

**PROGRESSI NELLA TECNOLOGIA DELLE MALTE DA RESTAURO A RITIRO
COMPENSATO**

Mario COLLEPARDI - Saveria MONOSI
Dipartimento di Scienze dei Materiali e della Terra dell'Università di Ancona

Michele VALENTE
MAC-MBT, Treviso

PROGRESSI NELLA TECNOLOGIA DELLE MALTE DA RESTAURO A RITIRO COMPENSATO

Mario Collepari, Saveria Monosi

Dipartimento di Scienze dei Materiali e della Terra, Università di Ancona

Michele Valente

MAC-MBT, Treviso

SOMMARIO

Le malte a ritiro compensato per il restauro possono presentare due inconvenienti entrambi provocati dall'assenza di stagionatura umida da parte dell'impresa: fessure causate dal ritiro plastico e perdita parziale dell'espansione potenziale. Questi due inconvenienti possono essere rimossi usando fibre di plastica per rinforzare la matrice cementizia ed un agente di ritenzione d'acqua per conservare l'umidità all'interno della malta.

SUMMARY

The shrinkage compensating mortars for repairing works may present two drawbacks both caused by the absence of wet curing carried out by the contractor: cracks by plastic shrinkage and partial lost of potential expansion. These two drawbacks can be removed by using plastic fiber to reinforce the cement matrix and a water retention agent to keep the humidity into the mortar.

1. INTRODUZIONE

Nel restauro e nel consolidamento delle opere in c.a. e c.a.p. sono state impiegate soprattutto negli ultimi dieci anni, malte premiscelate a ritiro compensato.

Il principio della compensazione del ritiro consiste nell'impiego di un agente espansivo capace di provocare un fenomeno - l'espansione - di segno opposto a quello del ritiro che normalmente si verifica in tutti i conglomerati (malta e calcestruzzo) a base di cemento esposti in ambienti insaturi di umidità.

Nel seguito sono prima esaminati i meccanismi del ritiro provocato da variazioni igrometriche, e quindi vengono analizzati i progressi nella tecnologia delle malte a ritiro compensato, con particolare riferimento alla soluzione di alcuni problemi di applicazione pratica nel campo del restauro.

1.1 Il ritiro e la fessurazione

L'essiccazione del calcestruzzo e della malta provoca una contrazione denominata "ritiro plastico" se si verifica quando il conglomerato cementizio è ancora fresco e nella fase di presa (1), e "ritiro igrometrico" se si verifica quando il conglomerato è già indurito (2).

Mentre il ritiro plastico si verifica normalmente durante le prime ore dall'applicazione, il ritiro igrometrico si esplica per tutta la vita della struttura anche se, in effetti, la maggior parte di esso avviene fondamentalmente nei primi mesi.

Entrambi i fenomeni di ritiro, plastico e igrometrico, sono la causa più frequente delle fessurazioni che si manifestano nei calcestruzzi e nelle malte. Se, infatti, il ritiro risulta impedito dalla presenza di vincoli (per esempio: l'attrito tra una nuova malta di restauro ed il sottofondo ruvido di un vecchio calcestruzzo il cui ritiro si è già esaurito), ne consegue che si instaura una sollecitazione di trazione (σ_t) calcolabile con la nota equazione di Hooke:

$$\sigma_t = E \epsilon$$

dove E è il modulo elastico della malta ed ϵ è il ritiro della stessa malta che si manifesterebbe in assenza di vincoli.

Se la sollecitazione σ_t che così si genera supera la resistenza a trazione del materiale (R_t), ne consegue una fessurazione della malta (Fig. 1). Val la pena di precisare che, a parità di valore della contrazione, la sollecitazione indotta σ_t è tanto maggiore quanto più elevato il modulo elastico. Pertanto, a parità di contrazione ϵ , la sollecitazione che si genera nel ritiro plastico è molto minore di quella che si genera nel ritiro igrometrico quando il conglomerato è già indurito ed il modulo elastico è cresciuto. D'altra parte nel ritiro plastico, anche se le sollecitazioni indotte sono di modesta entità, la fessurazione può essere molto più intensa che nel ritiro igrometrico in quanto prima dell'indurimento la resistenza a trazione R_t con la quale il conglomerato si oppone alla sollecitazione σ_t è pressoché nulla.

1.2 Il ritiro plastico

Per la eliminazione del ritiro plastico, e delle sue conseguenti fessure che si manifestano di solito durante il primo giorno, è necessario rimuovere la causa che origina il ritiro stesso e cioè l'evaporazione dell'acqua. Il ritiro plastico, infatti non si manifesta nelle strutture protette dai casseri e nelle strutture mantenute umide durante le prime ventiquattro ore. In alternativa, si possono eliminare le fessure provocate dal ritiro plastico rinuncian-

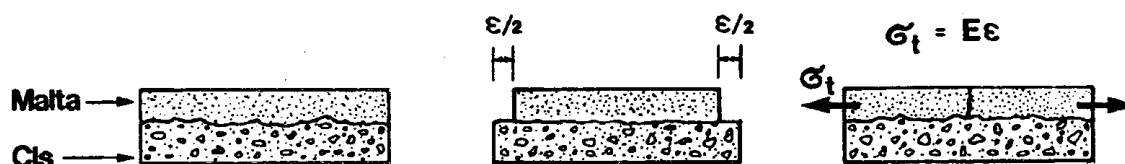


Fig. 1

Applicazione di malta fresca su calcestruzzo vecchio (A). La malta si accorcia di ϵ per effetto del ritiro se essa è in grado di muoversi rispetto al calcestruzzo in assenza di attrito all'interfaccia malta-calcestruzzo (B). La malta si fessura per effetto della sollecitazione di trazione σ_t (indotta dal ritiro impedito) qualora σ_t superi la resistenza R_t della malta stessa (C).

