

# La fessurazione termica del cemento armato: possibili soluzioni

## 2° Parte

di Vito Alunno Rossetti e Antonella Ferraro

*Il presente articolo costituisce la seconda parte di un articolo pubblicato sul precedente numero di InConcreto (91).*

*La numerazione dei paragrafi e delle figure segue pertanto quello del precedente articolo.*

### 4. Casi esaminati

Vengono di seguito passati in rassegna i casi più significativi affrontati dagli scriventi riguardanti problemi di fessurazione di origine termica.

Le diverse situazioni sono state studiate allo scopo di interpretare o prevedere il comportamento termico e il rischio di fessurazione degli elementi strutturali.

I dati richiesti per tali valutazioni sono numerosi e generalmente non tutti disponibili.

In particolare risultano necessarie informazioni in merito a:

- composizione della miscela di calcestruzzo
- tipo e dosaggio di cemento
- temperatura del calcestruzzo fresco
- sviluppo del calore di idratazione in funzione della maturità del calcestruzzo (la maturità è una funzione del prodotto temperatura x tempo) da ottenere mediante prove di calorimetria adiabatica
- sviluppo della resistenza a compressione e a trazione diretta e del modulo elastico in funzione della maturità del calcestruzzo
- coefficiente di dilatazione termica del calcestruzzo
- coefficiente di Poisson e comportamento viscoso del calcestruzzo
- caratteristiche di scambio termico dei materiali usati per le casseforme
- temperature minime e massime giornaliere dell'ambiente
- velocità del vento.

Per alcune grandezze, in mancanza di dati reali è necessario fare ipotesi in base ai dati della letteratura.

Gli esempi riportati riguardano problemi di fessurazione causati sia da espansione termica sia da ritiro termico.

#### 4.1 Muro / basamento

I fenomeni di fessurazione da ritiro termico si riscontrano frequentemente su elementi strutturali aventi la tipica geometria muro-basamento (Figura 5). Le fessure si manifestano in genere da una cinquantina di centimetri dalla base (a volte dalla base stessa) fino alla sommità o a poche decine di centimetri dall'estremità superiore del manufatto, con ampiezze generalmente inferiori al millimetro e con una spaziatura di circa 3-5 m. Spesso si è constatato che le lesioni sono passanti. Gli andamenti della temperatura e



Fig. 5 - Manufatto tipo muro-basamento.

delle tensioni sono analoghi a quelli presentati nella Figura 4 (vedi IN CONCRETO 91). Valgono le considerazioni sviluppate al paragrafo 3.3 (vedi IN CONCRETO 91) che si riferiscono alla stessa tipologia di struttura.

#### 4.2 Espansione soletta

Fessure da espansione termica sono state riscontrate su un viadotto ferroviario; in questo caso micro fessure o cavillature, di apertura sempre inferiore a 0.3 mm presenti su un solettone precompresso longitudinalmente di spessore di 1.20 m (si veda la Figura 6), in particolare sul fianco, dove un profilo curvo raccorda la parte verticale con quella orizzontale all'intradosso.

Per queste opere il Capitolato prevedeva un rapporto acqua/cemento massimo di 0.40, una resistenza caratteristica minima di 40 MPa e un dosaggio minimo di cemento di 330 kg/m<sup>3</sup>, in pratica largamente superato.

Le simulazioni eseguite nelle condizioni operative reali e con i dati della miscela utilizzata (dosaggio di cemento 440 kg/m<sup>3</sup> e a/c = 0.39) hanno confermato il rischio di fessurazione nella zona di cambiamento di sezione (si veda la Figura 7). Gli incrementi di temperatura ottenuti sono stati particolarmente rilevanti (52.6 °C in condizioni invernali e 58.7 °C per le condizioni estive) e comunque in linea con i valori trovati sperimentalmente. Alla luce di questi risultati e di quanto si è riscontrato nella realtà, è evidente che, a pari condizioni ambientali, quanto maggiore è la temperatura raggiunta all'interno del manufatto tanto maggiore può risultare la gravità della fessurazione.

