

La fessurazione termica del cemento armato: possibili soluzioni

1° Parte

di Vito Alunno Rossetti e Antonella Ferraro

1. Premessa

Tra le cause che possono esporre a rischio la durabilità delle strutture in calcestruzzo, si possono certamente annoverare le fessure. Le strutture sono spesso sottoposte, durante la fase di presa e di indurimento del calcestruzzo, a sollecitazioni termomeccaniche di trazione localizzate, che possono causare fessurazione.

Gli scriventi si sono spesso occupati di problemi di questo tipo, studiando soluzioni allo scopo di eliminare o contenere i fenomeni di fessurazione termica. Frequentemente si è costretti ad intervenire quando il fenomeno si sta manifestando: in tal caso il numero dei fattori su cui si può intervenire è limitato e quindi il fenomeno in genere si può solo ridurre. Esistono d'altra parte soluzioni tecnologiche già sperimentate per risolvere il problema delle fessure di origine termica ma la loro adozione deve essere prevista in fase di progetto e stesura del capitolato.

Nella prima parte della presente nota si passano in rassegna i problemi tipici e le loro cause, nella seconda parte (pubblicata sul prossimo numero di IN CONCRETO) invece saranno affrontate alcune soluzioni attuabili o attuate.

2. Problemi causati da effetti termici

Durante l'idratazione del cemento hanno luogo una serie di fenomeni chimici e fisici spontanei ed esotermici. Il calore che

si sviluppa produce un innalzamento della temperatura della pasta di cemento e quindi del calcestruzzo. Si possono distinguere fenomeni associati sia al riscaldamento sia al successivo raffreddamento (Figura 1).

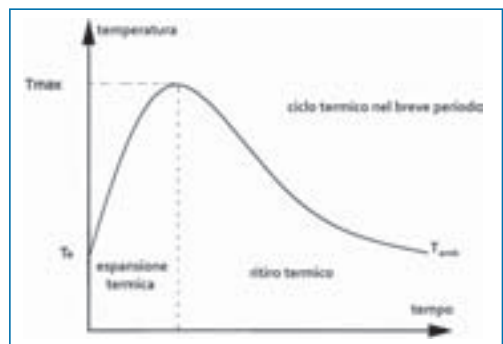


Fig. 1 - Tipica variazione di temperatura in un elemento strutturale.

2.1 Fessure da espansione termica

Nel caso di strutture massicce e tozze, la cui dimensione minima superi 1-2 m, come pile o plinti (Figura 2), data la bassa diffusività termica del materiale, il calore sviluppato internamente al manufatto è disperso nell'ambiente molto lentamente.

Di conseguenza la temperatura interna può salire, nell'arco di 1-2 giorni, anche oltre 80°C, mentre la parte corticale, raffreddandosi all'aria dopo la scasseratura, raggiunge rapidamente la temperatura dell'ambiente. Questa distribuzione della temperatura causa una dilatazione del nucleo interno non accompagnata dalla parte corticale, che

pertanto è assoggettata a tensioni di trazione. Si possono formare quindi delle fessure parallelamente al lato lungo del manufatto che tendono a richiudersi, almeno in parte, con l'attenuarsi del gradiente termico.

Nel caso di manufatti con armatura superficiale le fessure si formano in corrispondenza dei ferri disposti normalmente alle tensioni poiché questi causano concentrazioni locali di tensione e costituiscono delle riduzioni locali di sezione resistente.



Fig. 2 - Esempio di manufatto massivo (basamento di un mulino da cemento).

2.2 Fessure da ritiro termico

I problemi di fessurazione più ricorrenti sono dovuti al fenomeno del ritiro termico [1], si riscontrano in manufatti di spessore limitato ma di lunghezza pronunciata, in particolare muri su basamento rigido.

A seguito dello sviluppo di calore, la temperatura del calcestruzzo dopo circa 24-48 ore raggiunge il suo massimo valore. Tale riscaldamento causa una dilatazione del calcestruzzo, che non essendo del tutto libero, genera modeste sollecitazioni di compressione: queste non comportano effetti nocivi poiché il calcestruzzo fresco e nella prima fase di indurimento si assesta facilmente anche per effetti viscosi. ▶

Linea AETERNUM®



Linea Aeternum per calcestruzzi ad elevata consistenza, resistenza e durabilità.

AETERNUM 1 per prefabbricazione.

