

CALCESTRUZZI AD ALTA RESISTENZA E FIBRORINFORZATI PER RIDURRE LA FORMAZIONE DI CAVILLATURE SU TRAVI IN CAP - SPERIMENTAZIONE SU PROTOTIPI

**Vito ALUNNO ROSSETTI¹, Antonella FERRARO¹, Andrea LO
SCHIAVO²**

¹ Università "La Sapienza", Roma, Facoltà di ingegneria.

² Rete Ferroviaria Italiana, Direzione Investimenti Ingegneria Civile.

Pubblicato in:

L'Industria Italiana del cemento, n 812, Sett. 2005, pagg. 630-642

CALCESTRUZZI AD ALTA RESISTENZA E FIBRORINFORZATI PER RIDURRE LA FORMAZIONE DI CAVILLATURE SU TRAVI IN CAP - SPERIMENTAZIONE SU PROTOTIPI

Vito ALUNNO ROSSETTI¹, Antonella FERRARO¹, Andrea LO SCHIAVO²

¹ Università “La Sapienza”, Roma, Facoltà di ingegneria.

² Rete Ferroviaria Italiana, Direzione Investimenti Ingegneria Civile.

1 INTRODUZIONE

Sulle travi prefabbricate in c.a.p. “a cassoncino” da impalcato ferroviario utilizzate correntemente per la costruzione della linea dell’Alta Velocità in Italia, si è rilevata la manifestazione quasi sistematica di cavillature; tale fenomeno ha ovviamente richiesto l’apertura di numerose nonconformità e la definizione di procedure per ripristinare gli elementi lesionati.

Il sistema fessurativo si presenta generalmente sulle anime, in corrispondenza delle testate delle travi con una lunghezza fino a circa 30-40 cm e con un’apertura di qualche decimo di millimetro. Il fenomeno si è manifestato sulla maggior parte delle travi indipendentemente dallo stabilimento di produzione, subito dopo il rilascio dei trefoli pretesi (fase in cui la forza di trazione si instaura al bordo della trave per effetto della precompressione [1]), quando il calcestruzzo, dopo la maturazione naturale o a vapore, ha raggiunto la resistenza richiesta di 42 MPa.

Nell’intento di indagare sulle cause innescanti il fenomeno e sui fattori che lo controllano, è stata realizzata una sperimentazione su prototipi di travi, che prevedeva in primo luogo l’impiego di calcestruzzi speciali e in secondo luogo modifiche delle sezioni delle travi rispetto a quelle attuali e l’aggiunta di una precompressione trasversale.

È opportuno precisare che, essendo la ricerca riferita a travi già in produzione, è stata esclusa a priori la possibilità di modificare in modo importante le sezioni, traendo il possibile beneficio dall’uso di calcestruzzo ad alta resistenza.

2 PROGRAMMA DELLA SPERIMENTAZIONE

Sono stati realizzati 27 prototipi, porzioni di travi prefabbricate e precomprese di lunghezza di 5 metri, corrispondenti ad una testata delle travi della produzione corrente della MI-BO impiegando varie tipologie di calcestruzzo:

- calcestruzzo normale Rck 55 MPa (la stessa miscela è utilizzata attualmente sui cassoncini prefabbricati della Milano-Bologna),
- calcestruzzo Rck 55 fibrorinforzato,
- calcestruzzo ad alte prestazioni Rck 85 MPa,
- calcestruzzo ad alta resistenza fibrorinforzato Rck 125 MPa,
- calcestruzzo Rck 55 con espansivo;

introducendo inoltre modifiche strutturali che non hanno comportato riduzioni di sezione:

- un ringrosso nella soletta inferiore, dalla sezione di appoggio fino all’estremità e con 12+12 trefoli inguainati per un tratto di 2.6 m dalla testata. Questi prototipi sono designati a sezione normale;

- una sezione piena: ci si riferisce a travi derivabili dalle precedenti traslando fino all'estremità la sezione presente sugli appoggi (ad esclusione del traverso);
- la precompressione trasversale inferiore, realizzata con una barra tipo dywidag da 36 mm di diametro ubicata a circa 30 cm dalla base inferiore e a circa 25 cm dalla faccia anteriore del manufatto con carico di 560 KN;
- la precompressione trasversale superiore è realizzata allo stesso modo con una barra tipo dywidag da 36 mm di diametro ubicata a circa 170 cm dalla base inferiore e a circa 25 cm dalla faccia anteriore del manufatto con carico di 560 KN;
- aggiunta di una rete metallica per il calcestruzzo Rck 55 (nel caso di sezione normale e di sezione normale con precompressione inferiore).

Nelle figure 1 e 2 sono visibili la faccia anteriore e posteriore dei prototipi.

L'elenco dei prototipi realizzati è riportato nella tabella 2.