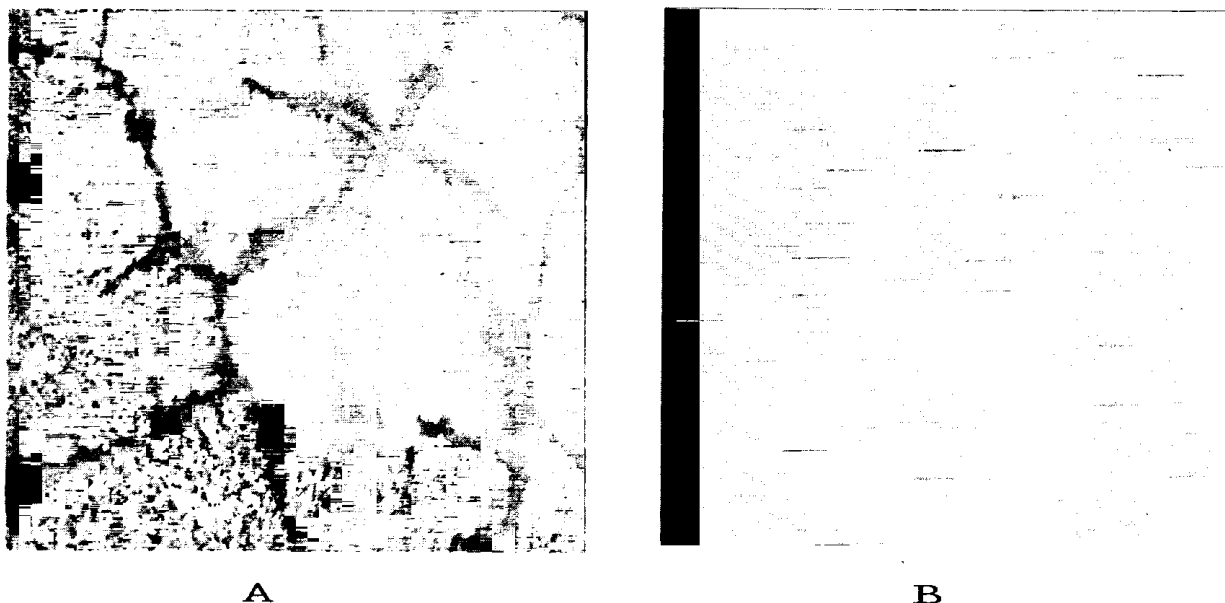


Fig. 2

Muri di calcestruzzo rivestiti con malta A priva di fibre polimeriche e fessurata per effetto del ritiro plastico, e malta B contenente fibre polimeriche e non fessurata.

do alla protezione dell'evaporazione e rinforzando la matrice cementizia con fibre sottili (lunghe circa 5-10 mm e spesse circa 0,01-0,02 mm) generalmente polimeriche (polipropilene, poliacriliche, ecc.), che hanno la funzione di innalzare il valore della R_t di quel poco che quest'ultima diventa superiore al valore relativamente piccolo della σ_t . L'aggiunta delle fibre in questo caso elimina le indesiderate conseguenze (fessure) del ritiro plastico, ma non il ritiro plastico stesso. In altre parole, mentre una stagionatura umida elimina il ritiro plastico (ϵ) e quindi annulla la sollecitazione indotta (σ_t), l'aggiunta di fibre sottili, invece, può innalzare la resistenza a trazione (R_t) fino a valori superiori a σ_t che però non viene modificata. E' evidente che l'impiego di calcestruzzo fibrorinforzato per risolvere il problema delle fessure da ritiro plastico, è economicamente conveniente solo per strutture di modesto spessore, di solito di qualche centimetro. Infatti, aumentando lo spessore della struttura, per esempio una lastra, cresce proporzionalmente il costo per unità di superficie derivante dall'aggiunta di fibre in tutto l'impasto del calcestruzzo. Al contrario, il costo della protezione dall'evaporazione per unità di superficie, qualunque sia il metodo adottato (casseri, membrane antievvaporanti, ecc.), non dipende dallo spessore della struttura. Ne consegue che di solito solo per gli intonaci, aventi appunto spessore non superiore a qualche centimetro, l'impiego di fibre polimeriche può risultare economicamente più conveniente della protezione dall'evaporazione.

La Fig. 2 mostra, a titolo di esempio, due rivestimenti di un muro di calcestruzzo degradato, effettuati con due malte entrambe applicate a spruzzo, frattazzate e non stagionate a umido come spesso avviene nella pratica di cantiere, la malta A, priva di fibre polimeriche, si è fessurata durante le prime 24 ore per effetto del ritiro plastico che ha indotto una sollecitazione σ_t superiore alla resistenza a trazione R_t della malta; la malta B, pur esposta alle stesse condizioni igrometriche della malta A ($UR = 40\%$), non si è fessurata per effetto delle fibre polimeriche che hanno rinforzato la matrice cementizia in modo che R_t risultasse superiore a σ_t .

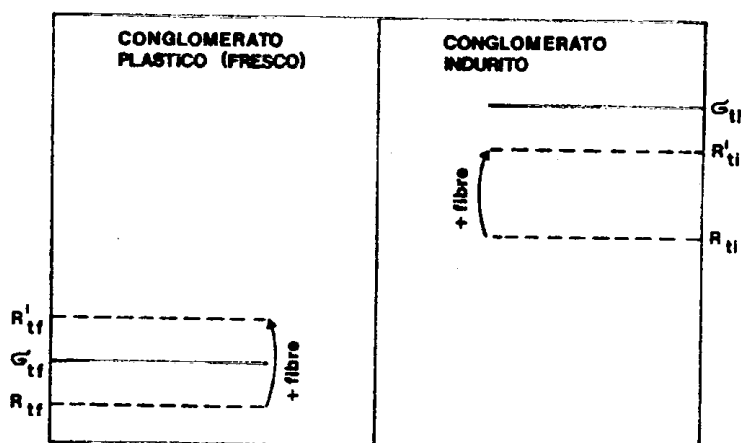


Fig. 3

A parità di ritiro (ϵ) la σ_{ti} indotta nel conglomerato indurito è molto maggiore di quella generata nel conglomerato fresco (σ_{tf}). Con l'aggiunta di fibre, R_{tf} diventa R'_{tf} (conglomerato fresco), ed R_{ti} diventa R'_{ti} . Nel primo caso non si ha più fessurazione ($R'_{tf} > \sigma_{tf}$); nel secondo caso non si elimina la fessurazione ($R'_{ti} < \sigma_{ti}$).