AETERNUM 3 per calcestruzzo preconfezionato.

AETERNUM PAV per pavimentazioni industriali.

AETERNUM PLAST per calcestruzzi estrusi.

AETERNUM HSC per SCC ad alta resistenza.

Tutti i calcestruzzi con Aeternum sono **impermeabili** e resistenti a tutte le classi di esposizione.



Invece, la successiva fase di raffreddamento è accompagnata da una progressiva contrazione che inizialmente riduce le tensioni di compressione fino ad annullarle, successivamente causa l'insorgere di tensioni di trazione, essendo il ritiro impedito dalla coazione con altri elementi della costruzione già induriti e quindi privi di effetti termici (per esempio un muro è solidale con il basamento gettato precedentemente).

La contrazione del calcestruzzo (o ritiro termico) è valutabile secondo l'espressione $\varepsilon = \Delta L/L = \Delta T \alpha_T/2$, dove α_T è il coefficiente di dilatazione termica, ΔT è il salto di temperatura dal valore di picco T_{max} fino al valore ambiente T_{amb} . Si considera una riduzione del 50% del coefficiente dilatazione termica per tenere in conto di effetti viscosi che per il calcestruzzo fresco sono alquanto pronunciati.

Il ritiro termico impedito genera una tensione di trazione che può risultare elevata per l'età del calcestruzzo di 1-2 giorni. In tal caso si producono fessure perpendicolari alla direzione di contrazione e quindi parallele al lato corto.

La spaziatura e l'apertura delle fessure dipendono dalla quantità dell'armatura disposta normalmente alla superficie di frattura: se la quantità di armatura è sufficientemente elevata, questa impedisce l'apertura libera delle fessure e ridistribuisce la fessurazione totale in fessure più numerose, ravvicinate e con un'apertura minore. Ciò si verifica se:

$$A_s/A_c = \rho_{crit} \geq f_{ctm}/f_{yk}$$

in cui ρ_{crit} è detto "rapporto critico di acciaio", f_{ctm} è la resistenza a trazione media del calcestruzzo fresco (generalmente considerata a 3 giorni), f_{yk} è la tensione convenzionale

caratteristica di snervamento dell'acciaio, A_s e A_c sono le aree delle sezioni dell'armatura e del calcestruzzo.

3. Fattori che influenzano il fenomeno termico

Per poter controllare e prevenire la formazione di fessure da effetti termici, legati essenzialmente all'aumento di temperatura, è estremamente importante conoscere oltre alle cause e alle modalità del fenomeno anche i fattori che lo possono influenzare, tra i quali principalmente:

- tipo e dosaggio di cemento
- temperatura dell'ambiente
- temperatura del calcestruzzo
- caratteristiche di isolamento termico della cassaforma
- tempo di permanenza della cassaforma.

3.1 ΔT adiabatico

Come si è già visto, i fenomeni di fessurazione sono dovuti allo sviluppo di calore durante l'idratazione del cemento e alle variazioni di temperatura. Il valore di ΔT in condizioni adiabatiche può essere calcolato secondo l'espressione $\Delta T = C q_i / C_s \rho$, dove C è il dosaggio di cemento (kg/m^3), q_i il calore di idratazione (kJ/kg) del cemento, C_s il calore specifico del calcestruzzo ($\text{kJ}/\text{kg}/^\circ\text{C}$), ρ è la massa volumica del calcestruzzo (kg/m^3). Tale valore rappresenta il valore massimo ed è utilizzabile solo per un confronto tra calcestruzzi di diversa composizione; esso infatti non è molto realistico per diversi motivi, tra cui principalmente perché gli elementi strutturali non si idratano adiabaticamente.

Le condizioni adiabatiche si ottengono solo in particolari condizioni, in zone limitate (di dimensione variabile a seconda dello spessore dell'elemento strutturale) all'interno di

manufatti con spessore elevato o quando si utilizzino casseri con caratteristiche isolanti. Come si può vedere in Figura 3 (valori ricavati da una simulazione agli elementi finiti), le dimensioni molto grandi creano condizioni quasi adiabatiche per la parte centrale (una fascia di quasi due metri di larghezza) di un elemento spesso 4 m; la situazione non si realizza nel muro di 1 m di spessore.