Figura 1 – La faccia anteriore di un prototipo con precompressione inferiore.



Figura 2 – La faccia posteriore di un prototipo: le cavillature sono localizzate nella parte verticale nella posizione indicata.

3 STUDIO E MESSA A PUNTO DEI CALCESTRUZZI

La messa a punto dei calcestruzzi (escluso il calcestruzzo Rck 55) si è sviluppata in diverse fasi:

- mix-design delle miscele,
- realizzazione e prova delle miscele presso il Laboratorio del Centro Ricerche Buzzi Unicem (Guidonia, RM),
- messa a punto definitiva nello Stabilimento Sigma C Sud (Ausonia, FR).

3.1 Calcestruzzo Rck 55

Per il calcestruzzo normale Rck 55 è stata adottata la miscela attualmente utilizzata nella realizzazione di travi precomprese di calcestruzzo della stessa classe, presso lo stabilimento della Sigma C che ha progettato e fatto costruire il cassero ed ha eseguito i getti.

Questa miscela, molto simile a quella impiegata per le travi a cassoncino della Milano Bologna, è stata scelta per utilizzare gli aggregati già presenti nello stabilimento in modo da facilitare le operazioni. La composizione riportata in tabella 1 mostra i materiali e le proporzioni adoperate.

3.2 Calcestruzzo con espansivo

Questo tipo di calcestruzzo è analogo al calcestruzzo normale (Rck 55) tranne che nell'aggiunta di un additivo espansivo. Lo scopo dell'aggiunta di espansivo va messa in relazione con indicazioni fornite dalla letteratura [2] che ipotizzano un effetto benefico nell'ambito della problematica della fessurazione da ritiro termico.

3.3 Miscela del calcestruzzo Rck 55 fibrorinforzato

La prima fase sperimentale in laboratorio ha interessato miscele con 400-500 kg di cemento per m³, con impiego anche di fibre di acciaio (Fibre Dramix della Bekaert, L = 30 mm, D = 0.62 mm dosate a 75 kg/m³), aggregato di diametro massimo di 10 mm e con maturazione a vapore; in alcune è stato utilizzato fumo di silice a diverso dosaggio (0, 5, 10% in massa rispetto alla massa di cemento). I risultati delle prove a compressione hanno evidenziato che la maggiore resistenza a compressione a 14 ore si ottiene con miscele senza aggiunte di fumo di silice (la cui presenza migliora solo la resistenza a compressione a lungo termine, come del resto era prevedibile) e con contenuto più elevato di cemento.

A seguito delle indicazioni ottenute da questi risultati, si è proceduto alla messa a punto della miscela con le attrezzature e materiali di cantiere, che ha richiesto un'aggiunta del filler calcareo e una riduzione del contenuto di fibre a 60 kg/m³ per ottenere una lavorabilità soddisfacente (si veda la tabella 1).

3.4 Calcestruzzo ad alte prestazioni Rck 85 MPa

La composizione del calcestruzzo Rck 85 MPa deriva da una serie di miscele provate in laboratorio. Gli aggregati utilizzati sono gli stessi del calcestruzzo Rck 55 (quelli disponibili nello stabilimento di prefabbricazione).

3.5 Miscela fibrorinforzate ad alta resistenza: Rck 125 MPa

Per la formulazione della miscela per il calcestruzzo fibrorinforzato Rck 125 MPa si è proceduto inizialmente ad un'attività sperimentale di laboratorio, volta a realizzare un calcestruzzo con una resistenza molto elevata a compressione e flessione. A tal fine sono state realizzate tre miscele RPC, Reactive Powder Concrete o calcestruzzo a polvere reattiva [3].

Gli impasti sono caratterizzati da un alto contenuto di cemento (900 kg/m³), elevati dosaggi di additivo superfluidificante (13 kg/m³ di prodotto secco) e fumo di silice (~ 23% della massa del cemento), da sabbia finissima di quarzo (150 – 600 µm), silice precipitata e da microfibre di acciaio ottonato della Bekaert tipo "Dramix OL 13/16" (D = 0.16 mm, L = 13 mm).

Sono stati utilizzati oltre alla maturazione in condizioni normali (20°C U.R. 95%), anche un ciclo termico a vapore a 90°C di 6 h e una maturazione con trattamento termico a 160°C in autoclave, con ciclo di 6 h.

I valori della resistenza a compressione e flessione (valori medi di quattro provini per ciascuna condizione) sono risultati elevati, in particolare:

- nel caso di maturazione in condizioni normali sono stati raggiunti, dopo 28 giorni, valori di resistenza a compressione di 150 MPa e di resistenza a flessione di 41 MPa;
- nel caso di maturazione a vapore a 90°C sono stati raggiunti, dopo 28 giorni valori di resistenza a compressione di 160 MPa e di resistenza a flessione di 45 MPa;
- nel caso di maturazione in autoclave sono stati raggiunti, dopo 28 giorni valori di resistenza a compressione di 210 MPa e di resistenza a flessione di 50 MPa.