1.3 Il ritiro igrometrico

Per quanto concerne il ritiro igrometrico, di solito denominato semplicemente "ritiro", la protezione dall'evaporazione non è attuabile in pratica giacché occorrerebbe mettere in atto una protezione per un tempo enormemente lungo e teoricamente coincidente con la vita della struttura. Ovviamente il problema non si pone per le strutture che non subiscono il ritiro semplicemente perché l'ambiente è sempre umido ed impedisce l'evaporazione dell'acqua dal calcestruzzo. Invece, nelle strutture esposte ad ambienti insaturi di umidità, ed in particolare in quelle con elevato rapporto superficie/volume come si verifica per le lastre e gli intonaci, il ritiro è inevitabile. Esso può essere minimizzato (per esempio riducendo l'acqua ed il cemento, ed aumentando l'inerte) ma non può essere annullato.

Nel caso del ritiro igrometrico, a differenza di quanto avviene nel ritiro plastico, l'impiego di fibre polimeriche non consente in genere l'eliminazione delle fessure. La ragione di questo diverso comportamento sta, come si è già detto, nel maggiore modulo elastico del conglomerato indurito cui si riferisce il ritiro igrometrico. In sostanza, il fatto che un calcestruzzo o una malta si fessuri per effetto del ritiro dipende da una terna di valori: ritiro (ϵ), modulo elastico (E) e resistenza a trazione (R_t). Nel caso del ritiro plastico vengono indotte modeste sollecitazioni di trazione (σ_t), per il bassissimo valore di E , ed è quindi sufficiente, mediante l'aggiunta di fibre polimeriche, innalzare di poco il valore di R_t della matrice cementizia fino a farlo diventare superiore a σ_t (Fig. 3). Nel caso del ritiro igrometrico, invece, il beneficio derivante dall'aggiunta di fibre polimeriche, non è sufficiente a raggiungere livelli superiori a σ_t il cui valore è alto per l'elevato modulo elastico (Fig. 3). Ciò non significa, naturalmente, che il conglomerato indurito rinforzato con fibre - soprattutto se in acciaio - non presenti particolari caratteristiche (duttilità, tenacità, resistenza all'urto) rispetto al conglomerato ordinario. Rimane il fatto, tuttavia, che con le sole fibre non è possibile eliminare le fessure indotte dal ritiro igrometrico.

Pertanto, se la diminuzione del ritiro, conseguita attraverso la variazione della composizione, è tale da non essere accettabile, è possibile impiegare gli agenti espansivi per "compensare" il ritiro ed alleviarne o annullarne le conseguenze. Esempi tipici di strutture dove si impiegano agenti espansivi per produrre calcestruzzi o malte a ritiro compensato sono le pavimentazioni in calcestruzzo armato e le malte per restaurare strutture degradate in calcestruzzo. In questi casi la minimizzazione del ritiro solo attraverso la variazione di composizione del conglomerato non è in grado, in genere, di rimuovere l'inconveniente provocato dal ritiro.

Per esempio, nell'impiego di una malta per il restauro di una struttura in calcestruzzo vecchio degradato è opportuno l'utilizzazione di agenti espansivi per evitare che nell'interfaccia malta-calcestruzzo avvenga il distacco, o si verifichi una fessurazione nella malta di restauro per effetto del ritiro impedito. La Fig. 1 mostra schematicamente la malta di restauro ancora fresca applicata su una vecchia lastra in calcestruzzo il cui ritiro si è ormai esaurito (Fig. 1A); per effetto del ritiro igrometrico (ϵ), se la malta di riporto fosse libera di muoversi in assenza di attrito, si configurerebbe la situazione illustrata nella Fig. 1B). Questa situazione è quella che potrebbe manifestarsi applicando la malta su un calcestruzzo molto liscio e quindi con minimo attrito tra i due materiali: la conseguenza finale sarebbe, però, un distacco della malta per effetto del suo movimento rispetto al vecchio calcestruzzo. In effetti, ciò che si verifica più frequentemente è la situazione illustrata in Fig. 1C: la malta tenderebbe a contrarsi ma non può muoversi liberamente per la presenza dell'attrito e conseguentemente si instaura una sollecitazione R_t che porta alla fessurazione della malta stessa.

2. IL PRINCIPIO DELLA MALTA A RITIRO COMPENSATO

Il principio su cui si basa la malta a ritiro compensato è il seguente: a causa della reazione dell'agente espansivo con l'acqua, la malta aumenta di volume dopo la presa e durante l'indurimento nella fase di stagionatura. Se la malta è adeguatamente contrastata con ferri di armatura, l'espansione provocherà uno stato di compressione nella malta stessa, e di trazione nell'acciaio in modo analogo, anche se in misura molto ridotta, a quanto si verifica nel calcestruzzo precompresso (3). Un'alternativa ai ferri d'armatura, come contrasto dell'espansione, può essere anche il confinamento esterno di altre strutture in calcestruzzo (per esempio il riempimento di una buca con malta a ritiro compensato) o l'attrito tra un supporto ruvido del vecchio calcestruzzo e la nuova malta di restauro a ritiro compensato purchè in spessore limitato (1 cm). Durante l'essiccazione della malta, successiva alla stagionatura umida, il ritiro così provocato (anziché indurre delle sollecitazioni di trazione che possono arrivare fino a fessurare la malta o a provocarne il distacco dal vecchio calcestruzzo) semplicemente riduce o annulla le tensioni di compressione nella malta accumulate nell'espansione iniziale. In sostanza la malta a ritiro compensato è come una "molla" che viene caricata nella fase di espansione (stagionatura umida) e che si scarica gradualmente nella successiva fase di ritiro (essiccazione all'aria). Il successo o meno della malta a ritiro compensato dipende dal saper caricare adeguatamente la molla affinché, nella successiva fase di scarico, non si arrivi a valori di trazione che possano rompere la "molla" stessa.

