

Utilizzo di additivi espansivi per fronteggiare i fenomeni di fessurazione da ritiro termico

Use of expansive admixtures to minimize thermal shrinkage cracking

V. Alunno Rossetti, A. Ferraro, G.Ranzo, F. Zenone , S. Zampaletta

1 Premessa e scopo del lavoro

Fenomeni termici durante la prima fase di maturazione del calcestruzzo portano frequentemente alla fessurazione dei manufatti.

Nell'ambito di un'attività di studio su soluzioni sia tecnologiche sia ingegneristiche volte ad eliminare o a limitare i fenomeni di fessurazione termica, che tra l'altro ha portato all'impiego di sistemi di raffreddamento dei manufatti [1] è stato avviato un programma di ricerca allo scopo di valutare l'efficacia dell'aggiunta di additivi espansivi al calcestruzzo.

1.1 La fessurazione da ritiro termico

Una tipica manifestazione delle fessure da ritiro termico ricorre nei manufatti del tipo muro-basamento, realizzati generalmente in due tempi: il basamento (platea, muretta) viene gettato in un primo tempo e lo sviluppo del calore di idratazione del cemento è praticamente esaurito al momento del getto dell'elevazione (parete, piedritto). Nella parte verticale la temperatura raggiunge un massimo (entro uno o due giorni) e poi decresce fino a quella ambiente. La fase di riscaldamento causa una dilatazione del calcestruzzo, che non essendo del tutto libero di dilatarsi, genera modeste sollecitazioni di compressione ben tollerate dal conglomerato. Invece, la successiva fase di raffreddamento e contrazione, 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 [2] (il basamento gettato precedentemente).

Per evitare l'insorgere della fessurazione si possono prendere diverse contromisure che mirano alla variazione del regime termico durante l'idratazione del cemento nel calcestruzzo [3], tra le quali: la composizione della miscela, l'utilizzo di circuiti raffreddanti interni all'elemento, la variazione della temperatura iniziale del calcestruzzo o il tempo di mantenimento della casseratura. Tali metodologie spesso sono impraticabili, in particolar modo se i fenomeni non sono stati previsti in sede di progettazione: in corso d'opera possono esserci impedimenti quali l'impossibilità di intervenire sul mix-design, la dispendiosità del procedimento di raffreddamento della miscela o del manufatto, l'impossibilità di aumentare i tempi di casseratura per vincoli temporali etc. L'utilizzo di un additivo espansivo potrebbe essere la soluzione più semplice da adottare.

1.2 L'azione degli additivi espansivi

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

Infatti, 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 delle tensioni di compressione nel calcestruzzo. Si crea quindi uno stato di precompressione chimica indotta dall'additivo espansivo. In seguito al raffreddamento, nella struttura si avranno tensioni di trazione ridotte o annullate e la corrispondente riduzione o annullamento delle fessure.

Tentativi sul campo sono stati svolti negli ultimi anni in Giappone [4,5,6], ma le informazioni sui risultati sono scarse e poco accessibili.

Allo stesso scopo di ridurre il ritiro del calcestruzzo, vengono utilizzati un tipo di additivi liquidi, spesso indicati come SRA (Shrinkage Reducing Admixture). Nella letteratura recente vi sono indicazioni relative all'uso degli additivi espansivi in combinazione con gli additivi SRA [7]; i risultati ottenuti dimostrerebbero una maggiore efficacia rispetto all'utilizzo separato.

In questo contesto non si è ritenuto necessario l'uso di SRA in combinazione con l'espansivo, anche se alcuni autori hanno osservato una certa efficacia a breve termine [7].

1.3 Scopo della sperimentazione

La sperimentazione è stata programmata in modo da valutare l'effetto dell'additivo espansivo sulle variazioni dimensionali di origine termica, senza prendere in considerazione la possibilità di ridurre l'effetto del ritiro da essiccamento.

A tale scopo si è provveduto:

- ad individuare un manufatto in costruzione, idoneo a realizzare le prove,
- a simulare con un programma apposito ad elementi finiti il fenomeno di ritiro termico, valutando la conseguente tensione di trazione (che porta a fessurazione), da attendersi nel manufatto considerato,
- a valutare mediante il procedimento delineato nella ACI 223 [8] (adattato a metodi di prova europei) l'espansione necessaria per compensare il ritiro e il dosaggio di espansivo richiesto,
- a determinarne l'effetto confrontando la fessurazione su manufatti realizzati con calcestruzzo additivato e non.

2 Parte sperimentale

2.1 Caratteristiche del manufatto

Si è individuato come manufatto appropriato alla sperimentazione il muro di contenimento 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 (Figura 1)



Figura 1 - Il concio 6 pronto per il getto

Lo spessore del muro oggetto della sperimentazione è di 0,40 m, sufficiente per l'osservazione dei fenomeni da ritiro termico. La variabilità della lunghezza dei conci, tra 16 e 27 m, per un totale di 428 m, è dovuta alla geometria del muro perimetrale come si evince dalla pianta in Figura 2. La realizzazione a conci e la loro numerosità costituiscono una popolazione sufficientemente ampia per lo studio del fenomeno.