Questa esperienza è stata il punto di partenza nella formulazione del mix-design del calcestruzzo Rck 125 (tabella 1), per il quale era prevista, nelle condizioni di cantiere, una maturazione naturale e l'ottenimento di una resistenza a compressione abbastanza elevata al taglio dei trefoli (14 h), cercando inoltre di non accrescere eccessivamente il costo del conglomerato. È stato quindi diminuito il contenuto del fumo di silice che determina un aumento della resistenza a compressione a lungo termine, in parte a scapito di quella iniziale; è stato diminuito anche il contenuto di microfibre di acciaio (da 1,7% in volume a 1% in volume) che influenza in modo particolare la resistenza a flessione nonché la duttilità, ma soprattutto il costo del calcestruzzo. Inoltre, rispetto alla serie di miscele RPC di laboratorio, non si è ritenuto necessario l'impiego di materiali caratterizzati da particolari proprietà volte a contenere la richiesta di acqua: un cemento con contenuto di C₃A nullo e bassa superficie specifica, fumo di silice con bassa superficie specifica e assenza di incombusti.

TABELLA 1 - Composizione dei calcestruzzi utilizzati

MATERIALI	Rck 55		Rck 55 fibrorinforzato		Rck 85		Rck 125	
	%	PESI (kg/m ³)	%	PESI (kg/m ³)	%	PESI (kg/m ³)	%	PESI (kg/m ³)
Sabbia di quarzo 0-0.4 mm	-	-	-	-	-	-	33.3	424
Sabbia fina 0-2 mm	15	266	22,5	388	18	305	33.3	425
Sabbia lavata 0-4 mm	42	751	36,5	631	35	592	33.3	418
Pietrischietto 8 – 12 mm	43	771	41	706	47	796	-	-
Filler calcareo	-	-	-	42	-	-	-	-
Cemento 52.5 R	-	420	-	420	-	570	-	800
Fumo di silice	-	-	-	-	-	30	-	80
Superfluidificante a base di policarbossilati eteri	-	5.3	-	9	-	18	-	38
Acqua	-	173	-	160	-	140	-	154
Fibre Dramix o microfibre OL	-	-	-	60	-	-	-	76
a/c*		0.42		0.40		0.27		0.23
Massa volumica		2386		2416		2451		2415

* E' stato considerato il contenuto totale di acqua incluso il quantitativo apportato dall'additivo (80% in peso del prodotto).

3.6 Considerazioni economiche

Le diverse miscele utilizzate presentano ovviamente costi differenti. In particolare, il prefabbricatore ha stimato, rispetto alla miscela di base Rck 55, un incremento di 136 euro/m³ per la miscela di calcestruzzo Rck 55 fibrorinforzato, un incremento di 82 euro/m³ per la miscela calcestruzzo Rck 85 e di 770 euro/m³ per la miscela Rck 125. I costi delle miscele fibrorinforzate, specialmente il calcestruzzo Rck 125, sono ovviamente fortemente influenzate dal costo delle fibre.

In questa valutazione sono stati considerati i costi vivi sostenuti dal prefabbricatore che non comprendono tutti i costi di gestione globale.

4 RISULTATI SPERIMENTALI

Vengono di seguito analizzati i risultati ottenuti in termini di:

- caratteristiche dei calcestruzzi alla produzione, caratteristiche meccaniche e di ritiro
- effetti termici,
- grado di fessurazione che ha interessato i prototipi.

4.1 Proprietà dei calcestruzzi allo stato fresco e indurito

Su tutta la produzione del calcestruzzo sono state eseguite prove, sia nel laboratorio di cantiere che presso laboratori esterni. Oltre alla misura della lavorabilità e ai cubi per la determinazione della resistenza a compressione a 28 giorni R_{ck} e la resistenza a compressione al taglio dei trefoli R_{ckj} (misura effettuata ad Ausonia salvo per i cubi del calcestruzzo R_{ck} 125, che richiedendo una pressa di maggiore portata, sono stati schiacciati presso il Centro Ricerche Buzzi Unicem), nel corso del getto dei prototipi si è provveduto alla confezione di diversi provini, utilizzati successivamente presso il laboratorio GEOLAB di San Vittore del Lazio per la determinazione del modulo elastico, della resistenza a trazione indiretta e del ritiro, secondo la normativa UNI.

Le caratteristiche principali delle tre classi (cinque tipologie) di calcestruzzo al momento del getto dei prototipi sono elencate nella tabella 2.