E' bene segnalare che la malta a ritiro compensato è spesso impropriamente definita

come una malta "senza ritiro" o a "stabilità volumetrica". In effetti, qualsiasi materiale cementizio conservato in ambiente asciutto perde umidità e si ritira. Ciò che si può fare con la malta a ritiro compensato è di generare una espansione (attraverso una reazione chimica in ambiente umido) e di tramutarla in uno stato di compressione (attraverso un contrasto) affinché le sollecitazioni indotte dal successivo inevitabile ritiro (nel periodo di esposizione all'aria asciutta) risultino adeguatamente compensate dalla precedente compressione.

La Fig. 4 mostra schematicamente il comportamento "variazione dimensionale-tempo" di un conglomerato con agente espansivo a confronto con un calcestruzzo normale. Quest'ultimo rimane stabile, o espande impercettibilmente, finché rimane protetto nel cassero o è mantenuto umido; successivamente si ritira progressivamente nel tempo. Il conglomerato con agente espansivo, invece, aumenta di volume nel periodo della stagionatura umida e subisce un successivo ritiro nel periodo di esposizione all'aria. Se i due conglomerati differiscono solo per la presenza di agente espansivo, il ritiro ϵ_2 del conglomerato a ritiro compensato (registrato dal momento di esposizione all'aria) sarà eguale a quello del conglomerato normale senza agente espansivo. Affinché la curva "deformazione-tempo" del conglomerato con agente espansivo rimanga al di sopra del punto di zero senza mai subire un ritiro netto finale, è necessario che l'espansione (ϵ_1) sviluppata nella stagionatura umida sia superiore al ritiro (ϵ_2).

3. DEFINIZIONE DI AGENTI ESPANSIVI

Si definisce agente espansivo un prodotto che, reagendo con l'acqua ed eventualmente con gli altri prodotti presenti nell'impasto cementizio, provoca un aumento di volume. Esistono due categorie di agenti espansivi (4): quelli che provocano l'aumento di volume

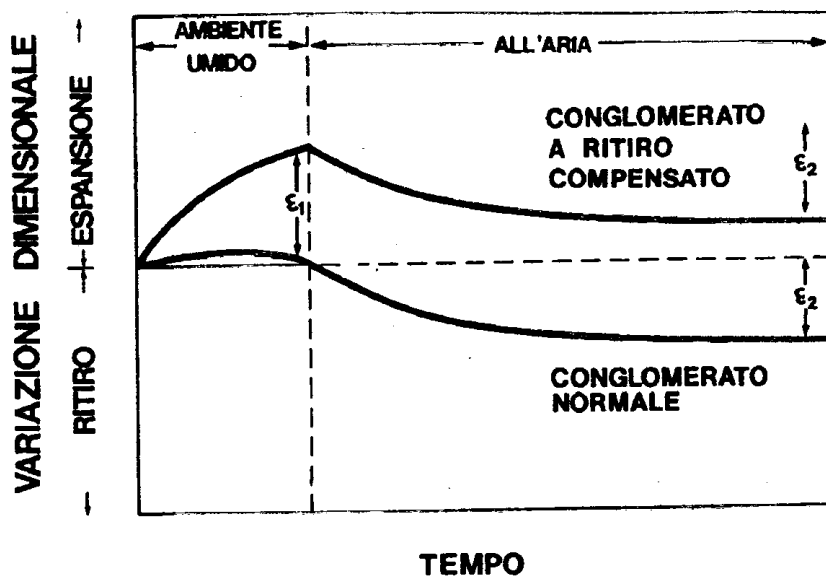


Fig. 4

Curva "variazione dimensionale-tempo" nel conglomerato normale ed in quello a ritiro compensato.

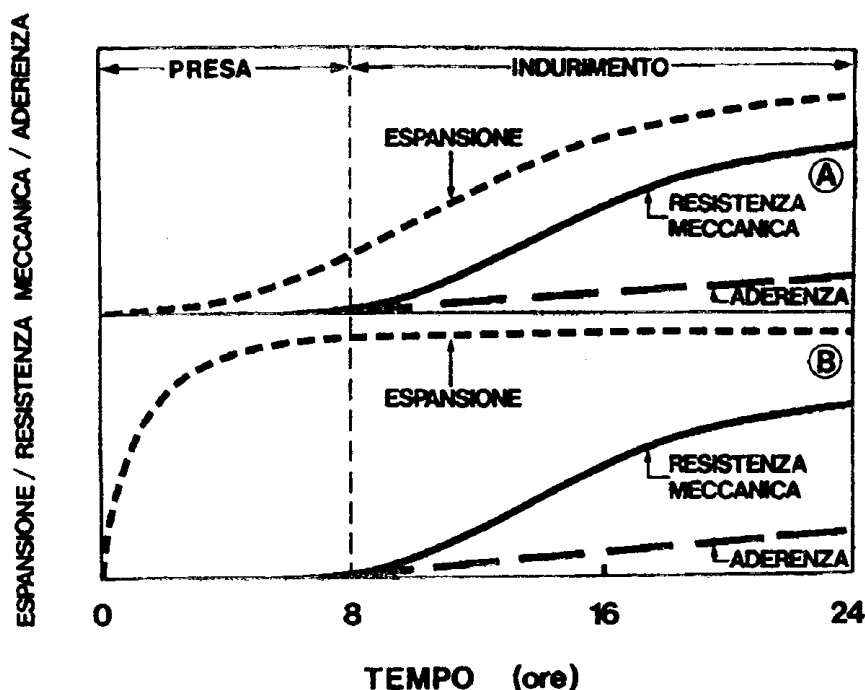


Fig. 5

Andamento dell'espansione, della resistenza meccanica e dell'aderenza al ferro di conglomerati espansivi nel periodo della presa e dell'indurimento (A) o solo nel periodo della presa (B).

solo quando il conglomerato è ancora plastico e quelli, invece, che espandono *anche* quando il conglomerato è già indurito ed ha aderito ai ferri d'armatura. Solo la seconda categoria di agenti espansivi può essere vantaggiosamente utilizzata nelle malte a ritiro compensato.