Dalle simulazioni si è riscontrato che solo riducendo il dosaggio di cemento a 350 kg/m<sup>3</sup> (una riduzione di 90 kg/m<sup>3</sup>) e portando il rapporto acqua/cemento a 0.49 si otterrebbe nel caso di condizioni invernali una rilevante riduzione del ΔT (circa 17 °C) ridu-



Fig. 6 - Cavillature da espansione termica su superficie contro cassero.

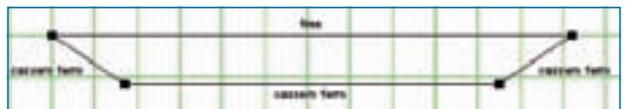


Fig. 7 - Sezione schematica dell'impalcato.

cendo la gravità del problema: il rapporto tensioni/resistenza calcolato si riduce di circa un terzo. Ovviamente questa soluzione non è praticabile sia per rispettare il Capitolato sia per le esigenze costruttive.

In un caso del genere occorrerà ricorrere ad altri accorgimenti, quali per esempio la riduzione della temperatura iniziale del calcestruzzo e/o utilizzare un sistema di coibentazione mantenendolo per un tempo molto lungo.

#### 4.3 Espansione in una costruzione massiccia

In occasione della ricostruzione della parte sommitale del paramento di una diga gli scriventi hanno messo a punto delle miscele con i materiali disponibili localmente (aggregati e cemento) tali da rispondere ai requisiti del Capitolato di appalto: Rck 20, dosaggio di cemento compreso 200-220 kg/m<sup>3</sup> ►



delle resistenze meccaniche è più lento. Pertanto, è evidente che il valore massimo di temperatura richiamato dal capitolato, è solo un limite empirico il cui non raggiungimento non elimina con certezza i problemi e che per valutare il rischio di fessurazione occorre considerare il rapporto tensione/resistenza.

#### **4.4 Pareti delle conche di navigazione - Mose**

Un esempio di problemi di fessurazione, che in base alla morfologia ed alla tempistica (apertura inferiore ad 1 mm e spaziate diversi metri irregolarmente, rilevate allo scasso o nei giorni seguenti), è da ricondurre a problemi di ritiro termico impedito, si è presentato sulle pareti verticali di spessore elevato della testata delle chiuse di una delle bocche di porto del progetto Mose della laguna di Venezia.

Nel caso specifico gli effetti del ritiro venivano esaltati dalle particolari condizioni al contorno, in quanto impedito dalla coazione con altri elementi cui la parete è solidale, in particolare oltre al basamento con i ferri di ripresa su cui si va ad innestare e seppure in minor misura, il palancolato poco deformabile dal lato mare.

Allo scopo di limitare tali manifestazioni nei getti successivi dell'opera ancora in corso, è stato svolto uno studio sul comportamento termico e sul rischio di fessurazione delle strutture.

Le parti strutturali interessate, avevano spessore compreso tra 70 e 120 cm e le principali prescrizioni rilevanti dal punto di vista tecnologico erano le seguenti:

- calcestruzzo C35/45
- rapporto acqua/cemento  $\leq 0.45$
- dimensione dell'aggregato  $\leq 25$  mm
- dosaggio minimo di cemento  $\geq 340$  kg/m<sup>3</sup>
- classe di consistenza S5



**30 ANNI NEL SETTORE  
DEL CALCESTRUZZO**

**COMPETENZA - AFFIDABILITÀ  
ASSISTENZA PER L'AUTOMAZIONE**



- AUTOMAZIONE DEGLI IMPIANTI
- BOLLETTAZIONE E FATTURAZIONE AUTOMATICA
- CONTROLLO GPS DEL TRASPORTO
- STRUMENTI E ACCESSORI

**ESI ELETTROSISTEMI S.R.L.**  
Via C. Razzaboni 140/A | 41100 Modena Italy  
Tel: +39 059315550 | Fax: +39 059315968  
Email: info@esielettrosistemi.it  
www.esielettrosistemi.it

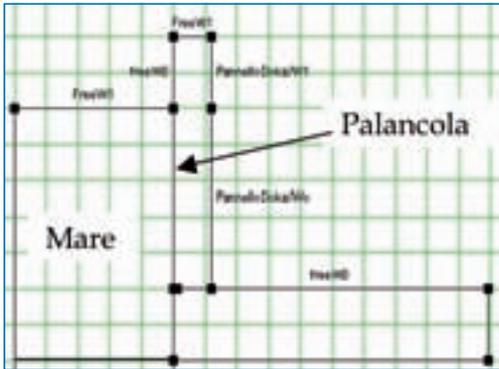


Fig. 10 - Modello utilizzato.