Nella tabella 2 sono raccolti anche i risultati di cantiere; i valori di resistenza a compressione caratteristica R_{ck} riportati sono stati ottenuti detraendo 3.5 MPa dai valori medi delle resistenze determinate sui provini prelevati all'atto del getto. I risultati a 28 giorni ottenuti presso il laboratorio INTEC sono riportati nella tabella 3. Ciascuno dei valori tabellati è la media dei valori relativi a tre provini (per quanto riguarda la trazione indiretta i valori medi sono relativi a quattro provini per la prova a 14 h e a due provini per la prova a 28 d). Il tempo di scassero di 14 h non è stato sempre rispettato per esigenze di produzione.

4.1.1 Caratteristiche meccaniche e ritiro

I calcestruzzi realizzati hanno raggiunto resistenze caratteristiche a compressione a 28 giorni quasi sempre maggiori di quelle programmate.

L'incremento di resistenza a trazione a 28 giorni osservato con i calcestruzzi fibrorinforzati è consistente: si passa da poco più di 5 a 7.8 MPa per il calcestruzzo R_{ck} 55 e a 11.8 MPa per il calcestruzzo R_{ck} 125. Per quanto riguarda il modulo elastico si può notare come i valori misurati sono in accordo con i valori teorici proposti dall'EC 2 (tabella 3); solo il calcestruzzo R_{ck} 85 (che in realtà ha una resistenza caratteristica maggiore) sembra discostarsi dal valore teorico calcolato: nei calcestruzzi ad alta resistenza ha una notevole influenza sulle proprietà elastiche la natura dell'aggregato grosso [4]. Per quanto riguarda il ritiro, per i calcestruzzi normali ci si attende una riduzione del ritiro al ridursi dell'acqua di impasto. Nel nostro caso ciò si verifica con le miscele aventi R_{ck} 55 ma non con i calcestruzzi ad alta resistenza R_{ck} 85 e 125. Questo comportamento può essere però probabilmente spiegato ricordando il fenomeno del ritiro autogeno che diventa via via più significativo al ridursi del rapporto acqua/cemento al di sotto di 0.40 [5] anche in relazione al maggior contenuto di pasta di cemento presente nel calcestruzzo R_{ck} 125 e di conseguenza al maggiore volume soggetto a ritiro autogeno.

TABELLA 2 - Caratteristiche dei manufatti. Proprietà dei calcestruzzi allo stato fresco

TIPOLOGIA PROTOTIPO		PROT.	TEMPO MISC. min.	SLUMP	M.V. kg/m ³	RESISTENZA		TAGLIO TREFOLI (h)
						MPa		
						Rckj	Rck	
Rck 55	Sezione normale	A1	4	20	n.d.	41,8	65,3	14
		A2		21	2391	40,7	60,3	16
	Sezione normale con precompressione trasv. inf.	E1	5	21	2372	41,6	67,8	16
		E2		20	2374	57,8	67,5	91
	Sezione normale con rete	P1	4	21	2371	55,6*	66,7	72
		P2		21	2373	53,3*	61	72
		P3		22	2350	54,0	67,1	36
	Sezione normale + Rete + precompressione tr.inf	Q1	4	21	2343	46,4	63,8	38
	Sezione normale + agente espans.	O1		21	2331	38,7	61,5	14
	Sezione piena	H1	4	22	2350	43,5	61,6	16
		H2		22	2366	42,3	64,2	14
	Sezione piena precompressione trasv.inf. e sup.	K1	5	21	2361	41,6	63,3	14
K2		4	23	2352	36,2	57,8	14	
Rck 55 Fibro rinforzato	Sezione normale	B1	8	22	2406	48,1	72,1	14
		B2		23	2403	62,3*	76,3	60*
	Sez. normale + rete	N1		22	2434	62,0	80,0	38
	Sezione normale precompressione trasv. inf.	F1		22	2450	46,6	82,7	14
		F2		24	2373	n.d.	70,9	14
	Sezione piena	I1		23	2453	49,2	79,6	14
		I2		23	2410	49,2	76,0	14
Sezione piena precompressione trasv.inf. e sup.	L1	22	2416	44,6	75,2	14		
Rck 85	Sezione normale	C1	8	30	2441	63,6	94,3	19
		C2		17	2470	79,4	115,6	14
	Sezione normale precompressione trasv.inf.	G1		22	2457	50,1	99,5	16
		G2		21	2453	75,6	102,9	18
	Sezione piena precompressione trasv.inf. e sup.	M1		22	2455	68,8	94,2	16
Rck 125	Sez. normale	D1	10	\	2394	85,8	126,5	14