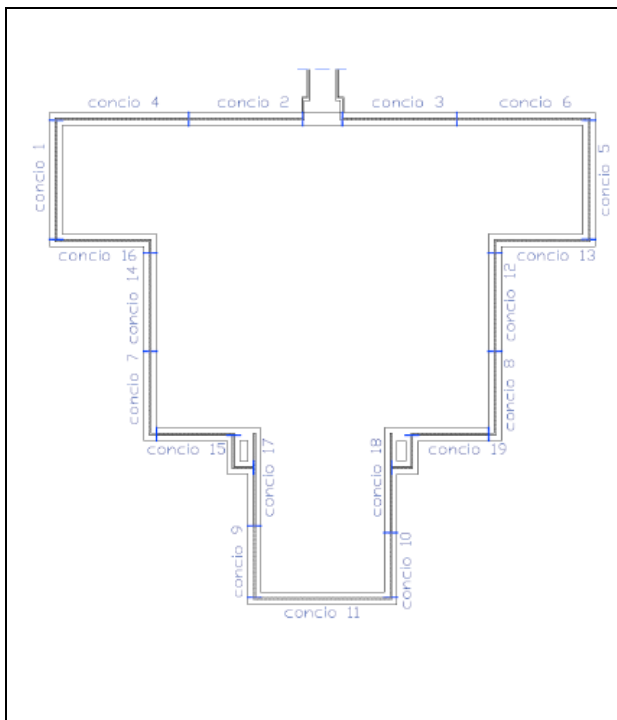


Figura 2 - Pianta del muro di sostegno perimetrale della piscina esterna: evidenziata la suddivisione dei 19 conci

I conci sono stati gettati alternativamente con miscele di calcestruzzo con e senza additivo, dal 25 settembre al 21 novembre, in modo che le condizioni ambientali, di maturazione e di esecuzione fossero simili per le varie miscele, pur nel procedere della stagione.

2.2 Simulazioni

Il comportamento termico e il rischio di fessurazione del manufatto sono stati studiati anche mediante simulazioni, impiegando uno specifico software agli elementi finiti.

Il risultato di ciascuna simulazione deriva da un determinato set di condizioni e costituisce allo stesso tempo un bilancio termico e uno studio dei campi termici e tensionali all'interno del manufatto, dai quali dedurre il rischio di fessurazione.

I dati di input richiesti per la simulazione 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 in funzione della maturità del calcestruzzo,
- andamento della temperatura dell'ambiente,
- velocità del vento,
- caratteristiche di scambio termico dei materiali usati per le cassaforme.

Le informazioni relative sono state ottenute mediante prove, sia in cantiere che in laboratorio e da dati dei fornitori; l'attendibilità dei risultati che si ottengono è legata alla bontà dei dati disponibili.

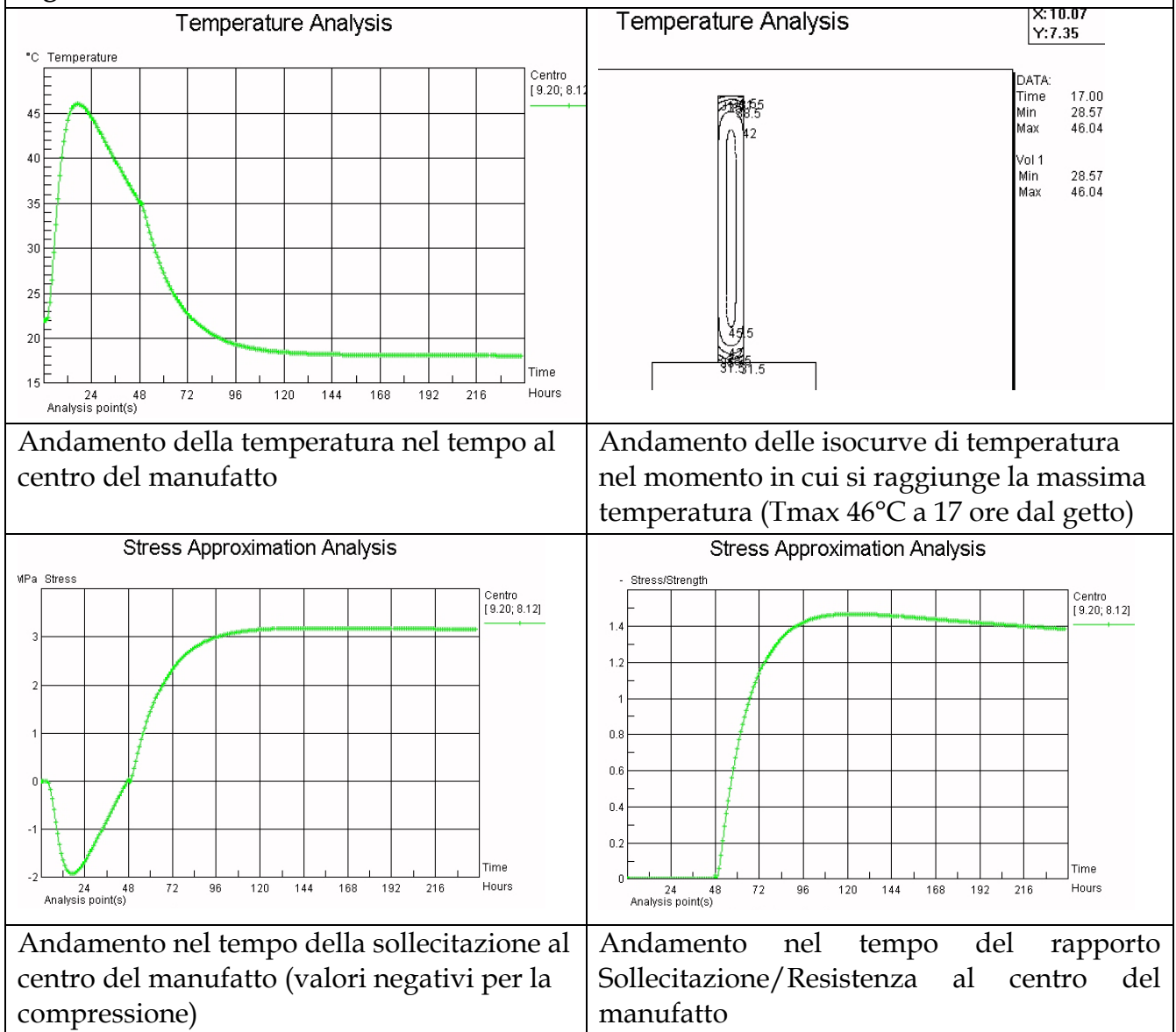
Vengono riportati i risultati di una simulazione (mix senza additivo, Figura 3), in particolare l'andamento della temperatura e la curva del rapporto stress/strength (sollecitazione/resistenza) nel tempo, al centro del manufatto e la distribuzione del campo termico nel momento in cui si raggiunge la temperatura massima. Da notare l'elevato rapporto stress/strength, che rende la fessurazione inevitabile.