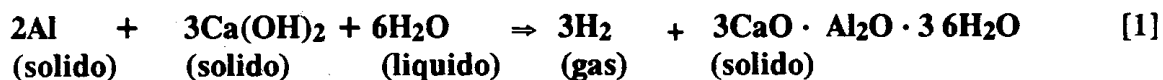
Il diverso comportamento delle due categorie di espansivi è illustrato nella Fig. 5. Nella parte A della Fig. 5 si osserva che l'espansione del conglomerato inizia nel periodo della presa e prosegue anche nella fase di indurimento (quando si cominciano ad evidenziare la resistenza meccanica e l'aderenza che va di pari passo con quest'ultima); la parte utile del processo espansivo è proprio quella che rimane dopo la presa quando il conglomerato è in grado di aderire ai ferri.

Nella parte B della Fig. 5 è mostrato il comportamento del conglomerato contenente un prodotto espansivo che agisce solo nel periodo di presa del cemento e quindi non è utilizzabile per i conglomerati a ritiro compensato.

3.1 Gli agenti espansivi in fase plastica

Gli agenti espansivi che esauriscono la loro azione quando il conglomerato è ancora plastico, e quindi non ancora in grado di aderire ai ferri, non sono in grado di creare gli stati di coazione (compressione nel conglomerato, e trazione nei ferri) che vengono vantaggiosamente utilizzati per compensare il ritiro igrometrico quando la struttura, a lungo termine, sarà esposta all'essiccazione e quindi alla contrazione.

Per esempio si comportano in questo modo alcuni metalli anfoteri in polvere, come l'alluminio, che reagiscono con l'acqua e la calce prodotta dall'idratazione del cemento per sviluppare un gas (idrogeno):



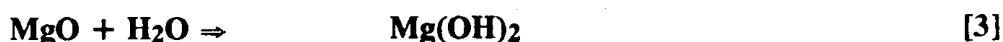
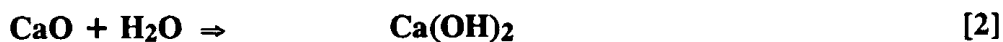
Poiché i gas occupano un volume molto maggiore dei solidi e dei liquidi, la reazione [1], che porta alla formazione di un gas (H_2) decorre con aumento di volume. Finché la pasta di cemento, entro cui avviene la formazione di idrogeno, è plastica e facilmente deformabile, lo sviluppo di H_2 fa "gonfiare" il conglomerato fresco. Non appena, però, la pasta di cemento comincia ad indurire, lo sviluppo di idrogeno non è in grado di deformare la pasta di cemento e quindi neppure il conglomerato. In altre parole questo tipo di espansione - legato allo sviluppo di gas all'interno del conglomerato - cessa quando il conglomerato indurisce e quindi proprio quando risulterebbe utile per creare le coazioni di compressione nel conglomerato e di trazione dei ferri di armatura.

3.2 Agenti espansivi in fase di indurimento

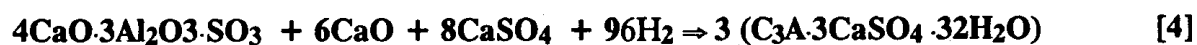
Accanto alla categoria degli agenti espansivi che agiscono *solo* quando il calcestruzzo o la malta si trova nella fase plastica, esiste quella degli agenti espansivi che agiscono *anche* quando il calcestruzzo o la malta indurisce: in questa seconda categoria rientrano diversi tipi di agente espansivo con caratteristiche diverse ma tutte comunque utilizzabili ai fini del conglomerato a ritiro compensato ed in particolare delle malte per restauro.

L'espansione che avviene durante la stagionatura umida iniziale può richiedere un tempo più o meno lungo (da un minimo di 1 giorno fino a una settimana) a seconda dell'agente espansivo impiegato. E' compito del produttore raccomandare la durata della stagionatura umida in relazione all'agente espansivo utilizzato.

Gli agenti espansivi normalmente impiegati per il conglomerato a ritiro compensato sono di due tipi: il primo comprende l'ossido di magnesio e soprattutto di calcio che aumentano il volume dell'impasto trasformandosi, per reazione con l'acqua, nei corrispondenti idrossidi come risulta dalle seguenti reazioni:



Il secondo tipo di agente espansivo per conglomerati a ritiro compensato è fondamentalmente basato sulla reazione con l'acqua di un solfoalluminato di composizione $4\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SO}_3$:



In linea di massima, gli agenti espansivi basati sulle reazioni [2] e [3] sono più rapidi

nel reagire e quindi nell'espandere che non gli agenti espansivi basati sulle reazioni [4]. Gli altri parametri che possono influire sulla cinetica della reazione e quindi sulla velocità del fenomeno espansivo sono la granulometria e la porosità dell'agente espansivo. Poiché la reazione che provoca l'espansione avviene all'interfaccia acqua-solido (agente espansivo) è evidente che, riducendo la dimensione delle particelle solide di agente espansivo si aumenta la superficie esposta all'azione dell'acqua e quindi si accelera il processo riducendo la durata dell'espansione. Analogamente, un agente espansivo sotto forma di granuli porosi diventa più facilmente penetrabile dall'acqua che non lo stesso agente espansivo sotto forma di granuli densi e compatti. La porosità dei granuli di agente espansivo - in particolare quello basato sulle reazioni [2] e [3] - può essere regolato dal produttore mediante la temperatura di cottura della materia prima (calcare o dolomite): temperature più alte portano ad un prodotto più denso e compatto per effetto della sinterizzazione favorita dalle alte temperature.