TABELLA 3 - Prove di laboratorio sul calcestruzzo

CALCESTRUZZO	MODULO ELASTICO, GPa				TRAZIONE INDIRETTA, MPa			RITIRO, µm/m			Rck, MPa
	18 h	28 d	EC2 (28 d)*	90 d	14 h	28 d	180d	14 d	28 d	90 d	28 d
	Rck 55 (K2)	34.3	40.1	36.8	40.5	2.5	5.1	3.8	297	299	416
Rck 55 fibroso (I2)	39.9	41.7	39.6	39.9	4.7	7.8	6.9	218	300	408	76
Rck 85 (M1)	46.1	47.2	42.4	47.4	4.0	7.1	2.9	231	251	277	94.2
Rck 125(D1)	43.1	45.1	45.9	44.6	11.4	11.8	13.0	312	384	476	126.5

* $E = 22(f_{cm}/10)^{0.3}$ con $f_{cm} = f_{ck} + 8$; f_{ck} è la resistenza caratteristica a compressione cilindrica; nel caso del calcestruzzo Rck 85 e Rck 125 è stato considerato $f_{ck} = 0.86 * Rck$

4.2 Effetti termici

Sono state rilevate le temperature, impiegando fino a sei termocoppie Fe-Costantana tipo J poste a tre diverse profondità rispetto alla superficie del calcestruzzo; si è notato che in genere le variazioni di temperatura sono risultate poco prevedibili: ad esempio nel caso dei prototipi H1, H2, K1 e K2, aventi la stessa composizione del calcestruzzo e la stessa geometria, con temperature del calcestruzzo fresco poco variabili (da 19 a 22 °C), le temperature massime raggiunte (facciata esterna) variano da 57 a 70 °C. Queste variazioni possono essere spiegate considerando che non è stato fatto alcun tentativo per controllare lo scambio termico dei manufatti e che pertanto alle variazioni della temperatura iniziale si sono aggiunte modalità diverse di raffreddamento in funzione della temperatura ambiente, dell'insolazione e della ventilazione.

Inoltre, dall'analisi dei dati di temperatura è risultato che:

- le temperature massime registrate: nell'anima (ad una profondità di 20 cm), nella faccia esterna frontale (in corrispondenza dell'asse di simmetria verticale ad una profondità di circa 5-10 cm dalla superficie) e nella parte interna della testata ad una profondità di 30-40 cm (parte massiccia) aumentano all'aumentare della temperatura del calcestruzzo fresco (all'aumentare della temperatura del calcestruzzo fresco infatti aumenta la velocità di idratazione del cemento e quindi la temperatura massima raggiunta nel manufatto, in corrispondenza della parte massiccia),
- all'aumentare del dosaggio di cemento aumenta la differenza tra la temperatura del calcestruzzo fresco e la temperatura massima raggiunta nell'anima,
- all'aumentare del dosaggio di cemento aumenta anche la differenza tra la temperatura del calcestruzzo fresco e la temperatura massima raggiunta nel calcestruzzo a 5-8 cm dalla faccia esterna anteriore,
- all'aumentare del dosaggio di cemento si ha un andamento crescente anche della variazione del ΔT_{\max} (si veda figura 3), differenza massima di temperatura tra due punti del manufatto misurata nello stesso istante. Tale valore non coincide necessariamente con la differenza tra le temperature massime raggiunte nei manufatti poiché le curve temperatura/tempo in punti diversi possono essere sfasate.

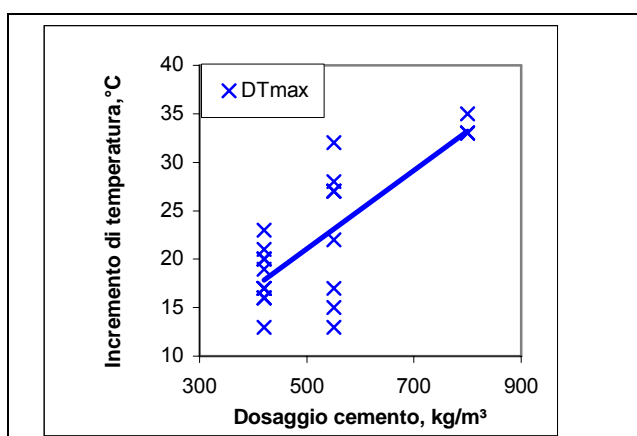


Figura 3 - ΔT_{\max} rilevato in funzione del dosaggio di cemento delle tre classi di calcestruzzo (si veda la tabella 1).

4.3 Fenomeni fessurativi

Osservando i manufatti in tempi diversi, prima e dopo il rilascio dei trefoli, nei giorni successivi allo scasso e durante la maturazione, si è notato che la maggior parte dei prototipi è stata interessata in testata da fenomeni di fessurazione, che dal punto di vista della loro localizzazione e per le loro caratteristiche morfologiche si presentano molto simili tra loro ed anche simili a quelle rilevate sui manufatti dell'Alta Velocità¹.