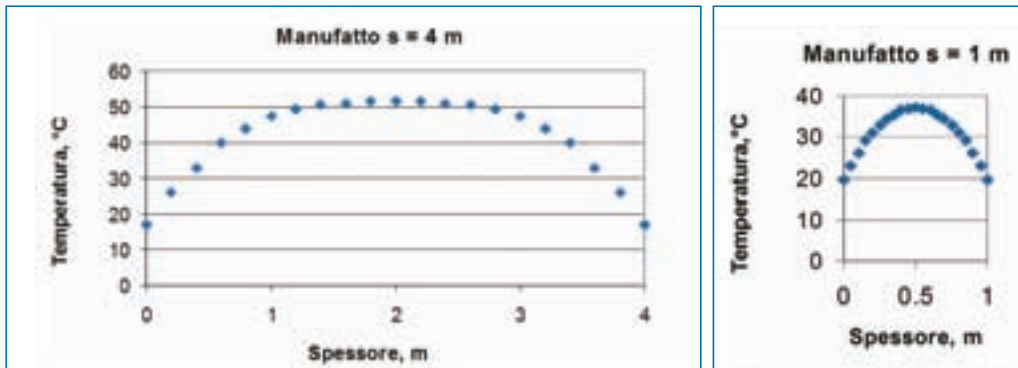


Fig. 3 - Andamento calcolato delle temperature in funzione della distanza dalla superficie in due muri realizzati con lo stesso calcestruzzo; condizioni ambientali invernali con temperatura media $T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ e cassaforma di ferro.

m memo

AUTOMAZIONE DEI PROCESSI PRODUTTIVI INDUSTRIALI

Soluzioni personalizzate ed integrate per la Gestione e Automazione degli impianti di produzione di calcestruzzo, in grado di garantire il massimo controllo della qualità e la redditività del vostro sistema produttivo aziendale



mettiamo il cuore nel vostro impianto...!!

solution company



Betonsys®

L'unico sistema di sviluppo dedicato alla gestione degli impianti di mescolazione e dosaggio. Una piattaforma di sviluppo robusta e ampiamente collaudata che, riducendo i tempi di sviluppo e testing, consente di ottenere personalizzazioni e aggiungere nuove funzionalità in tempi notevolmente più brevi dei tradizionali sistemi di automazione.

CORSO TRIESTE, 179 - 81100 CASERTA
 TEL. +39.0823.494930 FAX +39.0823.465320
 www.memosys.it - mail@memosys.it



3.2 Condizioni non adiabatiche, effetto della composizione della miscela

In condizioni non adiabatiche, l'innalzamento di temperatura varia oltre che in funzione dello sviluppo di calore (quindi del tipo e del dosaggio di cemento), anche dello spessore dei getti, delle caratteristiche isolanti dei casseri e delle condizioni ambientali (temperatura e vento). Si è analizzata l'influenza di questi parametri mediante una serie di simulazioni (si veda la seconda parte sul prossimo numero di IN CONCRETO).

Il risultato di ciascuna simulazione, derivante da un determinato set di condizioni, rappresenta l'andamento e la distribuzione dei campi termici e tensionali all'interno dei manufatti, dai quali dedurre il rischio di fessurazione.

Dall'analisi dei risultati ottenuti sono stati desunti accorgimenti di carattere generale utili al controllo delle fessure da ritiro termico.

3.2.1 Tipo e dosaggio di cemento

Lo sviluppo di calore q durante l'idratazione del cemento può variare da circa 200 a circa 350 kJ/kg a 3 giorni e da circa 280 a circa 450 kJ/kg a 28 giorni, a seconda del tipo di cemento.

Si è riscontrato che a pari resistenza del calcestruzzo, il tipo di cemento (pozzolanico, al calcare, ecc.) è quasi del tutto ininfluenza: in genere per realizzare un calcestruzzo di una determinata classe di resistenza, usando un cemento con minore calore di idratazione occorre impiegarne un dosaggio maggiore. Quanto al dosaggio di cemento, solo una sua riduzione consistente (dell'ordine di un centinaio di kg/m³), può apportare una significativa diminuzione dello sviluppo di calore (circa un °C per una riduzione di 10 kg/m³), accettando però prestazioni ridotte (Rck e massimo rapporto acqua/cemento amnesso).