La prima fase dello studio ha riguardato il rilievo in corso d'opera delle temperature al nocciolo e sulla zona corticale del manufatto, della temperatura ambiente e della temperatura dell'acqua di mare a contatto

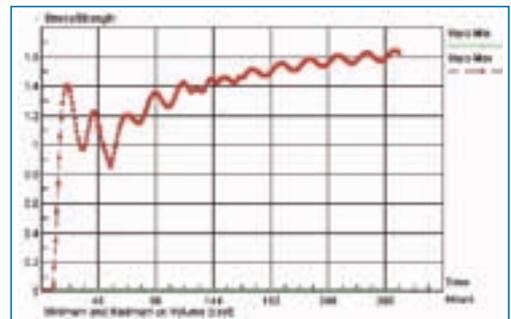
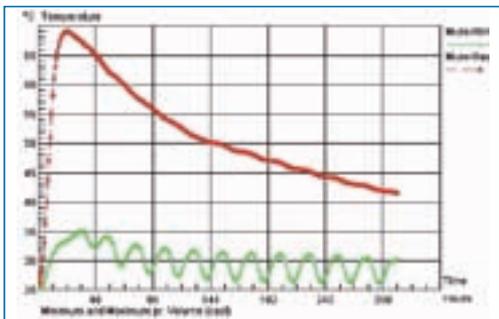
con i palancolati metallici (che costituiscono il cassero delle superfici lato mare delle pareti).

Sulla base di questi dati sperimentali è stato tarato il modello in modo tale da riprodurre quanto osservato in sito in merito a temperature, generazione di stress e fessurazione (Figura 10 e Figura 11).

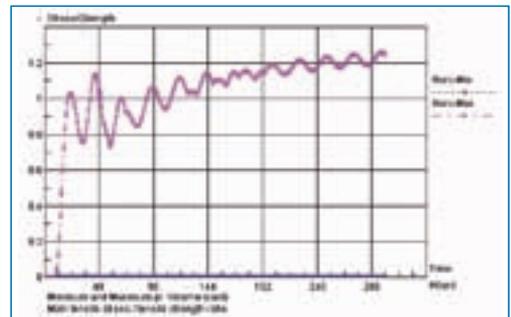
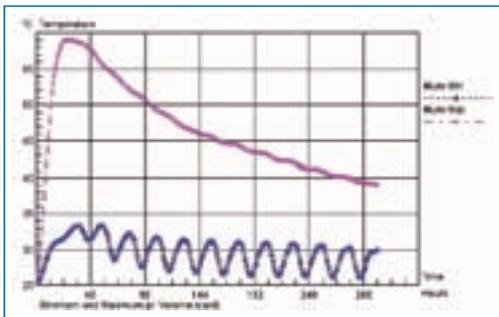
Si è poi verificato che l'entità del fenomeno poteva essere ridotta solo a scapito delle prestazioni del conglomerato.

Sono state quindi sperimentate in laboratorio diverse miscele volte a minimizzare il rilascio del calore di idratazione considerando:

- l'impiego di cementi d'altoforno
- la riduzione del dosaggio del cemento
- l'aumento del diametro massimo dell'aggregato



Andamento nel tempo della temperatura e del rapporto tensione/resistenza, nel caso della miscela iniziale con un dosaggio di cemento di 380 kg.



Andamento nel tempo della temperatura e del rapporto tensione/resistenza nel caso della miscela con un dosaggio di cemento di 312 kg.

Fig. 11 - Risultati delle simulazioni in condizioni ambientali estive.

- l'additivo più efficace in termini di riduzione d'acqua e per le caratteristiche volute di lavorabilità.

Alla luce dei risultati ottenuti si è constatato che agendo sui pochi fattori su cui si può intervenire in corso d'opera garantendo comunque la conformità al Capitolato, il fenomeno della fessurazione si può solo ridurre, senza poter prevedere l'eliminazione completa del problema.