Come si vede, basandosi sulla composizione chimica, sulla granulometria e sulla porosità dell'agente espansivo si può regolare il tempo che occorre a far reagire con l'acqua tutto l'agente espansivo presente nella malta o nel calcestruzzo, e conseguentemente si può regolare la durata del processo espansivo durante il quale occorre garantire una stagionatura umida. La Fig. 6 mostra l'andamento dell'espansione del conglomerato in funzione del tempo impiegando due diversi agenti espansivi commerciali: quello a base di ossido di calcio completa la sua trasformazione in idrossido di calcio (e quindi la sua espansione) in poco più di 1 giorno; l'agente espansivo basato sulla idratazione del solfoalluminato richiede, invece, sette giorni per arrivare a completare la reazione portando il conglomerato ad un

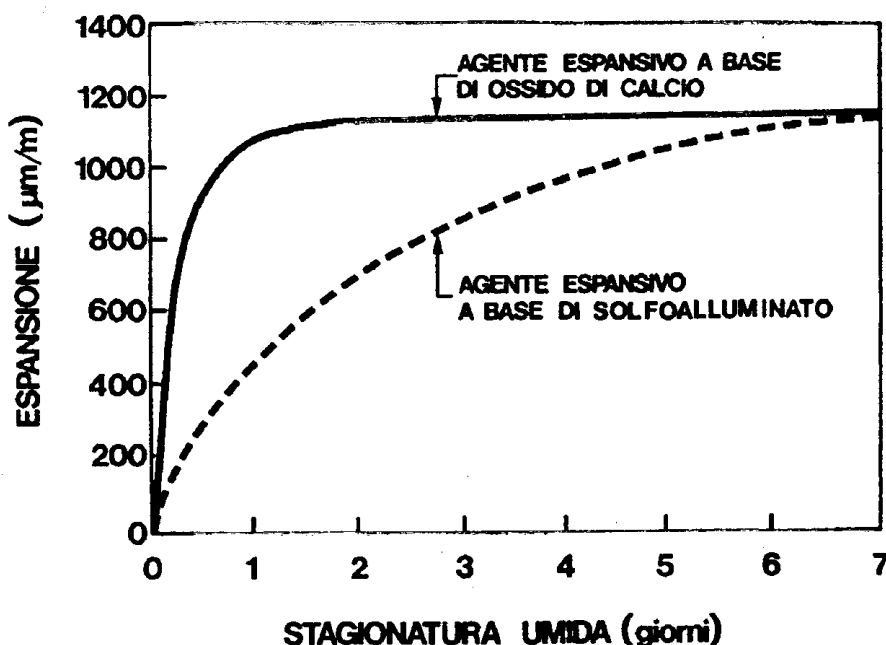


Fig. 6

Esempio di andamento nel tempo dell'espansione di due conglomerati contenenti due diversi agenti espansivi in fase di indurimento.

livello di espansione paragonabile a quello che l'agente espansivo a base di calce raggiunge in un sol giorno.

Fermo restando che la stagionatura umida giova sempre all'idratazione del cemento ed alle proprietà del conglomerato cementizio, e che essa è tanto più efficace quanto più è prolungata, è evidente come l'arresto precoce della stagionatura (per esempio scasseratura ad 1 giorno dal getto senza ulteriore protezione dalle superfici esposte) possa limitare significativamente il processo espansivo di un conglomerato a ritiro compensato contenente un agente espansivo che richieda 7 giorni di stagionatura, mentre non influenza sostanzialmente l'espansione di un conglomerato a ritiro compensato a base di un prodotto che in 1 giorno esaurisce il suo processo espansivo.

4. LA STAGIONATURA E L'ESPANSIONE

Nella tecnologia delle malte da restauro a ritiro compensato, un aspetto importante da segnalare riguarda la stagionatura umida che deve essere assolutamente realizzata per consentire all'agente espansivo di reagire con l'acqua e di provocare il benefico aumento di volume. Sovente all'impiego di un agente espansivo non si accompagna un'adeguata cura della stagionatura umida iniziale, con la conseguenza di perdere, in parte o in tutto, l'espansione ed i potenziali vantaggi da essa derivati.

L'importanza della stagionatura è illustrata nella Fig. 7 che mostra come varia l'espansione iniziale a seconda del tipo di stagionatura. Si può osservare che la stagionatura più efficace è quella che prevede un apporto di umidità dall'ambiente verso il conglomerato come si verifica con la spruzzatura di acqua o l'applicazione di sacchi di tela mantenuti sempre bagnati (curva *a* in Fig. 7): entrambe le operazioni debbono essere effettuate sulla superficie di calcestruzzo o di malta esposta all'aria non appena è terminata l'operazione di finitura.

Anche se meno efficace della precedente, la stagionatura con protezione meccanica del conglomerato (teli impermeabili e casseri) risulta comunque apprezzabile (curva *b* in Fig. 7): nel caso di calcestruzzo a ritiro compensato gettato entro casseri di legno poroso è necessario bagnare questi ultimi di tanto in tanto qualora l'ambiente risulti così asciutto da provocare un'evaporazione dell'acqua dal calcestruzzo verso l'ambiente attraverso i casseri.

Nel caso di getti contro terra o su calcestruzzo già indurito è necessario saturare con acqua il materiale con cui verrà a contatto il conglomerato a ritiro compensato per evitare, o comunque ridurre al minimo, la sottrazione d'acqua del conglomerato fresco. Nel caso di calcestruzzi gettati entro casseri ma con una parte della struttura esposta (come avviene per esempio in una trave) è opportuno procedere alla protezione con teli bagnati o impermeabili delle superfici di calcestruzzo esposte all'aria. Se, come spesso avviene, la scasseratura dovesse essere effettuata prima del tempo richiesto per la completa esplicazione dell'espansione è necessario completare la stagionatura con bagnatura e con applicazioni di barriere alternative quali teli impermeabili o anche membrane antievaporanti. La stagionatura con membrane antievaporanti (curva *c* in Fig. 7) applicate mediante spruzzatura di agenti stagionanti risulta di solito meno efficace che non la protezione meccanica.