Ovviamente si deve ricordare che al ritiro termico si sovrappone il ritiro da essiccamento (che inizia dopo lo scassero), che a 4 giorni, nella prova standard raggiunge circa 130 $\mu\text{m}/\text{m}$.

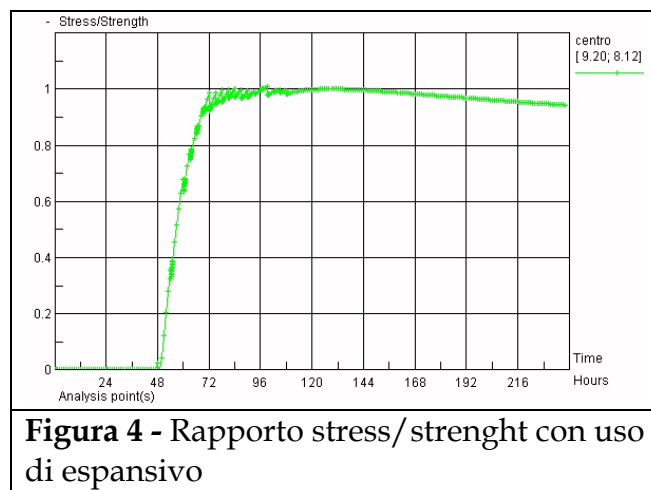
I risultati ottenuti dalla simulazione sono molto simili ai dati riscontrati in sito, sia in termini di andamento della temperatura all'interno del concio, sia per la tempistica dell'insorgere delle fessure. Per semplicità di lettura dei risultati si è considerata una

temperatura costante di 18 °C, una velocità del vento di 1.5 m/s, analoghi a quelli rilevati durante i getti; temperatura iniziale del calcestruzzo, 22 °C e scassero a 48 ore.

Figura 3 – Risultati della simulazione



In base ai dati precedenti, tenendo conto delle indicazioni della ACI 223-97 si è provveduto ad individuare il livello di espansione nel manufatto, occorrente a generare la sollecitazione di compressione capace di bilanciare quella di trazione dovuta al ritiro termico, tenendo conto dell'armatura longitudinale dei manufatti (circa 0.2% della sezione). Impostando una forza di compressione assiale, capace di generare una sollecitazione di compressione che arrivi a 3 giorni a circa 0.5 MPa, si riesce a riportare il rapporto stress/strength al massimo ad 1, come mostrato nel grafico di Figura 4.



2.3 Materiali

L'additivo utilizzato è a base di ossido di calcio e magnesio. Il dosaggio tipico per questo additivo, consigliato dalla casa produttrice, per contrastare i fenomeni di ritiro a lungo termine (da essiccamento principalmente) è tra i 20 e i 40 Kg/m³. Poiché l'obiettivo è quello di contrastare i fenomeni di deformazione termica nel breve periodo, con un'evoluzione temporale fino a 7 giorni, i dosaggi di espansivo utilizzati sono inferiori a quelli indicati dal produttore.

Si sono adottati due quantitativi di espansivo, il primo di 15 Kg/m³ (Mix 1) per i primi 4 conci, il secondo di 20 Kg/m³ (Mix 2) per gli altri 7 conci (4 conci senza additivo, Mix 0).

Il cemento utilizzato in tutte le miscele è di tipo pozzolanico (CEM IV/A-P 42,5R). Si è utilizzato un additivo superfluidificante acrilico (1.6 % in peso sul cemento).

La miscela di calcestruzzo senza additivo (Mix 0) è quella definita in base alle specifiche da capitolato, qualificata in laboratorio e in impianto di produzione prima dell'avvio della sperimentazione; le miscele con additivo derivano dalla precedente sostituendo con l'additivo espansivo il volume corrispondente di aggregato (si veda la Tabella 1).