## 5. Soluzioni particolari

Vengono di seguito descritte due efficaci soluzioni non convenzionali, che non possono essere ritenute pratica comune e tanto meno utilizzabili in corso d'opera: soluzioni di questo tipo devono essere previste in fase di progetto considerando anche i relativi oneri.

### 5.1 Pila del Santerno

Per la realizzazione della pila del Viadotto Santerno [2] (linea Milano-Napoli, tratta Bologna-Firenze), viste le rilevanti dimensioni (3,6 x 20,48 x 10 m di altezza, gettati in 3 strati) e le limitazioni del Capitolato (minimo rapporto acqua/cemento = 0,45, di fatto 0,43, per un dosaggio di cemento di 380 kg/m<sup>3</sup>), tra le varie possibilità per minimizzare gli effetti termici prevedibili, si è utilizzato un sistema di raffreddamento mediante tubi di ferro a circolazione di acqua fredda durante il processo di indurimento.

Dovendo eseguire il getto d'inverno, il raffreddamento del calcestruzzo avrebbe prodotto benefici insignificanti.

Avvalendosi della simulazione del comportamento termico, si è progettato il sistema di raffreddamento per il quale si sono impiegati 120 tubi ad U verticali per una lunghezza totale di 2400 m. I tre strati orizzontali che costituiscono il manufatto sono stati gettati a distanza di circa 20 giorni uno dall'altro.

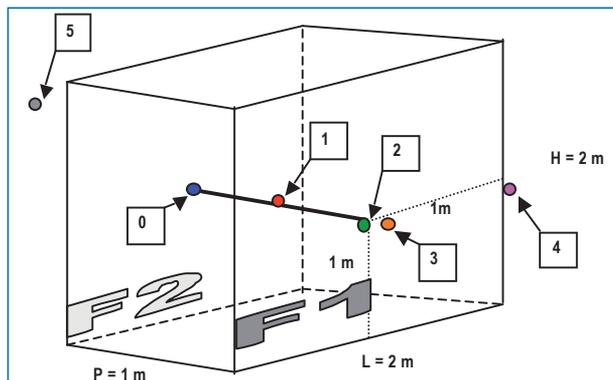


Fig. 12 - Schema del manufatto studiato.

L'impiego di tale sistema ha dato i risultati attesi: si è contenuto l'aumento della temperatura a soli 20 °C (contro circa 38 °C senza sistema di raffreddamento) e sulla superficie della pila non si sono verificati fenomeni di fessurazione imputabili ad espansione o ritiro termico.

### 5.2 Sistema di coibentazione

Come si è già detto, il mantenimento di casseri coibentati per tempi molto lunghi (dell'ordine di una settimana o più) sarebbe in grado di apportare dei benefici su elementi strutturali aventi la geometria muro-basamento.

Nell'intento di ovviare alle difficoltà operative per il mantenimento dei casseri per tempi così lunghi, si è avviata una sperimentazione volta a caratterizzare l'effetto di uno strato d'aria ferma di 5 cm di spessore come coibente, mantenendo un telo di polietilene in posizione mediante un telaio di legno (risultati non pubblicati).

#### 5.2.1 Descrizione della sperimentazione

Per le prove si è realizzato un provino di calcestruzzo come in Figura 8 (P = 1 m, H = 2 m, L = 2 m).

Per avere un flusso di calore quanto più possibile monodirezionale (normalmente ►

alle facce F1-F2) le quattro facce minori (dimensioni 2.00 m × 1.00 m) sono state coibentate con pannelli in polistirolo espanso dello spessore minimo complessivo di 5 cm, montati sulla cassaforma utilizzata per la realizzazione del manufatto di prova e sulla faccia orizzontale superiore.

La faccia F2 non è stata coibentata; su di essa è presente la sola cassaforma in metallo, mentre sulla faccia F1, oltre alla cassaforma metallica, è stato disposto un telo di polietilene mantenuto a 5 cm dalla superficie del manufatto in maniera tale da assicurare uno strato di aria ferma a contatto col monolite (si veda la Figura 12).

Sono state eseguite misure di temperatura, di velocità del vento ed umidità relativa. Le misure di temperatura sono state registrate con un sistema di 6 sonde poste nei punti indicati nella Figura 12.

