

CONGRESSO C.T.E. 1980  
SULLA  
INDUSTRIALIZZAZIONE EDILIZIA

FERRARA 7-8-9 Novembre 1980



Mario Colleparidi

Dipartimento di Scienza dei Materiali  
Facoltà di Ingegneria, Università di Ancona

Riassunto

Vengono discussi i parametri che influenzano l'espansione di un calcestruzzo a ritiro compensato ed in particolare: la stagionatura, il dosaggio di agente espansivo, la percentuale di armatura e la resistenza meccanica iniziale.

Introduzione

E' noto che l'evaporazione dell'acqua provoca il ritiro del calcestruzzo. A causa degli inevitabili vincoli presenti, la contrazione da ritiro induce una sollecitazione di trazione del calcestruzzo. Quando questa supera la resistenza a trazione del materiale si verificano delle fessure, la presenza delle quali può pregiudicare la protezione dei ferri di armatura che, a contatto diretto con l'umidità e l'ossigeno dell'aria, rimangono esposti all'azione corrosiva dell'ambiente. Inoltre, con la formazione di fessure passanti l'impermeabilità del calcestruzzo risulta seriamente compromessa, la qualcosa è particolarmente importante nelle opere idrauliche (vasche, serbatoi, tubazioni, ecc.).

Per compensare il ritiro si può impiegare un agente espansivo, cioè un prodotto capace di aumentare il suo volume per reazione con l'acqua.

L'azione dell'agente espansivo consiste nel provocare un aumento di volume di entità superiore alla contrazione causata dal ritiro. La Fig. 1 mostra schematicamente la variazione lineare di un calcestruzzo normale e di un calcestruzzo con agente espansivo. In realtà, perchè l'espansione sia vantaggiosamente utilizzata è necessario che l'aumento di volume sia opportunamente contrastato dalla presenza di ferri di armatura o di confinamenti esterni, e che avvenga quando il calcestruzzo è già indurito. In queste condizioni, il calcestruzzo espande ed aderendo ai ferri è in grado di metterli in trazione. D'altra parte, il contrasto esercitato dai ferri impedisce al calcestruzzo

di espandere liberamente e ne provoca uno stato di compressione. La Fig. 2 mostra, a titolo di esempio, l'espansione libera di un calcestruzzo non armato e quella contrastata in un calcestruzzo armato.

Perchè l'espansione contrastata si traduca in uno stato di compressione nel calcestruzzo e di trazione nei ferri d'armatura, è necessario che l'espansione si verifichi quando il calcestruzzo è indurito. Occorre, pertanto, che l'espansione causata dall'agente espansivo ed il processo di indurimento del cemento siano opportunamente armonizzati come è mostrato schematicamente in Fig. 3A. Se, invece, il calcestruzzo espandesse solo quando è plastico e quindi non è in grado di aderire ai ferri, l'energia derivante dall'aumento di volume sarebbe inutilmente dissipata senza provocare alcuno stato di coazione nei ferri e nel calcestruzzo (Fig. 3B).

La stagionatura e l'espansione

Esistono in commercio diversi tipi di agente espansivo. Alcuni di essi espandono quando il calcestruzzo ha già iniziato l'indurimento, altri invece espandono solo quando il calcestruzzo è in fase plastica. Per i motivi sopramenzionati (Fig.3) solo i primi possono essere presi in considerazione per compensare il ritiro del calcestruzzo. Tra questi si possono distinguere gli agenti espansivi a base di solfoalluminati che per reazione con acqua provocano la formazione di ettringite, e quelli a base di ossido di calcio e/o magnesio che per idratazione portano alla formazione di idrossido di calcio e/o magnesio (1). In entrambi i casi è necessario garantire una stagionatura umida sufficientemente lunga da completare la reazione di idratazione e quindi l'aumento di volume. Tuttavia, stabilito che il processo espansivo deve espletarsi dopo che il calcestruzzo ha iniziato a indurirsi (circa 8 ore a 20°C), è preferibile che la stagionatura umida non debba essere prolungata oltre limiti che in pratica non possono essere ragionevolmente realizzati in cantiere. Nel presente lavoro viene esaminato il comportamento di un agente espansivo (Stabilmac) costituito da un clinker speciale ricco in ossido di calcio. La temperatura di cottura di questo clinker, la granulometria, e la presenza di altri composti idraulici (quali i silicati e gli alluminati di calcio) sono tali che l'idratazione di questo

./.

clinker ed il conseguente aumento di volume si realizzano nel giro di un giorno.