Quattro dei ventisette prototipi realizzati non presentano ad oggi nessuna fessura (le lesioni orizzontali sul manufatto realizzato con calcestruzzo Rck 125 sono in effetti riprese di getto e non fessure confrontabili con quelle presenti sugli altri manufatti). Inoltre, è importante segnalare che per alcuni prototipi le fessure sono state osservate già prima del rilascio dei trefoli dopo poche ore di maturazione.

4.3.1 Rilevamento delle fessure

Nella tabella 4 viene riportato, per ogni prototipo, il numero totale di fessure rilevate mediante microscopio portatile, le lunghezze e le ampiezze massime raggiunte, con le rispettive lunghezze totali di tutte le fessure presenti.

Viene riportato altresì, nell'ultima colonna, il valore w dell'apertura massima osservata, limitatamente ai dodici casi in cui tale apertura è assente o non ha superato 0,1 mm (valore limite della Normativa).

TABELLA 4 - Caratteristiche delle fessure

Tipologia prototipo	Prot.	Taglio trefoli (h)	Fessure					
			Num.fess.rilevate ad ore dal getto	Lungh.max ragg.(mm)	Ampiezze max ragg. (micron)	Lungh. Tot.	$W \leq 0,1 \text{ mm}^*$	
Rck 55	Sez. normale	A1	14	3 a 3-180 d	125-380	50-100	1515	
		A2	16	3 a 14h\13-20-60 d	235-685	80-120	1600	
	Sez. normale precompressione trasv. inf.	E1	16	3 a 14h\7-14-42 d	155-665	10-300	1020	
		E2	91	2 a 20-40 d	40-280	10\60	440	0,06
	Sez. normale con rete	P1	72	1 a 5-20 d	565	80	565	0,10
		P2	72	1 a 3-20 d	445	80	445	0,10
		P3	36	1 a 3 d	455	80	455	0,10
	Sez. normale Rete+precompressione tr.inf	Q1	38	4 a 5-20 d	120-330	120-180	910	
	Sez. attuale + agente espans.	O1	14	2 a 5-20 d	280-635	100-120	915	
	Sez. piena	H1	16	3 a 24h\20 d	180-885	40-140	1645	
H2		14	1 a 3-20 d	660	120	660		
Sez. piena precompressione trasv.inf. e sup.	K1	14	nessuna (oss.a 24h\3-5-15 d)					
	K2	14	1 a 24h\3 d	375	60	375	0,07	
Rck 55 Fibro rinforzato	Sez. normale	B1	14	3 a 37h\28 d	35-665	80-100	870	0,10
		B2	60*	nessuna (oss.24h\4-28-60 d)				0,08
	Sez. normale +rete	N1	38	2 a 24h\10-20 d	295-320	80-140	615	
	Sez. normale precompressione trasv. inf.	F1	14	4 a 7-20-35 d	35-255	40-180	740	
		F2	14	12 a 3-30 d	30-400	200-400	2005	
Sez. piena	I1	14	1 a 24h\5-25-40 d	530	60	530	0,07	

¹ Solo il prototipo M1 si è fessurato in modo decisamente diverso dagli altri e finora non spiegato.

		I2	14	1 a 24h\3 d	600	60	600	0,08
	Sez. piena precompressione trasv.inf. e sup.	L1	14	nessuna (oss.a 24h\3-5-20 d)				
Rck 85	Sez. normale	C1	19	13 a 75-120 d	15-755	60-500	5095	
		C2	14	10 a 14h\14-60 d	30-825	50-140	4495	
	Sez. normale precompressione trasv.inf.	G1	16	10 a 5 d	25-360	\	1560	
		G2	18	14 a 24h	10-940	\	3365	
	Sez. normale precompressione trasv.inf. e sup.	M1	16	7 a 5 d	500-750	\	4335	
Rck 125	Sez. normale	D1	14	nessuna				

* Con riferimento alle Norme Tecniche della L.1086

5 INFLUENZA DEI DIVERSI FATTORI SUL FENOMENO FESSURATIVO

Dal confronto tra prototipo di riferimento (sezione attuale, Rck 55) e quelli modificati (precompressione trasversale inferiore e superiore, aggiunta di rete, aggiunta di agente espansivo, sezione piena, Rck 55 fibroso, Rck 85, Rck 125) è stato osservato quanto segue:

