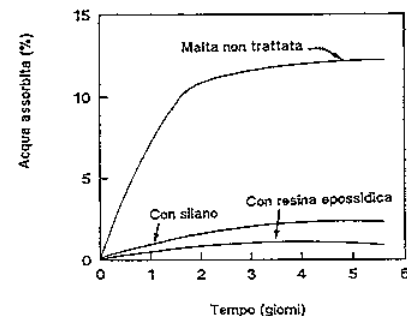


Fig. 2 - Assorbimento ed evaporazione d'acqua in funzione del tempo di provini immersi in acqua.

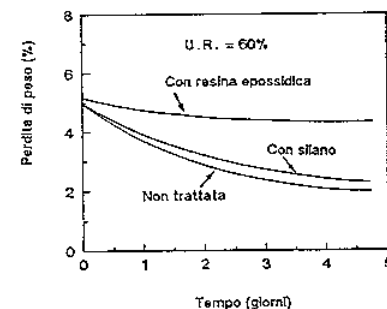


Fig. 3 - Perdita d'acqua per evaporazione in ambiente insaturo (U.R. = 60%) di provini di eguale umidità iniziale (5%) dopo trattamento o meno con silano.

BIBLIOGRAFIA

- [1] UNI 9858 - Calcestruzzo. Prestazioni, produzione, posa in opera e criteri di conformità.
- [2] ENV 206 - Concrete. Performance, production, placing and compliance criteria.
- [3] Encyclopedia of Polymer Science and Engineering, John Wiley & Sons, New York, (1980).
- [4] S. Zebowitz, R. J. Krizek, e D. K. Atmatzidis, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 15, pg. 1717-1733, (1989).