

CINA

LA DIGA DELLE TRE GOLE

La storia

Il progetto di realizzare una diga sullo Yangtze risale al 1919, quando, in un articolo del tempo, il rivoluzionario repubblicano Sun Yat-Sen ne propose l'idea per la prima volta sottolineandone i vantaggi per l'energia e la navigazione. Circa dieci anni dopo si tentò di attuare un piano per iniziare l'opera, vanificato dalla turbolenta situazione politica cinese. Nel 1944 gli Stati Uniti offrirono il loro aiuto e avviarono la preparazione di un progetto di centrale da 105,5 megawatt ma la guerra civile bloccò il piano. Mao Zedong, dopo la nascita della Repubblica Popolare Cinese nel '49, accarezzò nuovamente l'idea della diga ma bisognerà aspettare gli anni Ottanta per l'avvio degli studi preparatori e il 1992 perché il settimo Congresso del Popolo approvi definitivamente l'opera. Questa in breve la storia della diga che in Cina considerano la più grande opera di ingegneria civile dopo la costruzione della Grande Muraglia e che già dalle dimensioni crea stupore: infatti sarà alta 185 metri e larga quasi 3 chilometri quando, nel 2009, funzionerà a pieno regime formando il più grande bacino idrico artificiale del mondo. E proprio il primo giugno del 2003 la diga delle Tre Gole ha cominciato a funzionare:



l'acqua è salita fino al livello di 135 metri e in agosto le prime gigantesche turbine si sono messe in moto per produrre l'energia elettrica di cui la Cina ha estremo bisogno. Poi si avvierà la seconda fase di costruzione e allora il livello dell'acqua dell'immenso lago artificiale raggiungerà i 175 metri. L'opera divide a metà il corso del più grande fiume dell'Asia, lo Yangtze, il Fiume Azzurro, formando un bacino di 600 chilometri quadrati, circa due volte il lago di Garda. Finora la sua costruzione è durata dieci anni comportando una spesa di 25 miliardi di euro, ma con la sua realizzazione il governo cinese è sicuro di avere risolto in buona parte il problema delle ricorrenti piene del fiume, che, solo nell'ultimo secolo, hanno causato 300mila morti e danni incalcolabili. Allo stesso tempo si sono assicurati la realizzazione della più grande centrale idroelettrica del mondo, che comincerà a produrre energia pulita fin dal 2003 al posto del più inquinante carbone, e dovrebbe essere completata, con tutte le sue 26 unità funzionanti, fra sei anni.

Problemi e risoluzione

La diga delle Tre Gole in Cina è programmata per produrre nel 2009, a pieno regime, 18 milioni di kilowatt di energia pulita di tipo idroelettrico. Per questa opera impegnativa è stato messo a punto nel 1998 un primo rapporto sul mix-design del calcestruzzo, dove venivano evidenziati alcuni problemi che riguardavano soprattutto l'esigenza di ottenere da un lato un calcestruzzo ad alta resistenza meccanica, così da far fronte agli impatti dinamici dovuti al trascinarsi dei materiali lapidei nel corso d'acqua; dall'altro, di poter avere una struttura il più possibile priva di fessure di origine termica ed igrometrica, legate entrambe ad un eccessivo dosaggio di cemento richiesto per il raggiungimento di elevate resistenze meccaniche. Sono state condotte una serie di indagini nei laboratori Mapei per ottimizzare la composizione della miscela per il calcestruzzo ad alta resistenza meccanica (40-45 MPa) e resistente all'erosione per la costruzione degli sfioratori della diga delle Tre Gole. Gli sfioratori permettono di far effluire l'eccesso di acqua dal bacino senza danneggiare la diga. L'obiettivo principale è stato quello di scegliere il contenuto di legante ottimale in questo tipo di calcestruzzo che spesso, per il suo calore di idratazione, è caratterizzato da un ritiro piuttosto elevato. Al termine della ricerca l'additivo superfluidificante, basato sul copolimero acrilico (CAE), MAPEFLUID X404* è risultato essere il migliore per il suo alto potere nel ridurre l'acqua e per la bassa perdita di lavorabilità. Le prove in loco effettuate sullo sfioratore della diga hanno mostrato che, oltre all'alta lavorabilità ed alla migliore compatibilità con il legante disponibile, MAPEFLUID X404* nei calcestruzzi C40 (40 MPa a 28 giorni) e C45 (45 MPa a 28 giorni), può aiutare a ridurre l'aumento della temperatura, provocato dal calore di idratazione, di circa 6 °C rispetto a quello registrato usando un superfluidificante a base di naftalensolfonato (SN). Il significato pratico di questo miglioramento è quello di dare all'impresa costruttrice dei mezzi addizionali per limitare le coazioni provocate dai gradienti termici al di sotto di quelle consentite, e quindi di permettere all'impresa di ridurre le fessurazioni di origine termica fino all'83%. Dal punto di vista del costo e dell'efficacia, l'uso del superfluidificante poliacrilico carbossilato può aiutare l'impresa a risparmiare nel controllo della temperatura dei getti nelle operazioni di messa in opera, senza aumentare significativamente il costo unitario del calcestruzzo. Il "Rapporto finale sulle prove di ottimizzazione del calcestruzzo", redatto in vista della seconda fase del progetto di costruzione della diga delle Tre Gole, ha evidenziato la necessità di effettuare ulteriori studi per migliorare le pre-