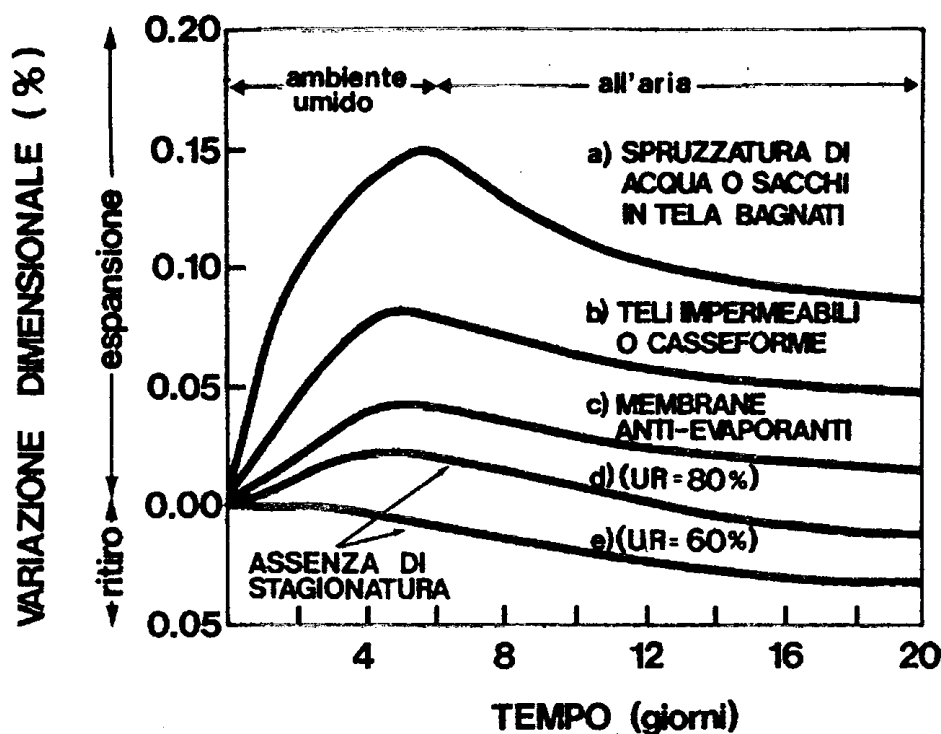


Fig. 7

Influenza della stagionatura sulla curva "variazione dimensione-tempo" di un determinato conglomerato contenente agente espansivo a base di solfoalluminato.

Nel caso, infine, di una totale assenza di stagionatura, l'andamento dell'espansione dipenderà fortemente dalle condizioni ambientali: in ambienti molto asciutti (U.R. minore o eguale al 60%), particolarmente se caldi e ventilati, l'evaporazione dell'acqua può procedere così velocemente da impedire quasi completamente all'agente espansivo di esplicare la sua funzione per carenza di umidità all'interno del calcestruzzo (curva *e* Fig. 7); in queste condizioni la presenza di agente espansivo risulterà del tutto inutile e le fessurazioni potranno verificarsi non solo per effetto del ritiro igrometrico ma anche e soprattutto per effetto del ritiro plastico la cui eliminazione, come si è già detto, può avvenire solo impedendo all'acqua di evaporare. Nel caso di totale assenza di stagionatura, ma in ambienti relativamente umidi, l'evaporazione dell'acqua dal conglomerato potrebbe procedere così lentamente da consentire un minimo di espansione iniziale dovuta alla reazione dell'agente espansivo con l'umidità residua all'interno del conglomerato (curva *d* in Fig. 7).

L'operazione di stagionatura, come si vede, è quindi essenziale per la esplicazione completa delle potenziali caratteristiche dell'agente espansivo. Essa richiede tuttavia un costo ed un impegno da parte dell'impresa che possono risultare, in taluni casi, anche molto onerosi. Per esempio, la nebulizzazione di acqua per alcuni giorni su un muro in calcestruzzo scassero precocemente, e quindi con buona parte dell'espansione non utilizzata, si presenta più difficile da realizzare che non la stessa operazione su una pavimentazione in calcestruzzo dove, subito dopo la finitura, è possibile applicare dei nebulizzatori d'acqua. An-

cor più gravosa è l'operazione di stagionatura per le malte da restauro a ritiro compensato applicate a spruzzo su muri in calcestruzzo da riparare. Poichè in questi casi la stagionatura non può essere iniziata se non dopo la finitura della malta, cioè dopo un certo periodo di tempo (1-2 ore) necessario ad ottenere una certa consistenza della malta stessa, ne consegue che l'operazione di stagionatura comporta inevitabilmente degli intralci nella organizzazione di cantiere. Allo scopo di risolvere questo problema pratico sul cantiere, alcune malte da restauro possono contenere, oltre alle fibre in polimeriche per ridurre le conseguenze del ritiro plastico, anche degli agenti ritentori di acqua che hanno la funzione di rallentare significativamente l'evaporazione dell'acqua di impasto e di conservare l'umidità all'interno della malta, affinché l'agente espansivo possa realmente agire *anche in assenza di una stagionatura a regola d'arte.*

5. ESPANSIONE MISURATA IN LABORATORIO ED ESPANSIONE EFFETTIVA SUL CANTIERE DELLE MALTE A RITIRO COMPENSATO

L'espansione delle malte o dei calcestruzzi a ritiro compensato viene misurata con il metodo descritto nella norma ASTM C 878, o con quello descritto nella normativa UNI (8147 ed 8148) che si ispira alla metodologia della norma ASTM. In entrambi i metodi, i provini prismatici di conglomerato cementizio armato con una barra di acciaio sono sformati dopo 6-8 ore, quando è terminata la presa, e conservati sotto acqua satura di calce. Si misura quindi a tempi diversi (da 1 a 28 giorni) l'allungamento relativo dei provini armati rispetto alla lunghezza originale (prima della immersione in acqua di calce).

L'espansione così misurata nel provino di laboratorio - tenuto conto della stagionatura umida molto efficace - rappresenta la massima espansione possibile; la misura ha il pregio di essere facilmente riproducibile ed è per questo che viene prescelta nelle normative. L'espansione effettiva che si verificherà sul cantiere nelle condizioni pratiche di impiego sarà minore di quella registrata in laboratorio e la differenza sarà tanto maggiore quanto meno saturo di umidità è l'ambiente in cui matura la struttura reale.