Tabella 1 - Composizione delle miscele

Materiali	Mix 0	Mix 1	Mix 2
	Conci 1-2-5-6	Conci 3-4-7-8	Conci da 9 a 15 e 19
Classe di esposizione	XC1	XC1	XC1
Cemento IV/A-P 42.5 R, kg/m ³	350	350	350
Superfluidificante, litri	4	4	4
Additivo espansivo, kg/m ³	-	15	20
a/c	0.47	0.47	0.47
Dmax, mm	31.5	31.5	31.5
Classe di consistenza	S4	S4	S4
Classe di resistenza	C25/30	C25/30	C25/30

2.4 Condizioni ambientali

Ai fini dello studio del regime termico per ogni concio sono stati monitorati tre parametri: temperatura ambiente, velocità del vento, tempi di cassatura, essenziali per lo studio dei fenomeni termici e la probabilità di fessurazione. La velocità del vento influenza sensibilmente lo scambio termico tra le superfici del manufatto e l'ambiente e di conseguenza le temperature che si raggiungono nel manufatto. La temperatura ambiente influisce sulla temperatura iniziale del calcestruzzo fresco, sulla temperatura massima che si raggiunge all'interno e quindi sui delta termici della fase espansiva e di ritiro e sulla maturazione del calcestruzzo.

Per esigenze di cantiere i tempi di scasso sono stati differenti da concio a concio; ciò ha modificato ovviamente le condizioni di scambio termico con l'ambiente.

2.5 Misure eseguite

Durante i getti sono state monitorate le condizioni ambientali esterne e la temperatura in diversi punti all'interno del manufatto (Figura 5); si è altresì provveduto al rilievo delle fessure.

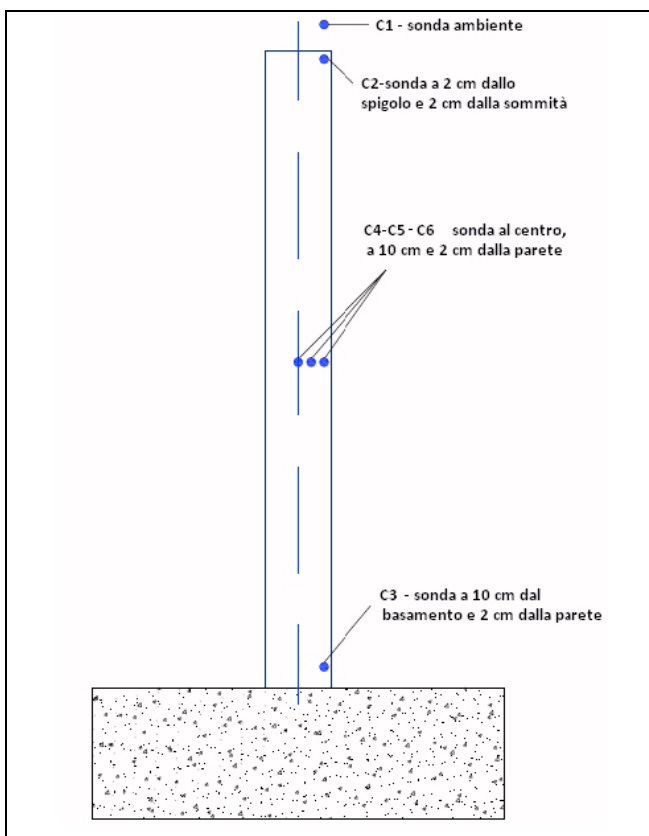


Figura 5 - Sezione del muro e disposizione delle sonde di temperatura all'interno del manufatto

Simultaneamente presso il Laboratorio è stata effettuata una sperimentazione per fornire le informazioni aggiuntive per le simulazioni e l'interpretazione dei fenomeni, sugli stessi

calcestruzzi messi in opera. In particolare, su miscele di calcestruzzo con e senza additivo espansivo sono stati eseguiti i seguenti test (in aggiunta a quelli previsti da capitolato):

- resistenza a trazione del calcestruzzo (UNI EN 12390-5);
- ritiro del calcestruzzo (UNI 6555);
- andamento della temperatura del calcestruzzo in condizioni adiabatiche con il calorimetro di Torre [9];
- calore di idratazione del cemento con calorimetro semiadiabatico (UNI EN 196-9).

2.5.1 Calore di idratazione

Vengono di seguito riportati gli andamenti (Figura 6) del calore di idratazione misurato secondo la UNI EN 196-9, sulla malta prevista da detto metodo di prova e su una malta con additivo espansivo dosato in rapporto in peso con il cemento di 5.7%, pari a quello della miscela Mix 2. Come si può osservare dal grafico e come era d'aspettarsi, la miscela con espansivo presenta un calore di idratazione apprezzabilmente più alto dovuto al contributo della reazione di idratazione dell'additivo e probabilmente a un'influenza sull'idratazione del cemento esercitata dall'idrossido di calcio sviluppato nella reazione. È anche evidente che il calore si sviluppa in notevole misura (più di due terzi del valore a tre giorni) già nelle prime 12 ore, in accordo con quanto si osserva nel manufatto.