- adoperare calcestruzzi con resistenze a compressione di progetto maggiori, senza ridurre le sezioni, non apporta alcun beneficio dal punto di vista delle fessure, anzi si è notato che i prototipi di calcestruzzo Rck 85 sono risultati i più fessurati (si veda figura 4). In effetti, si ritiene determinante, piuttosto che la resistenza in sé, il fatto che l'incremento di resistenza viene ottenuto mediante significativi aumenti del dosaggio di cemento, causando un aumento dei fenomeni termici. Del resto i calcestruzzi ad alta resistenza in genere vengono impiegati proprio per utilizzare a pieno le elevate potenzialità meccaniche (oltre che le migliori prestazioni in termini di durabilità) che consentono di progettare manufatti più esili con sezioni e spessori più contenuti, con gradienti termici più limitati.
- Il calcestruzzo Rck 125 di composizione e caratteristiche non paragonabili a tutti gli altri, non è risultato fessurato. Questo calcestruzzo oltre che ad altissima resistenza è fibrorinforzato; la presenza delle microfibre di acciaio lo rende più duttile ed ostacola la propagazione delle microfessure, migliorandone di molto il comportamento,
- a pari classe nominale di resistenza, limitatamente ai calcestruzzi Rck 55 con dosaggio quasi identico di cemento, l'incremento di resistenza a compressione al taglio dei trefoli, Rckj, cui certamente si accompagna un'accresciuta resistenza a trazione, risulta fortemente positivo (si veda la figura 5),
- esiste una notevole dipendenza del fenomeno fessurativo dalla differenza di temperatura tra la parte più calda e quella più fredda di un manufatto (ΔT_{max}), in qualsiasi momento durante la maturazione. Si deve pertanto ritenere che almeno una parte dei fenomeni fessurativi deve essere attribuita ad un effetto termico ben conosciuto e precisamente al fatto che mentre la zona corticale, a temperatura più bassa, tende a contrarsi, il nucleo centrale a temperatura più elevata tende a dilatarsi: nascono in questo modo delle coazioni che generano tensioni di trazione in superficie,
- la presenza di fibre sembra contenere il fenomeno della fessurazione: se si esclude il prototipo F2 che evidenzia dodici fessure, da considerare un dato anomalo, dei sette prototipi realizzati con il calcestruzzo Rck 55 fibrorinforzato, due non presentano fessure e in quelli che mostrano più di due lesioni queste hanno una lunghezza totale inferiore a quella dei manufatti realizzati con il calcestruzzo Rck 55 "normale" con lo stesso numero di fessure,
- l'aggiunta dell'espansivo ha prodotto una riduzione poco significativa del numero e dell'apertura delle fessure ($w > 0,10$ mm),

- la scelta costruttiva della sezione piena sembrerebbe non dare evidenti benefici nel caso in cui non è abbinata alla precompressione trasversale inferiore e superiore,
- la precompressione trasversale inferiore (considerata solo nel caso di sezione attuale), sembra del tutto inefficace a contenere il fenomeno fessurativo,
- la precompressione trasversale inferiore e superiore (nel caso di sezione piena) contribuisce positivamente a limitare la formazione di cavillature: due dei tre prototipi esenti da fessure sono stati realizzati con sezione piena con precompressione trasversale inferiore e superiore. Inoltre, anche per i prototipi realizzati con il calcestruzzo Rck 85, quelli risultati più fessurati, il prototipo con un numero minore di lesioni è stato proprio quello con la precompressione trasversale inferiore e superiore (M1) che peraltro presenta uno schema fessurativo diverso da tutti gli altri e finora non spiegato.
- l'aggiunta di una rete elettrosaldata ha avuto effetti positivi solo nel caso di sezione attuale, mentre negli altri casi il suo inserimento si è rivelato influente,
- i fenomeni fessurativi all'estremità posteriore dei prototipi (alquanto più sottile della testata) sono estremamente limitati e probabilmente riconducibili alla distribuzione non omogenea delle sollecitazioni di precompressione (che sono anche più elevate essendo la sezione minore). Il fenomeno fessurativo all'estremità (non oggetto di indagine) è contenuto e il suo schema è ripetitivo: si riscontrano da 0 a 2 fessure nell'interspazio tra due serie non simmetriche di trefoli (un caso tipico è raffigurato nella foto 2).