Come si può osservare dai grafici (Figura 14):

- la temperatura dell'aria all'interno dell'intercapedine cassero/telo è sempre almeno 10-15 °C maggiore di quella dell'ambiente
- la temperatura rilevata nel calcestruzzo a 2 cm dalla superficie priva di telo (non coibentata) è sempre più bassa di circa 5 °C rispetto a quella con il telo
- la presenza del telo a 5 cm dalla superficie del manufatto determina effettivamente uno strato di aria calda che ostacola lo scambio di calore del calcestruzzo con l'ambiente esterno, creando pertanto una coibentazione che in talune condizioni può essere considerata una valida alternativa al materassino coibente.

L'andamento delle temperature dell'intercapedine presenta picchi pronunciati nelle ore più calde; è opportuno precisare che alte temperature a ridosso della superficie del manufatto non implicano un apporto di



Fig. 13 - Manufatto di prova.

calore, poiché lo strato d'aria calda ha una massa trascurabile.

I dati raccolti sono stati utilizzati per caratterizzare lo scambio termico del sistema di coibentazione ideato, ricavando i parametri necessari per simulare attendibilmente il comportamento di elementi di calcestruzzo.

La soluzione più efficace per contenere al massimo i fenomeni di fessurazione, in particolare nelle condizioni invernali, è quella di usare un cassero coibentato con materassino isolante e applicare il telo dopo non più 1 h dallo scassero.

Naturalmente un sistema di questo tipo potrebbe essere impiegato convenientemente solo nel caso della realizzazione ripetitiva di conci della stessa forma e dimensione (ad esempio conci di galleria).

Va infine sottolineato il fatto che la presenza del telo apporta un effetto benefico sulla maturazione del calcestruzzo e sulla fessurazione da ritiro igrometrico.

### 5.3 Impiego di espansivi

Gli additivi espansivi sono stati proposti da vari decenni, essenzialmente al fine di minimizzare la fessurazione dovuta al ritiro da essiccamento. Si è voluta provare la loro

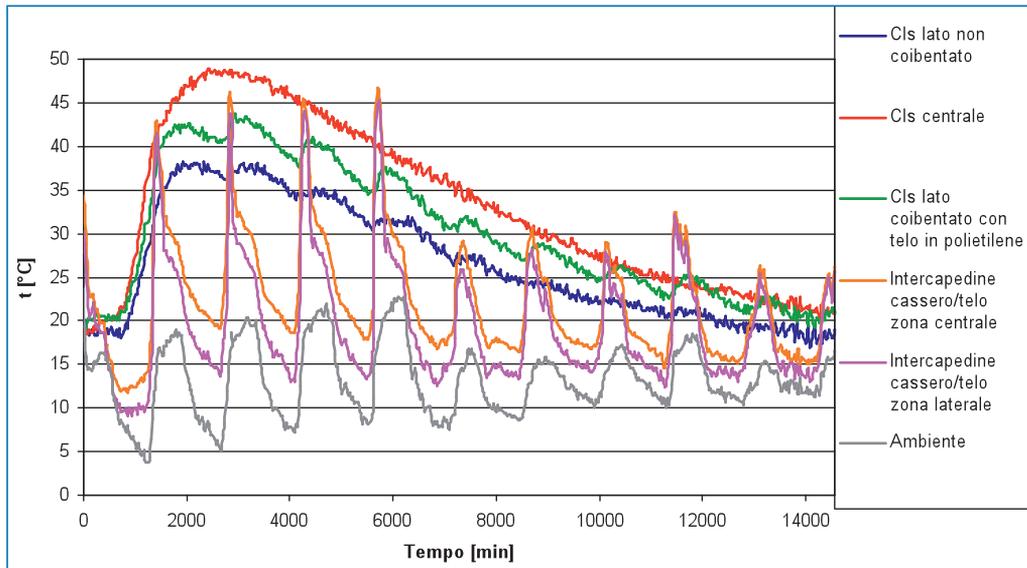


Fig. 14 - Rilievo delle temperature per il manufatto studiato.