Uno dei principali vantaggi derivanti dall'impiego di Stabilmac, rispetto ad altri agenti espansivi che portano alla formazione di ettringite, consiste appunto nella più breve stagionatura umida necessaria a garantire l'espansione. La reazione che porta alla formazione di ettringite richiede circa 7 giorni di ambiente umido per raggiungere il massimo di espansione, mentre con lo Stabilmac è sufficiente una stagionatura di 1 giorno per arrivare pressochè a completare l'espansione (Fig. 4).

Naturalmente, più lunga è la stagionatura umida migliori saranno le prestazioni del calcestruzzo anche con Stabilmac. Infatti, una inadeguata stagionatura porta ad un arresto della resistenza meccanica e ad un maggior ritiro. Tuttavia, una mancata stagionatura umida oltre il primo giorno non provoca l'arresto dell'espansione come avviene con gli altri agenti espansivi.

Come dosare l'agente espansivo

La caratteristica più importante del calcestruzzo a ritiro compensato consiste nell'espansione capace di annullare le conseguenze del ritiro. L'espansione che occorre conferire al calcestruzzo, e che può essere graduata variando il dosaggio di agente espansivo, dipende sostanzialmente dal ritiro. Maggiore è il ritiro del calcestruzzo, maggiore deve essere l'espansione. Il ritiro dipende fondamentalmente dalle condizioni igrometriche e termiche dell'ambiente, e dalla composizione del calcestruzzo (2). A parità di condizioni ambientali, un maggior rapporto acqua/cemento e cemento/inerte, come anche inerti meno rigidi, provocano un aumento nel ritiro del calcestruzzo e richiedono, quindi, un maggior dosaggio di agente espansivo per annullare gli effetti del ritiro. Da ciò consegue che un esatto dosaggio di agente espansivo non può prescindere dalla determinazione del ritiro sul calcestruzzo da impiegare. Un dosaggio di agente espansivo in difetto comporta un'espansione insufficiente per eliminare le conseguenze del ritiro, mentre un dosaggio eccessivo di agente espansivo, oltre a rappresentare un inutile spreco economico, può causare espansioni potenzialmente pericolose soprattutto se la percentuale di ferro risulta inadeguata. Per

./.

questo motivo, è indispensabile determinare il ritiro del calcestruzzo che occorre compensare. In mancanza del cemento e degli inerti che verranno impiegati è necessario calcolare, con il procedimento del mix-design, il ritiro approssimativamente prevedibile.

Stabilito il ritiro del calcestruzzo attraverso misure sperimentali, o calcolato il valore mediante il procedimento del mix-design, si può determinare il dosaggio su misura per compensare, con l'espansione dell'agente espansivo, il ritiro del calcestruzzo. La migliore soluzione - dal punto di vista sia tecnico che economico - è quella di progettare un calcestruzzo con il minor ritiro possibile, per esempio mediante una riduzione nell'acqua di impasto, così da ridurre al minimo il dosaggio di agente espansivo necessario.

#### Come misurare l'espansione

La misura dell'espansione in un calcestruzzo con agente espansivo può essere eseguita con i metodi descritti dalla norma ASTM C-878-78 (o dalla norma UNI n° 235). La prova consiste nel confezionare un provino di calcestruzzo (76x76x254 mm) armato con una barra di acciaio lunga 293 mm e con un diametro di 5 mm. Dopo che il calcestruzzo ha terminato la presa (circa 6-8 ore), si forma il provino e si misura la lunghezza della barra metallica. Il provino è immerso in acqua satura di calce e si misura quindi l'allungamento relativo della barra alle stagionature di 1, 3, 7, 28 giorni, rispetto alla lunghezza determinata al momento della sformatura. Mentre la norma ASTM C-878-78 descrive solamente la metodologia della prova, la norma UNI n° 235 prescrive anche un certo valore minimo di allungamento perchè le malte (300 µm/m) ed i calcestruzzi (200 µm/m) possano essere definiti espansivi. Per entrambe le norme, tuttavia, l'unica espansione che conta è quella che avviene dopo la presa e che è capace di provocare l'allungamento della barra di acciaio.