Foto 1 e 2.
Una vista panoramica della diga e, in primo piano, un'immagine ravvicinata degli sfioratori.



Foto 3. Tecnici impegnati nella costruzione del gigantesco sbarramento. (Foto tratta da "lo Donna", n. 37/2003, che ringraziamo).

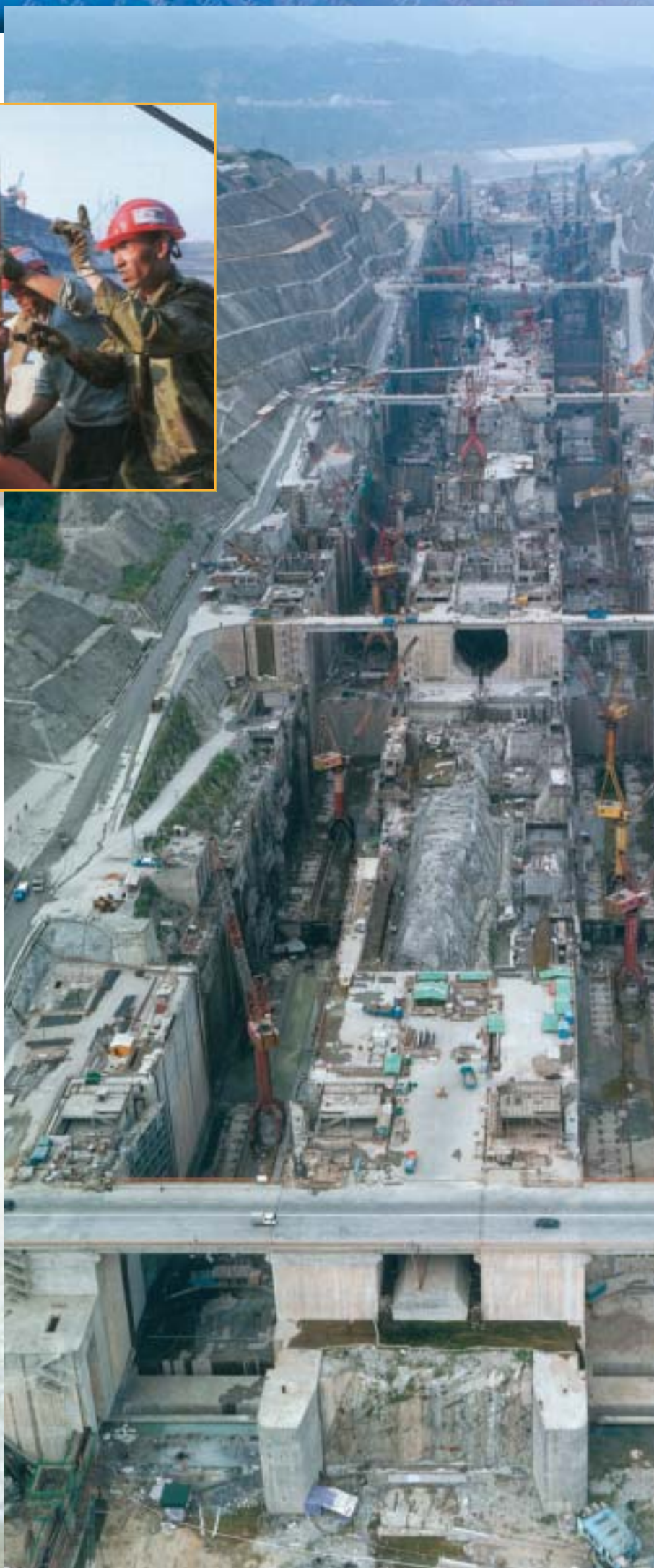
Foto 4. La "chiusa" a 5 salti (five-flight shiplock) in fase di costruzione.