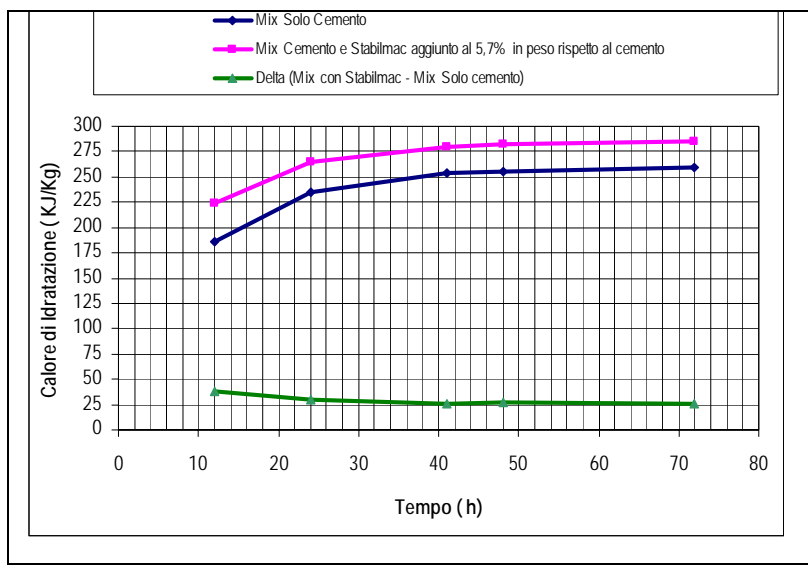
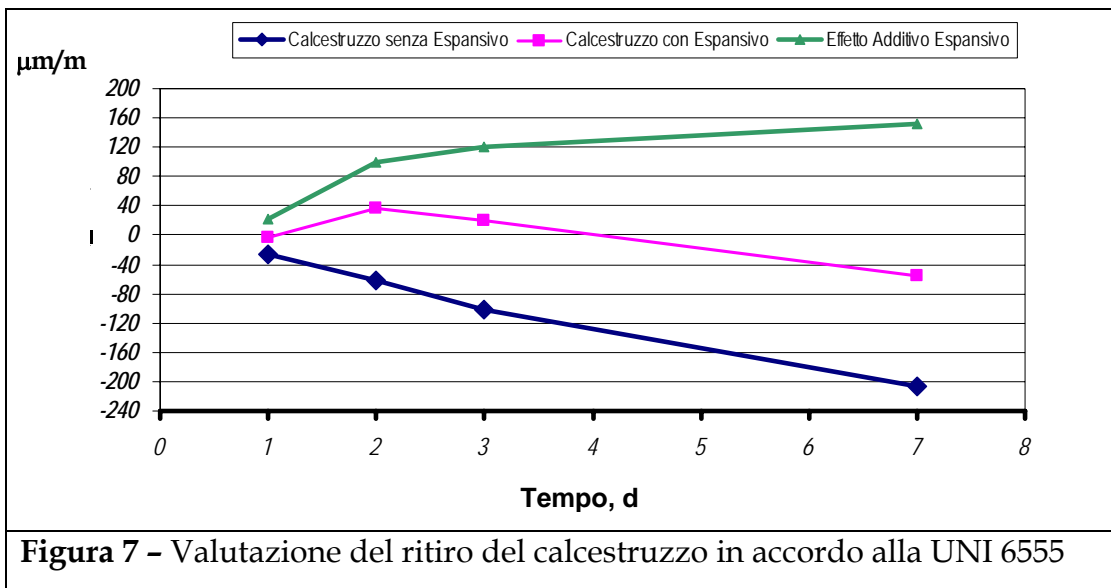


Figura 6 - Sviluppo del calore di idratazione per due diversi tipi di miscela. In basso il differenziale tra le 2 miscele (UNI EN 196-9)

2.5.2 Ritiro da essiccamento

Il diagramma (Figura 7) mostra l'andamento del ritiro da essiccamento misurato su prismi di calcestruzzo, confezionato senza e con 20 kg/m³ di additivo espansivo (ritiro idraulico secondo UNI 6555). Si può notare che l'effetto dell'espansivo ritarda l'inizio del ritiro da essiccamento di 3-4 giorni.



2.5.3 Monitoraggio della temperatura nel concio

Il rilievo delle temperature all'interno del concio è stato effettuato mediante 5 sonde disposte come in Figura 8.

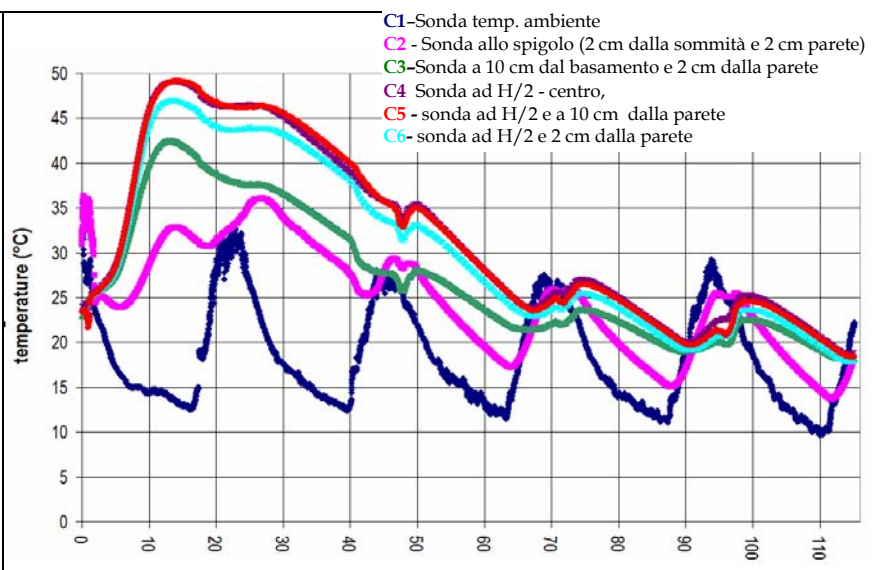


Figura 8 - Particolare disposizione sonde e loro alloggi

Figura 9 - Andamento delle temperature nel concio 9 con 20 kg/m³ di espansivo (getto 8 ottobre).