Il problema della discordanza tra l'espansione misurata in laboratorio e quella effettiva sul cantiere è, sotto certi aspetti, simile a problema della discordanza tra la resistenza meccanica misurata in laboratorio sul "cubetto" di calcestruzzo conservato in ambiente umido e quella che si raggiunge nella struttura reale sul cantiere quando la stagionatura umida viene a mancare. Per quanto il valore di espansione o di resistenza meccanica misurato in laboratorio conservi un suo valore come dato di controllo rispetto ad una specifica di capitolato, rimane il problema di ottenere nella struttura reale anche in assenza di stagionatura umida, un valore di espansione o di resistenza meccanica quanto più vicino possibile a quella registrata in laboratorio. In altri termini, una malta che espandesse nelle condizioni delle prove di laboratorio, ma non espandesse affatto o molto meno, nelle condizioni pratiche di impiego sul cantiere finirebbe con l'essere di nessuna o scarsa utilità ai fini per i quali è impiegata.

Nella Fig. 8 sono illustrati i comportamenti di due malte (A e B) che presentano un comportamento molto simile allorquando sono provate nelle condizioni di laboratorio (sotto acqua di calce) ed in ambienti "asciutti" (all'aria con UR = 50%).

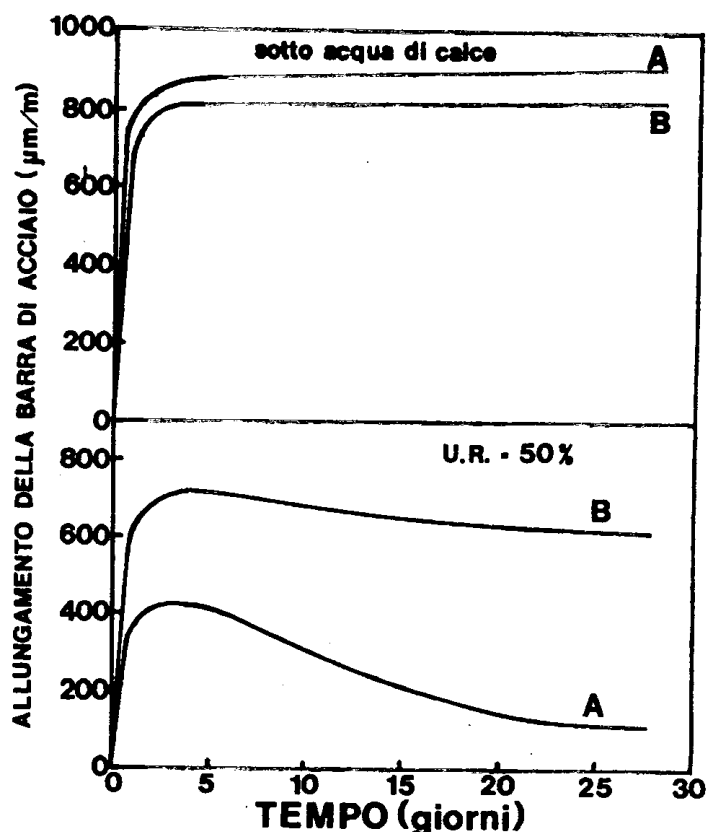


Fig. 8

Curva "deformazione-tempo" secondo la norma UNI 8147 originale (in alto) e modificata (in basso) per la conservazione dei provini all'aria (U.R. = 50%) anzichè sotto acqua di calce.

Le malte A e B presentano la stessa composizione ed in particolare la stessa quantità di agente espansivo (4% di CaO), con l'unica differenza che la malta B possiede *anche* un polimero "ritentore di acqua" grazie al quale l'umidità della malta - derivante dall'acqua di impasto - viene trattenuta all'interno del conglomerato anche se l'ambiente circostante è insaturo di umidità. Ne derivano queste conseguenze:

a) la malta B può espandersi più efficacemente della malta A in ambiente molto insaturo di umidità (UR = 50%) quando viene trascurata - come spesso avviene in pratica - la stagionatura umida;

b) la malta B subisce un minor ritiro igrometrico della malta A, allorché il processo espansivo si è concluso, per effetto della ridotta evaporazione di acqua del materiale verso l'ambiente.

c) la somma dei due effetti - entrambi benefici - rendono la malta B più affidabile nelle condizioni pratiche di impiego, giacché il risultato netto è di conservare gli stati di coazione (compressione nella malta e trazione nei ferri) anche in assenza di stagionatura umida da parte dell'impresa.

6. CONCLUSIONI

Le malte da restauro a ritiro compensato, da tempo largamente impiegate nel restauro, possono "soffrire", in mancanza di una accurata stagionatura umida da parte dell'impresa, per i seguenti motivi:

- per le fessure indotte dal ritiro plastico;
- dopo l'indurimento per la ridotta espansione e quindi per la mancata compensazione del ritiro igrometrico.

Questi difetti, non evidenziabili con le prove previste dalle norme originale ASTM ed UNI, ma riscontrabili modificando queste prove in modo da simulare le condizioni pratiche di impiego ($UR < 50\%$), possono essere rimossi nel seguente modo:

- rinforzando adeguatamente la matrice cementizia con fibre polimeriche in modo che la resistenza a trazione della malta sia superiore alle sollecitazioni indotte dal ritiro plastico;
- aggiungendo alla malta un polimero ritentore d'acqua in modo che l'umidità trattenuta all'interno del materiale assicuri le condizioni igrometriche per una efficace espansione e riduca, inoltre, il successivo ritiro igrometrico.

7. BIBLIOGRAFIA

- (1) T.C. Powers, *The Properties of Fresh Concrete*, Ed John Wiley & Sons, New York, 1968.
- (2) A.M. Neville, *Creep of Concrete: plain, reinforced and prestressed*, Ed North Holland, Amsterdam, 1970.
- (3) *ACI Manual of Concrete Practice*, Vol I, pg 223, 1986.
- (4) M. Collepari, *Scienza e Tecnologia del Calcestruzzo*, Ed Hoepli, Milano, 1987.