3.2.2 Aggiunta di fumo di silice

Il fumo di silice in basse proporzioni, tipicamente 5-10% del dosaggio di cemento, viene a volte utilizzato come aggiunta, con l'intento di ridurre in modo consistente il dosaggio di cemento e l'incremento di temperatura a pari prestazioni del calcestruzzo. Tuttavia, poiché la reazione pozzolanica del fumo di silice col cemento è notevolmente esotermica non sempre tale sostituzione è efficace. Altre aggiunte pozzolaniche (pozzolana e fly ash) possono essere più efficaci.

3.2.3 Il diametro massimo dell'aggregato

Impiegare un aggregato con un Dmax più grande possibile compatibilmente con le modalità dei getti e con le caratteristiche strutturali del manufatto da realizzare (dimensione del copriferro e distanza dei ferri) può comportare una riduzione significativa di acqua e di conseguenza a pari rapporto a/c (e quindi a pari resistenza) una riduzione del dosaggio di cemento. Pertanto durante la progettazione della miscela occorre indagare sulla possibilità di disporre in cantiere di un Dmax grande. Ad esempio passando da 20 a 40 mm, a pari consistenza si può ridurre il dosaggio di cemento di circa 30 kg/m³.

3.2.4 Efficacia dell'additivo

Allo stesso modo, l'utilizzo di un additivo molto efficace in termini di riduzione di acqua, consente di abbassare il dosaggio di cemento e ridurre lo sviluppo di calore (ad esempio passando da una riduzione d'acqua di 10 al 25% si può diminuire di circa 50 kg il dosaggio di cemento). Inoltre, poiché in genere gli additivi mostrano un'efficacia diversa a seconda del cemento con cui sono combinati, è importante eseguire prove preliminari, allo scopo di individuare la combinazione additivo-cemento che consente, a pari lavorabilità, la massima riduzione di acqua.

3.3 Effetto delle condizioni ambientali e operative

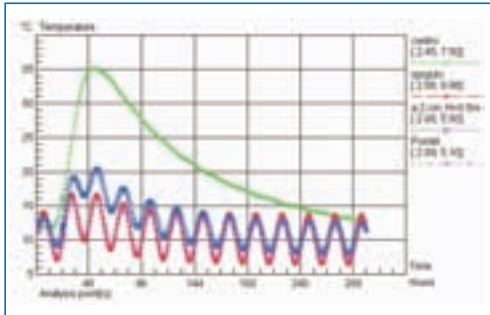
Oltre agli accorgimenti finalizzati a ridurre lo sviluppo del calore di idratazione che riguardano direttamente i componenti del calcestruzzo e i relativi aspetti tecnologici, anche altri fattori hanno effetto sulla formazione di fessure dovute ad effetti termici, in particolare le condizioni ambientali e le caratteristiche della cassaforma.

3.3.1 Condizioni ambientali

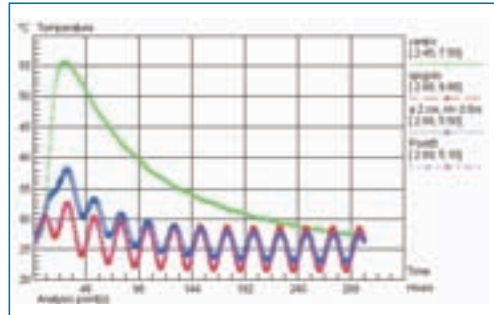
Con un determinato calcestruzzo e a pari geometria del manufatto, la temperatura esterna influenza lo sviluppo di calore e il ΔT . Nella Figura 4 vengono riportati risulta-

ti esemplificativi di simulazioni in condizioni invernali ed estive. Si può osservare come nei due casi l'incremento di temperatura, lo sviluppo di resistenza e lo stato tensionale siano alquanto diversi. Nel caso di condizioni invernali non adiabatiche, il ΔT è minore che in quelle estive. A valori di ΔT inferiori si associano tensioni di trazione al raffreddamento più basse, a cui tuttavia non sempre corrisponde una riduzione del rischio di fessurazione, poiché nel contempo si riduce anche la resistenza a trazione raggiunta. Per valutare il rischio di fessurazione, occorre considerare il rapporto tensioni/resistenza. In merito a tale rapporto, gli effetti delle condizioni ambientali, invernali ed estive, ►