Foto 5. Veduta panoramica del corpo centrale della diga.

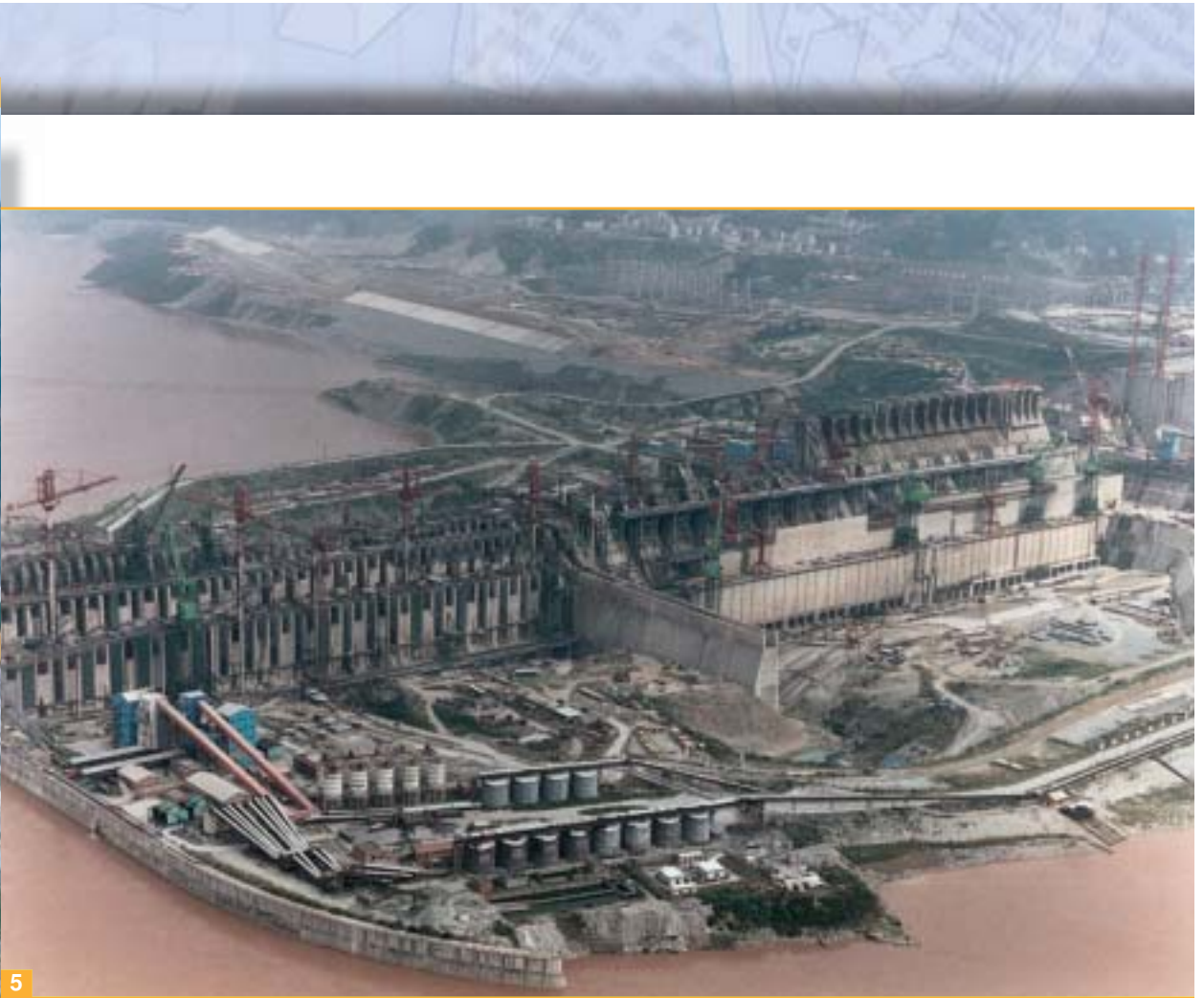
stazioni di un calcestruzzo resistente all'erosione. Gli obiettivi più rilevanti da conseguire includevano anche l'inglobamento d'aria oltre alla resistenza all'erosione, la resistenza meccanica, la durabilità, la prevenzione dalle fessure. Considerando le estreme condizioni di esercizio delle strutture dove avviene lo scarico dell'acqua nella diga delle Tre Gole, come il trasporto pesante di pietrame e l'alta velocità del flusso dell'acqua, gli studi precedenti avevano portato ad impiegare un contenuto di cemento piuttosto alto al fine di produrre calcestruzzo resistente all'erosione. Questa scelta aveva provocato diversi problemi relativi alla stabilità volumetrica, al controllo della temperatura e al totale contenuto di alcali. Per affrontare questi problemi, il Dipartimento della Costruzione del Progetto delle Tre Gole in Cina (CTGPC) ha messo a punto un progetto che includeva una serie di prove e di analisi e il progresso del progetto può essere semplificato in quattro stadi: prestazioni delle materie prime in laboratorio; prestazioni del calcestruzzo in laboratorio; prestazioni del calcestruzzo nella centrale di betonaggio; prestazioni del calcestruzzo in cantiere.