Esiste ora il problema di correlare l'espansione misurata secondo la norma ASTM C-878-78 sul provino prismatico standard con l'espansione reale del manufatto reale avente una determinata percentuale di armatura. La Fig. 5, ricavata dai dati dell'American Concrete Institute (3) consente di passare dall'espansione ASTM a quella dal manufatto: si vede per esempio che

un'espansione di 1000 µm/m secondo la prova ASTM corrisponde ad un'espansione di circa 800 µm/m in un manufatto con 0,33% di ferro, e poco meno di circa 450 µm/m in un manufatto con 1% di ferro.

#### L'espansione dipende dal dosaggio di Stabilmac

Nella Fig. 6 è mostrato, a titolo di esempio, l'espansione contrastata di alcuni calcestruzzi in funzione del dosaggio di Stabilmac. Si può vedere che maggiore è il contenuto di Stabilmac più elevata è l'espansione contrastata e che, nel caso specifico, l'espansione minima di 300 µm/m è raggiunta con un contenuto di Stabilmac di 15 kg/m<sup>3</sup>. Sulla stessa Fig. 6 è anche mostrata la compressione ( $\sigma_c$ ) indotta nel calcestruzzo dall'espansione contrastata ( $\epsilon$ ) e calcolata mediante l'equazione

$$\sigma_c = \epsilon \cdot E_a \cdot A_a / A_c$$

dove  $E_a$  è il modulo elastico dell'acciaio,  $A_a$  ed  $A_c$  sono rispettivamente la sezione dell'acciaio e del calcestruzzo. Si può vedere che, nel caso specifico, la compressione del calcestruzzo va da 0,2 N/mm<sup>2</sup> per un'espansione di 300 µm/m con un dosaggio di 15 kg/m<sup>3</sup> di Stabilmac, a 1,05 N/mm<sup>2</sup> per un'espansione di 1300 µm/m con un dosaggio di 60 kg/m<sup>3</sup> di Stabilmac.

#### L'espansione dipende dalla percentuale di armatura

Sia l'espansione della barra d'acciaio che la compressione del calcestruzzo, dipendono non solo dal dosaggio di agente espansivo, ma anche dalla percentuale di armatura. La Fig. 7 mostra come varia l'espansione e la composizione del calcestruzzo in funzione della percentuale di armatura in calcestruzzi di eguale composizione ed aventi lo stesso dosaggio di Stabilmac (40 kg/m<sup>3</sup>). Più alta è la percentuale di armatura (maggiore, cioè, è il contrasto) minore risulta l'espansione e maggiore è la compressione.