Le sonde sono state inserite, su uno stesso piano verticale, entro tubi in rame fissati ai ferri di armatura verticali; i cavi fuoriescono dalla sommità del muro. Le rilevazioni effettuate sono state due per ogni mix, per un totale di sei rilevazioni di temperatura.

La Figura 9 mostra l'andamento tipico della temperatura nei conci. Per il Mix2 rappresentato, concio 9, il picco della temperatura (49 °C) è raggiunto intorno alla 14° ora dopo il getto, quando lo sviluppo di calore è già in fase avanzata (Figura 9). Il fenomeno

termico si esaurisce a circa quattro giorni; è da notare che per i conci realizzati con il Mix 0, a questo tempo, tre conci su quattro sono già fessurati.

A circa 3 giorni (tempo minimo di formazione della prima fessura) la temperatura del cono è di circa 25 °C, e il raffreddamento dal massimo è di circa 24 °C. Per tale raffreddamento la contrazione termica può essere stimata dall'espressione:

$$\varepsilon = \Delta L/L_0 = \alpha \Delta T = 24 \cdot 10^{-5}, \text{ quindi pari a } 240 \mu\text{m/m}.$$

Ipotizzando una riduzione della sollecitazione dovuta ad effetti viscosi pari al 50% ed un modulo elastico di circa $2.5 \cdot 10^4 \text{ N/mm}^2$ (valutato dalla resistenza media a compressione), la tensione da raffreddamento si può stimare come:

$$\sigma_T = \frac{1}{2} E \cdot \varepsilon \cong 3 \text{ N/mm}^2$$

che nel caso del Mix 0 (in cui si registra lo stesso ΔT di raffreddamento) porta a rottura, mentre nella miscela additivata, la condizione di compressione indotta dall'espansivo (specialmente con il dosaggio di 20 kg) riesce a compensare tale tensione.

Nella Figura 10 vengono schematizzate le variazioni dimensionali di un manufatto realizzato con il Mix 2, associate ai diversi fenomeni che intervengono nel tempo considerati singolarmente; la variazione dimensionale termica si annulla considerando che la temperatura ambiente finale coincide con quella iniziale. Viene altresì riportato l'andamento nel tempo della somma dei loro effetti: come si può osservare, l'espansione indotta dall'additivo riesce a compensare la variazione dimensionale termica e, nei primi giorni, anche il ritiro da essiccamento. A lungo termine se il ritiro igrometrico è rilevante il manufatto si può fessurare: i conci con il Mix 2 o non si fessurano o la prima fessura non compare prima dei 20 giorni.

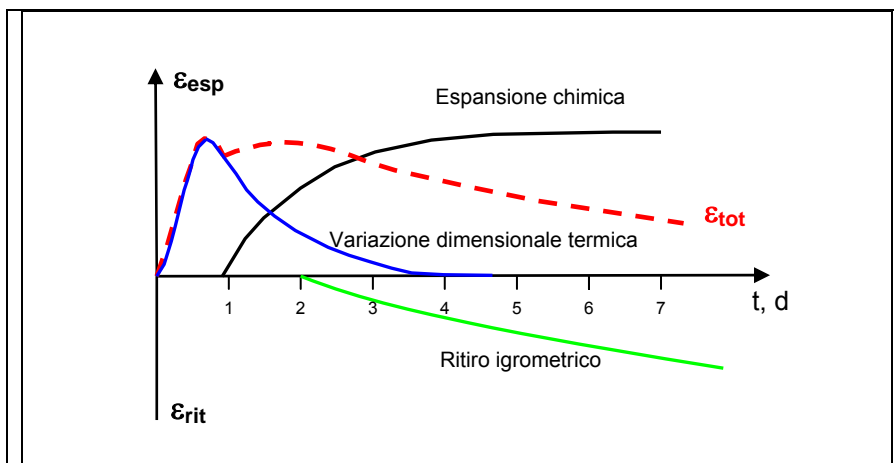


Figura 10 - Rappresentazione grafica schematica delle variazioni dimensionali del manufatto che si susseguono nel tempo dopo il getto, considerate separatamente e la loro somma.

2.5.4 Fenomeni fessurativi

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.

Queste sono state catalogate (Tabella 2) con le rispettive aperture, posizioni, altezze e angolazioni rispetto alla verticale. L'entità delle aperture è stata misurata alla loro comparsa e ad un periodo di 30 giorni di distanza per valutare gli effetti del ritiro da essiccamento sulle fessure preesistenti. Le ampiezze sono state misurate con un fessurimetro a comparazione, apprezzando un valore minimo di 0,05 mm.

Si osserva che generalmente la prima fessura si manifesta a metà circa del concio, la seconda in vicinanza di un'estremità, le successive si localizzano molto vicine alla prima e all'altra estremità; si presentano verticali tranne quelle che sorgono in vicinanza di un'estremità.