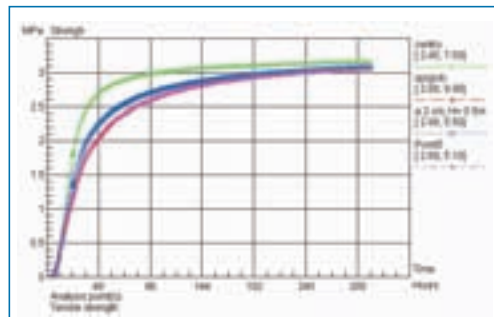
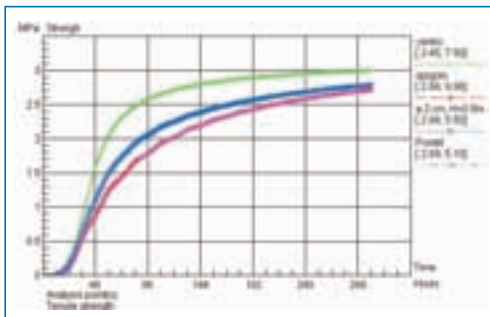
Condizioni ambientali invernali, $T = 5 - 15^\circ\text{C}$,
velocità del vento 3 m/s - $T_{\text{clisfresco}} = 12^\circ\text{C}$,



Condizioni ambientali estive $T = 20 - 30^\circ\text{C}$,
velocità del vento 3 m/s - $T_{\text{clisfresco}} = 27^\circ\text{C}$,



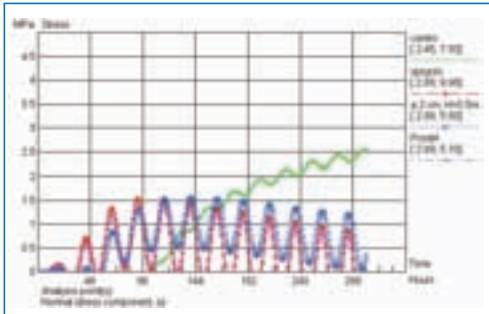
Andamento della temperatura al centro del muro, allo spigolo, a 2 cm dalla superficie e 50 cm dalla base, ad 1 cm dalla superficie e 10 cm dalla base.



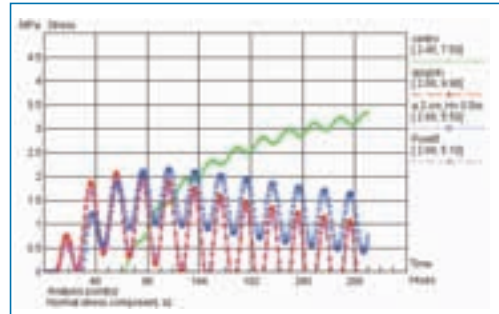
Andamento dello sviluppo di resistenza nel tempo, nei 4 punti

Fig. 4 - Risultati delle simulazioni per un manufatto, muro (90 cm)-basamento, con un determinato calcestruzzo, cassero di ferro fino a 24 ore.

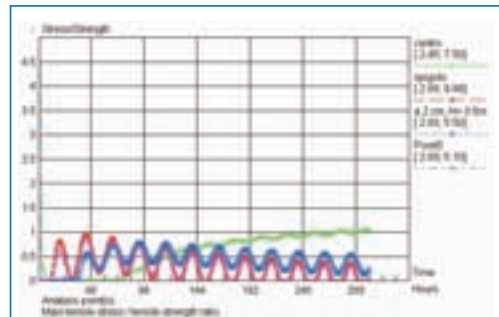
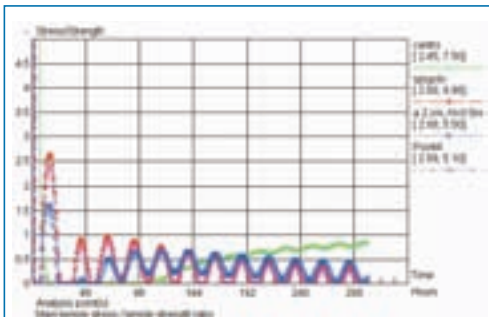
Condizioni ambientali invernali, $T = 5 - 15^{\circ}\text{C}$,
velocità del vento 3 m/s - $T_{\text{clsfresco}} = 12^{\circ}\text{C}$,



Condizioni ambientali estive $T = 20 - 30^{\circ}\text{C}$,
velocità del vento 3 m/s - $T_{\text{clsfresco}} = 27^{\circ}\text{C}$,



Andamento delle tensioni nel tempo, nei 4 punti



Andamento nel tempo del rapporto tensione/resistenza, nei 4 punti

Fig. 4 - Risultati delle simulazioni per un manufatto, muro (90 cm)-basamento, con un determinato calcestruzzo, cassero di ferro fino a 24 ore.

possono essere considerate generalmente analoghe, anche se nelle simulazioni riportate, le condizioni estive sono più favorevoli. Occorre inoltre precisare che i valori di resistenza a trazione a breve termine sono soggetti ad una notevole incertezza in particolare a basse temperature. Per quanto riguarda il vento, questo a seconda della sua velocità, influenza lo scambio termico manufatto/ambiente in modo particolare dopo lo scassero.