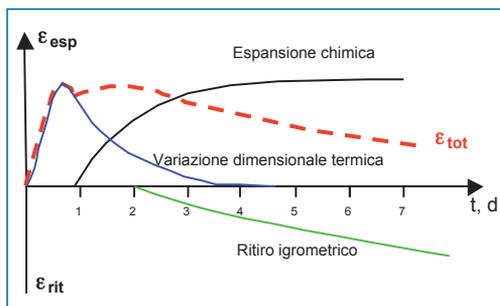


Fig. 15 - Rappresentazione grafica schematica delle variazioni dimensionali del manufatto che si susseguono nel tempo dopo il getto, considerate separatamente e la loro somma.

efficacia anche per la fessurazione da ritiro termico [3]. Sul campo, negli ultimi anni, sono stati svolti solo alcuni tentativi in Giappone [4, 5, 6], ma le informazioni sui risultati sono scarse e poco accessibili. Tali additivi, a base di ossido di calcio o di solfoalluminati di calcio, a seguito dell'idratazione producono un'espansione che, essendo impedita (dall'armatura), fa nascere tensioni di compressione nel calcestruzzo.

Si crea quindi uno stato di precompressione chimica indotta dall'additivo espansivo. In seguito al raffreddamento, nella struttura si hanno tensioni di trazione ridotte o annullate e la corrispondente riduzione o annullamento delle fessure. Una rappresentazione schematica delle variazioni dimensionali del manufatto che avvengono dopo il getto, viene riportata in Figura 15.

Il grado di espansione dell'additivo dipende dal suo dosaggio che è influenzato da diversi parametri: temperatura, umidità, tipo di cemento, dalla composizione della miscela e soprattutto dalla quantità di armatura.

### 5.3.1 Descrizione della sperimentazione

Nell'intento di verificare la validità dell'impiego di espansivi, si è svolta una sperimentazione adottando un basso dosaggio di additivo, in modo da limitare l'effetto al solo ritiro termico.

Si è individuato come manufatto appropriato alla sperimentazione il muro di contenimento con tipica geometria muro-basamento, ►

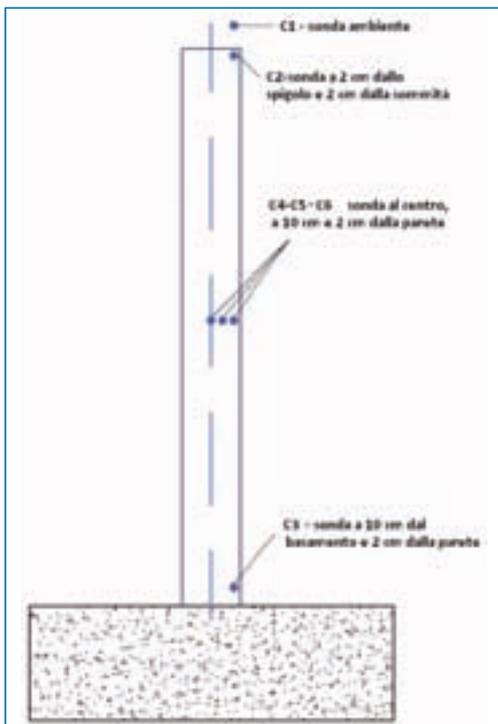


Fig. 16 - Sezione del muro e disposizione delle sonde di temperatura all'interno del manufatto.

della piscina esterna del complesso sportivo e universitario "Città dello Sport", progettato dall'architetto Santiago Calatrava nell'area dell'Università di Roma 2, Tor Vergata, realizzato in 19 conci di cui 15 utilizzati per le prove, con fondazione continua a sezione rettangolare. Lo spessore del muro è di 0,40 m, sufficiente per l'osservazione dei fenomeni da ritiro termico, e la lunghezza dei conci varia tra 16 e 27 m.

La realizzazione a conci e la loro numerosità hanno costituito una popolazione sufficientemente ampia per lo studio del fenomeno. I conci sono stati gettati alternativamente con miscele di calcestruzzo con e senza additivo, in modo che le condizioni ambientali, di maturazione e di esecuzione fossero simili per le varie miscele, pur nel procedere della stagione.

Una simulazione preliminare, basata sui parametri ambientali, sulle caratteristiche dei manufatti e su tipo e dosaggio di cemento e additivo in uso, ha individuato il dosaggio di additivo espansivo richiesto per generare uno stato di compressione nei manufatti, sufficiente a compensare il ritiro termico.