Tabella 2 - Dimensioni dei conci; fessure, sequenza di formazione e dimensioni

CONCIO		FESSURE							
N.	Sezione longitudinale L x H, m	Ordine di formazione	Tempo di formazione (d)	AMPIEZZA (mm)		L (m)	θ° (alla verticale)	POSIZIONE (m) distanza dall'estremità sinistra	
				alla comparsa	a 30 d				
MIX 0	1 24.00 x 3.78	1	3	0.35	0.60	3.78	0	11.60	
		2	4	0.10	0.25	2.23	-10	3.71	
		3	6	0.35	0.55	3.85	0	10.50	
		4	6	0.05	0.20	2.40	0	17.00	
		5	18	0.05	0.15	2.20	-8	7.10	
		6	20	0.05	0.10	1.20	0	20.40	
		7	35	0.10	0.15	2.20	0	14.30	
	2	23.00 x 3.78	1	4	0.40	0.65	3.78	0	6.50
			2	4	0.40	0.65	3.78	0	13.73
			3	11	0.05	0.25	1.60	11	12.00
			4	27	0.10	0.20	2.40	0	17.30
			5	30	0.10	0.20	1.20	0	4.70
			6	38	0.20	0.35	3.78	0	10.50
	5	27.00 x 3.78	1	7	0.10	0.30	2.50	0	20.80
			2	11	0.05	0.20	2.50	-10	8.65
			3	21	0.15	0.35	3.78	0	16.50
			4	21	0.10	0.25	3.00	0	13.50
			5	29	0.05	0.05	1.10	-12	3.40
			6	32	0.05	0.10	2.50	0	23.10
	6	25.82 x 3.78	1	3	0.40	0.55	3.78	0	12.50
			2	10	0.20	0.50	3.78	5	7.00
3			28	0.05	0.20	2.00	0	18.50	
MIX 1	3	1	9	0.25	0.50	3.78	0	14.40	
		2	10	0.05	0.10	2.12	0	11.40	
		3	16	0.05	0.05	1.10	-45	1.30	
		4	24	0.25	0.30	3.78	0	17.65	
		5	26	0.10	0.15	2.40	0	7.20	
	4	26.50 x 3.78	1	9	0.45	0.60	3.78	0	20.00
			2	14	0.25	0.40	1.20	-20	12.10
			3	23	0.30	0.35	3.85	6	22.00
			4	32	0.20	0.30	3.78	0	15.90
	7	16.70 x 4.78	1	45	0.20	0.35	2.10	0	5.40
	8	16.8 x 4.78	1	16	0.05	0.15	2.40	0	8.40

		2	40	0.20	0.30	2.50	0	11.20	
MIX 2	9	14.40 x 4.78	Nessuna fessura						
	10	13.00 x 4.78	Nessuna fessura						
	11	27.00 x 4.78	1	20	0.30	0.4	3.40	0	19.80
			2	28	0.20	0.35	4.78	-20	7.80
	12	19.70 x 4.78	1	20	0.25	0.30	4.78	0	14.20
	13	19.00 x 3.78	Nessuna fessura						
	14	19.70 x 4.78	1	21	0.05	0.15	2.00	0	6.00
19	19.00 x 4.78	Nessuna fessura							

* Lo spessore è sempre di 40 cm

Il grafico della Figura 11 evidenzia il fenomeno fessurativo rispetto alla presenza di espansivo e al tempo di osservazione delle fessure:

- solo per il Mix 0 si osserva la formazione di fessure prima dei 7 giorni, attribuibili in prevalenza al fenomeno termico, anche se a partire dalla rimozione del cassero, si verifica un contributo di ritiro da essiccamento,
- per il Mix 1, la fessurazione si manifesta dopo 7 giorni, e può essere attribuita in prevalenza a fenomeni di ritiro da essiccamento,
- per il Mix 2, la fessurazione è dovuta al solo ritiro da essiccamento (oltre i 14 d).

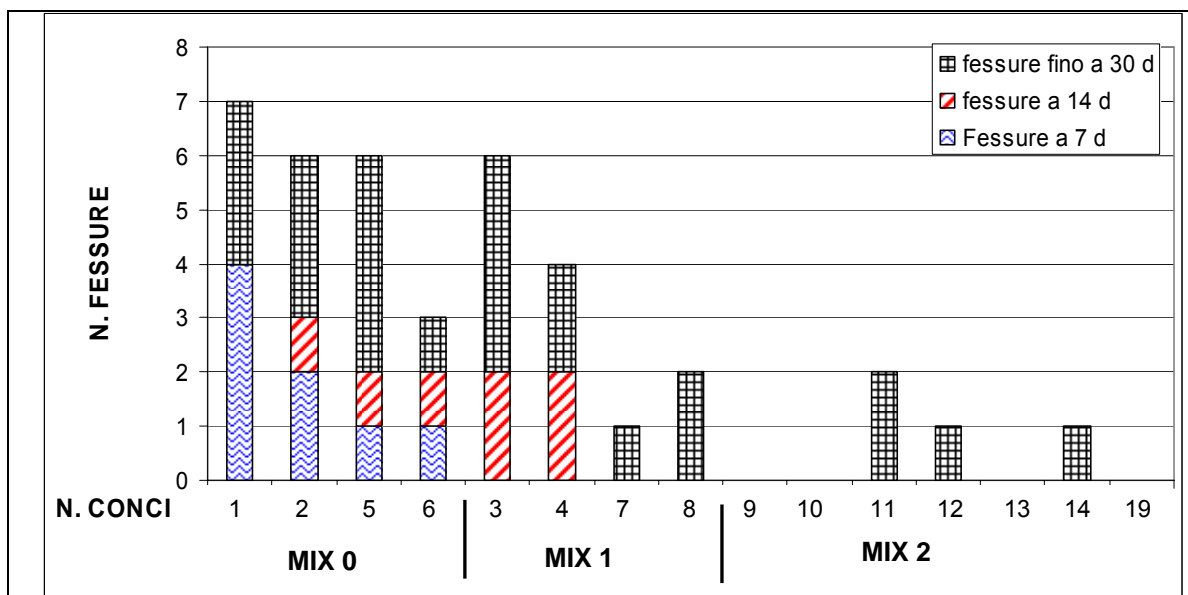


Figura 11 - Rappresentazione grafica delle fessure a diversi tempi e suddivise per i diversi conci.