3.3.2 Temperatura del calcestruzzo fresco

Un aiuto per minimizzare la fessurazione si può ottenere riducendo la temperatura iniziale del calcestruzzo all'atto del getto, raf-

freddando gli ingredienti della miscela, aggiungendo parte dell'acqua come ghiaccio, che deve essere completamente disciolto alla fine della lavorazione del getto nelle casseforme. Recentemente si è fatto uso di aria liquida o azoto liquido come fluido raffreddante (a circa -195°C), che durante la miscelazione e la posa in opera evapora e sfugge. Indicato come refrigerante per il calcestruzzo, è anche il ghiaccio secco (CO_2 solida): con un 1 kg si riesce a ridurre di 1°C la temperatura di 100 litri di acqua.

Un sistema molto efficace per minimizzare gli effetti termici in getti massivi verrà illustrato nella seconda parte della nota (pubblicata sul prossimo numero di IN CONCRETO).

Superfluidificanti CREACTIVE

Il calcestruzzo secondo AXIM

3.3.3 Tipo di casseforme e coibentazione

Usando casseforme in metallo o comunque poco isolanti, si contribuisce a limitare l'innalzamento di temperatura; questo tuttavia comporta maggiori gradienti termici. In condizioni ambientali invernali, si è riscontrato che l'uso di casseri coibentati con materassini isolanti, mantenuti per tempi molto lunghi dell'ordine di una settimana o più può minimizzare il fenomeno della fessurazione. Ovviamente una permanenza dei casseri di questo genere non è sempre praticabile. Nella seconda parte della presente nota (pubblicata sul prossimo numero di IN CONCRETO) si descriverà un sistema di coibentazione che è stato studiato come soluzione alternativa ai casseri coibentati, nell'intento di ovviare alle difficoltà operative relative alla loro permanenza per tempi lunghi.

Bibliografia

- [1] V. Alunno Rossetti: "Il Calcestruzzo-materiali e tecnologia" Ed. McGraw-Hill, 2007, pag. 227-233.
- [2] V. Alunno Rossetti, M. Rossi: "Prevenzione dei Fenomeni di Fessurazione Termica - Viadotto Santerno (Linea Milano-Napoli, Tratta Bologna Firenze), L'Industria It. del Cemento, 738, 988-997 (1998).
- [3] V. Alunno Rossetti, A. Ferraro, G. Ranzo, F. Zenone, S. Zampaletta: "Utilizzo di additivi espansivi per fronteggiare i fenomeni di ritiro termico" InConcreto 88.
- [4] Hori Akihiro et al.: "Reduction effect of thermal stress on concrete with expansive additive" JCA Proceedings of cement & concrete, 60, 243-250 (2007) language: Japanese.
- [5] Otabe Yuichi et al.: "Heat generation characteristics of concrete with high-early-strength portland cement and expansive admixture", JCA Proceedings of cement & concrete, 58; 182-188 (2005) language: Japanese.
- [6] Y. Otabe Y, Suzuki, T. Kanda, T. Mizobuchi: "On the material evaluation method for the measure against reduction of thermal stress", Jour. Of the Ceramic Society of Japan, 112, 5, 1289-1295, (2004). ■



Opera: Teatro Zenith
Amiens, Francia
Studio Fuksas
Prodotti: Superfluidificanti
Creative AXIM

- ✓ Elevato mantenimento della lavorabilità
- ✓ Elevato potere di riduzione dell'acqua di impasto
- ✓ Miglioramento della reologia dell'impasto

Creative è la linea di additivi superfluidificanti di Axim Italia specifica per il calcestruzzo preconfezionato.



Axim Italia
Italcementi Group

SISTEMA

MIGLIORIAMO IL TUO CALCESTRUZZO