L'espansione dipende dalla resistenza meccanica iniziale

Oltre che dal dosaggio di Stabilmac e dalla percentuale d'armatura, l'espansione contrastata e la compressione del calcestruzzo dipendono notevolmente dalla resistenza meccanica che si sviluppa durante l'espansione. Più rapido è lo sviluppo della resistenza meccanica, maggiore è l'aderenza del calcestruzzo all'acciaio e maggiore risulta l'espansione della barra d'acciaio. Nella Fig. 8 è mostrata l'espansione (secondo la norma ASTM C-878-78) in funzione del dosaggio di Stabilmac per calcestruzzi armati aventi una resistenza meccanica a 24 ore compresa negli intervalli di 3-6; 7-8; 9-11; 12-18; 19-21; 22-28 e 29-35 N/mm<sup>2</sup>. Si può vedere, per esempio, che, per avere un'espansione contrastata di 500 µm/m occorre un dosaggio di Stabilmac di 20 kg/m<sup>3</sup> o di 30 kg/m<sup>3</sup> a seconda che la resistenza meccanica a 24 ore sia compresa nell'intervallo di 19-21 N/mm<sup>2</sup> o nell'intervallo di 9-11 N/mm<sup>2</sup> ciò significa che, a parità di dosaggio di agente espansivo, l'impiego combinato di Stabilmac ed un superfluidificante come il Rheobuild, mediante il quale si realizza una forte riduzione di acqua e quindi un sensibile incremento di resistenza meccanica soprattutto alle brevi stagionature, provoca un'espansione contrastata sensibilmente maggiore che il solo Stabilmac. Oppure, per realizzare una determinata espansione contrastata e quindi una determinata compressione nel calcestruzzo, è richiesta una minore quantità di agente espansivo se si impiegano Stabilmac e Rheobuild, invece di solo Stabilmac. Occorre, inoltre, tener conto che in presenza di Rheobuild, a causa della riduzione nel rapporto acqua/cemento, il ritiro del calcestruzzo risulta sensibilmente diminuito e quindi l'espansione che si richiede per annullare gli effetti del ritiro diviene pertanto minore. Tenendo conto di questi fenomeni (minore ritiro e maggiore espansione), in presenza di Rheobuild la quantità di Stabilmac richiesta per annullare la conseguenza del ritiro risulta sensibilmente minore e l'incidenza economica dei due additivi notevolmente inferiore.

In conclusione, per determinare il dosaggio di Stabilmac necessario a compensare su misura il ritiro del calcestruzzo occorre conoscere :

1. Il ritiro del calcestruzzo (calcolato o meglio misurato sperimentalmente);
2. La percentuale di armatura nel manufatto;
3. La resistenza meccanica a 1 giorno.

Bibliografia

- (1) Mario Collepari, "Scienza e tecnologia del calcestruzzo" pg 236-239, Ed. Hoepli, Milano (1980).
- (2) Mario Collepari, "Scienza e tecnologia del calcestruzzo" pg 466-472, Ed. Hoepli, Milano (1980).
- (3) ACI Committee 223 : "Recommended Practice for the Use of Shrinkage-Compensating Concrete" J. Am. Concr. Inst. 73, pg 319-339, (1976).

Fig. 1 Andamento schematico dell'espansione e del ritiro in un calcestruzzo a ritiro compensato (contenente agente espansivo) e di un calcestruzzo normale. L'espansione  $\epsilon_1$  deve essere maggiore o eguale al  $\epsilon_2$  ritiro.

Fig. 2 Andamento dell'espansione libera (calcestruzzo non armato) e contrastata (calcestruzzo armato).

Fig. 3 Andamento schematico dell'espansione e dell'indurimento. In A l'espansione si manifesta prevalentemente dopo che inizia l'indurimento del cemento: pertanto l'incremento di volume si traduce in uno stato di compressione del calcestruzzo e di trazione dei ferri. In B l'espansione si verifica esclusivamente durante la presa e prima che inizi l'indurimento: il calcestruzzo ancora plastico si deforma inutilmente senza provocare compressione nel conglomerato e trazione nei ferri.

Fig. 4 Andamento dell'espansione contrastata di calcestruzzi a ritiro controllato usando agenti espansivi produttori di ettringite o a base di ossido di calcio (Stabilmac).

Fig. 5 Correlazione tra l'espansione del manufatto armato e l'espansione del provino standard ASTM.

Fig. 6 Influenza del dosaggio di Stabilmac sull'espansione contrastata secondo la norma ASTM. (Cemento PTL 425 = 550 kg/m<sup>3</sup>; acqua = 160 l/m<sup>3</sup>; inerti = 1900 kg/m<sup>3</sup>; armatura = 0,33 %).

Fig. 7 Influenza della percentuale di armatura sull'espansione contrastata secondo la norma ASTM e sulla compressione nel calcestruzzo (Cemento Portland 425 = 400 kg/m<sup>3</sup>; acqua = 195 l/m<sup>3</sup>; inerti = 1850 kg/m<sup>3</sup>; Stabilmac = 40 kg/m<sup>3</sup>).

Fig. 8 Influenza del dosaggio di Stabilmac e della resistenza meccanica a 1 giorno sull'espansione ASTM.