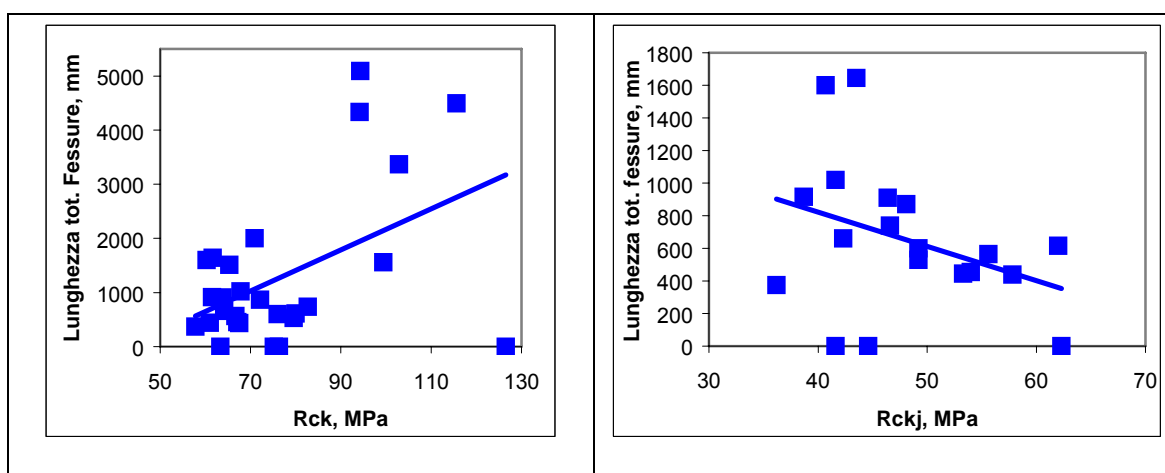


Figura 4 - Relazione tra resistenza a compressione Rck e lunghezza totale delle fessure rilevate sui prototipi (valori nella tabella 2).

Figura 5 - Fenomeno fessurativo in funzione di Rckj (per i prototipi con calcestruzzo Rck 55 e Rck 55 fibrorinforzato, valori nella tabella 2).

6 CONCLUSIONI

Alla luce dei risultati precedentemente esposti e discussi, si ritiene che l'utilizzo dei dati raccolti abbia fornito indicazioni coerenti ed interpretazioni plausibili in merito ad alcune variabili che influiscono sui fenomeni fessurativi.

Diversi fra gli accorgimenti adottati, in particolare l'impiego delle fibre, l'introduzione della precompressione trasversale inferiore e superiore, l'aggiunta di rete elettrosaldata, hanno evidenziato miglioramenti nel comportamento a fessurazione. Il calcestruzzo fibrorinforzato ha dato risultati molto buoni, in quanto dei tre prototipi non fessurati ben due appartengono a questa tipologia.

L'incremento della resistenza a compressione del calcestruzzo nel passaggio dalla classe Rck 55 alla Rck 85 (non ri-progettando e non riducendo la sezione e quindi non ottimizzando l'impiego di calcestruzzo più prestante in termini di resistenza meccanica) evidenzia un peggioramento dei risultati, in quanto l'aumento del dosaggio di cemento richiesto per aumentare le resistenze genera anche un incremento del calore sviluppato e della temperatura massima raggiunta. Ciò evidenzia l'importanza dei fenomeni termici nella manifestazione delle fessure già per un calcestruzzo Rck 55 che presenta comunque un contenuto di cemento rilevante per questo tipo di travi abbastanza massicce. Infatti fattori evidenti nella formazione delle fessure, sono apparsi l'incremento di temperatura all'interno del manufatto rispetto alla temperatura iniziale del calcestruzzo e la massima differenza di temperatura tra la superficie e il nucleo dell'elemento strutturale, rafforzando l'ipotesi di un contributo dei fenomeni termici alla fessurazione di questo tipo di travi, avanzata in altra occasione da uno degli scriventi [6]. Conferma queste considerazioni il comportamento a fessurazione della faccia posteriore dei prototipi.

Il comportamento a fessurazione (per i calcestruzzi di classe Rck 55, fibrorinforzato e normale, con pari contenuto di cemento) migliora invece apprezzabilmente all'aumentare della resistenza a compressione Rckj al momento del taglio dei trefoli, risultata diversa da caso a caso in funzione del diverso tempo di maturazione trascorso. Questo risultato permette di prefigurare un sistema produttivo nel quale il taglio dei trefoli viene ritardato proprio in funzione dei fenomeni fessurativi.

7 Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare per la collaborazione e l'assistenza: la committente RFI e in particolare l'Ing. Mele e l'Ing. Ti Salvi; l'Ing. Evangelista di Italferr; l'Ing. Pedrocco, l'Ing. Pinato e il Geom. Costanzo della Sigma C; il Geom. Gallo e l'Ing. Paris della Buzzi Unicem; il Geom. Piciacchia della Degussa.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] F. Leonhardt, C.a. & c.a.p. – Calcolo & tecniche costruttive, Ed. Scienza e Tecnica, 1980, pg. 75
- [2] R. Springenschmid, R. Breitenbücher, Influence of constituents, mix proportions and temperature on cracking sensitivity of concrete, Prevention of Thermal Cracking in Concrete at Early Ages, Rilem Report 15, 1998.
- [3] G.L. Guerrini, Applications of High-Performance Fiber-Reinforced Cement-Based Composites, Applied Composite Materials 7: 195-207, 2000.
- [4] W. Baalbaki, B. Bemnokrane, B. Tighiouart, Mechanical characteristics and modulus of elasticity of high performance concretes made with various types of coarse aggregate, Materiaux et constructions, V. 27, 1994, pp. 211-221.
- [5] V. Alunno Rossetti, Il calcestruzzo – materiali e tecnologia, Ed. McGraw-Hill, 2003.
- [6] V. Alunno Rossetti, Risultati non pubblicati.



Getto del cls 125



Fasi di produzione dei prototipi