Si sono impiegati due dosaggi di espansivo: 15 kg/m<sup>3</sup> (Mix 1) per i primi 4 conci, 20 kg/m<sup>3</sup> (Mix 2) per gli altri 7 conci; 4 conci erano privi di additivo (Mix 0).

Durante i getti sono state monitorate le condizioni ambientali esterne e la temperatura in diversi punti all'interno del manufatto (Figura 16); si è altresì provveduto al rilievo delle fessure. Ogni concio è stato osservato giornalmente durante un periodo di una settimana, e a cadenze fissate nell'arco di un mese, per verificare l'insorgere delle fessure, che risultano sistematicamente passanti attraverso la parete.

I risultati ottenuti sono raggruppati nella in Figura 17.

Si è verificato che l'aggiunta di 15 kg/m<sup>3</sup> di additivo causa l'assenza di fessure almeno per 7 giorni, cioè fino a fenomeno termico ultimato.

Come si è detto, la sperimentazione è stata programmata in modo da valutare l'effetto dell'additivo espansivo sulle variazioni dimensionali di origine termica. Per evitare le fessure dovute all'effetto del ritiro di essiccamento che insorgono dopo i 7 giorni occorre considerare un dosaggio maggiore e utilizzare anche additivi liquidi, indicati come SRA (Shrinkage Reducing Admixture).

## 6. Conclusioni

I problemi di fessurazione dovuti a fenomeni termici su manufatti in cemento armato sono notoriamente frequenti. Il progettista dovrebbe prevederli e prendere in considerazione in fase di progettazione le misure tecnologiche

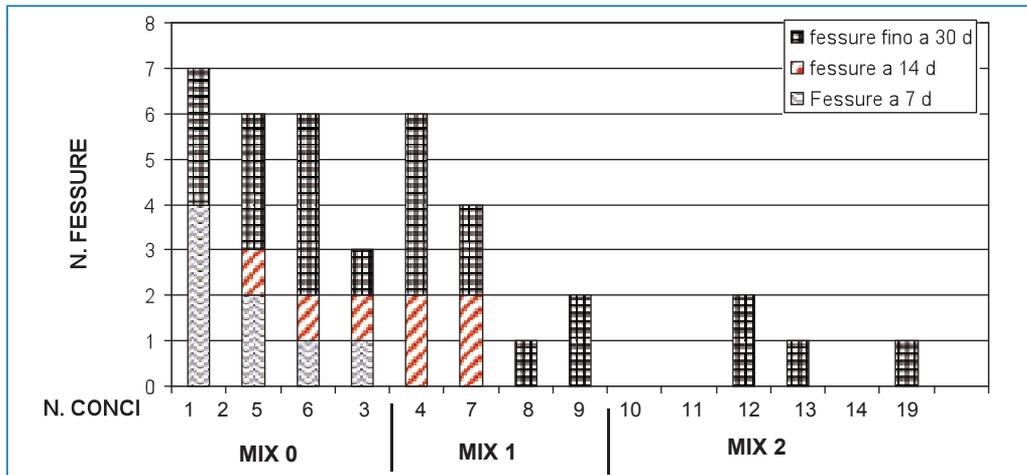


Fig. 17 - Risultati della sperimentazione.

più idonee a seconda del caso. Gli scriventi, nella necessità di fronteggiare tali problemi, hanno sperimentato diverse soluzioni, tra le quali alcune si sono rivelate particolarmente efficaci.

Il ventaglio delle soluzioni comprende sia interventi molto semplici come l'aggiunta di additivi espansivi sia interventi più impegnativi che richiedono consistenti oneri quale un sistema di raffreddamento. La soluzione più appropriata va studiata, durante la fase di

progetto, a seconda delle caratteristiche del manufatto e delle problematiche connesse.

### Ringraziamenti

Le ricerche di cui si riferisce nella presente nota sono state rese possibili dalla collaborazione, a volte entusiastica, dei tecnici di numerose imprese, produttori di materiali, progettisti e altre figure professionali. Gli autori desiderano rivolgere a tutti un sentito ringraziamento.

### 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 fessurazione da ritiro termico" In Concreto 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).