Per una valutazione sintetica, si è definito un *indice di fessurazione*, cioè un parametro F (area totale di fessurazione per unità di superficie del conco), dipendente dall'area totale delle fessure, dalla lunghezza del manufatto L e dalla sua altezza H (introdotte poiché i conci sono di dimensioni diverse).

L'area dell'iesima delle n fessure (considerate di forma lenticolare oppure triangolare se a intera altezza) visibili su una parete del manufatto k è determinata misurandone la lunghezza l_i e l'ampiezza massima a_i ; l'indice F è quindi:

$$F_k = \frac{1}{L_k \cdot H_k} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{a_i \cdot l_i}{2}$$

Le dimensioni delle fessure sono espresse in mm², quelle del concio in m². I valori di F sono raccolti nella seguente

Tabella 3 e consentono una facile verifica dell'efficienza dell'impiego dell'espansivo, in perfetto accordo con le indicazioni della Figura 11.

Tabella 3 - Indice di fessurazione F (mm²/m²)

MIX	CONCIO	7 d	14 d	30 d
0	1	16.6	16.6	34.2
	2	17.4	17.9	42.3
	5	1.2	1.2	17.8
	6	7.7	11.6	22.4
	Media	10.7	11.8	29.2
1	3	0	6.0	20.9
	4	0	10.0	26.1
	7	0	0	4.8
	8	0	0	6.9
	Media	0	4.0	14.7
2	9	0	0	0
	10	0	0	0
	11	0	0	11.8
	12	0	0	7.6
	13	0	0	0
	14	0	0	0
	19	0	0	7.6
	Media	0	0	3.9

3 Conclusioni

La simulazione dei fenomeni fessurativi di origine termica e la valutazione mediante la ACI 223 del dosaggio di additivo espansivo occorrente per generare la sollecitazione di compressione richiesta hanno consentito la messa a punto e la verifica di una miscela capace di contrastare la sola fessurazione da ritiro termico, prescindendo dagli effetti del ritiro da essiccamento.

Come si può osservare dai dati raccolti e in particolare dall'esame dei valori dell'indice di fessurazione F, le fessure attribuibili esclusivamente al ritiro termico, ovvero quelle

generate prima dei 7 giorni, non sono presenti nei manufatti realizzati con i calcestruzzi additivati con additivo espansivo. Per questo tipo di manufatto un quantitativo di 15 kg/m³ è già efficace a contrastare il fenomeno da ritiro termico. I conci senza additivo si sono fessurati tutti prima dei 7 giorni. Dopo tale arco di tempo, i fenomeni di fessurazione sono dovuti al ritiro da essiccamento; l'additivo espansivo ha limitato anche l'insorgere e l'ampiezza di tali fessure. L'efficacia è maggiore con il dosaggio di 20 kg/m³.

Si conclude quindi, che nel caso di manufatti del tipo muro-basamento, in cui si possa prevedere fessurazione da effetti termici, qualora si richieda assenza completa di fessure, si debbono impiegare miscele di calcestruzzo in cui, oltre al dosaggio di additivo espansivo ed eventualmente di additivo SRA calcolati per il ritiro da essiccamento, va introdotta una ulteriore dose di espansivo, allo scopo di minimizzare il suddetto tipo di fessurazione.

Per migliorare la conoscenza del fenomeno, è in fase di sviluppo la rilevazione del campo tensionale all'interno del concio con e senza additivo, utilizzando estensimetri a resistenza, che sarà oggetto di una prossima pubblicazione.

Ringraziamenti

Si ringraziano per la fattiva collaborazione il Centro Ricerche e Qualità della Cementir Italia, PI A. Nicolucci, Ing. G. Polini, Prof. Ing. F. Sylos Labini, Geom. Prof. S. Stucchi, Geom. M. Tropeano, la Soc. Basf per la fornitura dell'additivo espansivo.

Bibliografia

- [1] 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)
- [2] V. Alunno Rossetti: "Il Calcestruzzo - materiali e tecnologia" Ed. McGraw-Hill, 2007, pag. 227-233.
- [3] R. Springenschmid and R. Breitenbücher: "Influence of constituents, mix proportions and temperature on cracking sensitivity of concrete, Thermal cracking at early ages, 1995.:
- [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)

[7] C. Maltese, C. Pistolesi, A. Lolli, A. Bravo, T. Cerulli, D. Salvioni: "Combined effect of expansive and shrinkage reducing admixtures to obtain stable and durable mortars" *Cement and Concrete Research*, Volume 35, Issue 12, December 2005, Pages 2244-2251.

[8] American Concrete Institute: ACI 223 "Standard Practice for the Use of Shrinkage Compensating Concrete"

[9] Ing. Marcello Torre: ENEL - ULP-Ufficio Controlli Tecnici - Piacenza - Sezione Materiali Civili