Prestazioni delle materie prime in laboratorio

Per questa serie di prove, come per molte altre della seconda fase della costruzione della diga, è stato utilizzato un cemento Portland a medio calore di idratazione di tipo 525 (cemento Jingmen). Prodotto dalla Gezhouba Cement, doveva soddisfare gli standard industriali TGPS03-1998 (più cogenti degli standard nazio-



4



5

nali cinesi GB 200-89 per il contenuto di MgO e alcali). Gli aggregati grossi venivano frantumati da graniti scavati alla base della costruzione e la composizione mineralogica evidenziava la presenza di feldspato, quarzo, mica nera e una piccola quantità di kerafillite e di clorite. L'aggregato fine usato era ottenuto per frantumazione di una diorite porfirite, caratterizzata da moduli di finezza che rientravano all'interno dell'intervallo 2,4-2,8 e la composizione mineralogica di questa sabbia includeva quarzo, anortosio, mica comune e magnetite. La cenere volante usata in queste prove era di tipo I (Pingwei) che soddisfa gli standard industriali TGPS05-1998 (più cogenti delle norme nazionali cinesi GB 1569-91). La cenere volante, con un contenuto di alcali inferiori all'1,2%, era caratterizzata dal fatto che poteva ridurre l'acqua di impasto del 10%. Sebbene la temperatura della località in cui si trova la diga delle Tre Gole vada molto raramente sotto il punto di gelo, gli aeranti sono stati specificati per gran parte dei calcestruzzi in modo da essere certi sulla durabilità della costruzione. L'agente aerante era basato su una resina del tipo DH9. L'obiettivo iniziale di questo progetto era quello di valutare i superfluidificanti disponibili sul mercato e di scegliere il calcestruzzo più adatto per resistere all'erosione. Uno dei criteri adottati fu quello di avere le prestazioni migliori rispetto a quei prodotti già approvati ed usati nella parte interna della diga, cioè il prodotto XB-1A (additivo liquido) e il prodotto JG3 (additivo in polvere), entrambi basati su polimeri di naftalensolfonato. Perciò questi prodotti basati sul naftalensolfonato sono stati

usati come punti di riferimento nelle prove successive. È stato valutato un superfluidificante basato sul CAE come uno dei riduttori d'acqua di terza generazione che non contengono né formaldeide né cloruro. Grazie al suo meccanismo completamente diverso nella riduzione dell'acqua, cioè correlato con l'impedimento sterico piuttosto che con la repulsione elettrostatica, questo superfluidificante ha non solo una capacità maggiore di ridurre l'acqua, ma anche consente di ridurre la perdita di lavorabilità degli impasti. L'Accademia delle Scienze per i Materiali da Costruzione in Cina ha condotto uno studio molto approfondito sulle prestazioni combinate di dieci additivi superfluidificanti di tipo ritardante e quattro aeranti. Le Tabelle 1A e 1B mostrano alcuni risultati di questo studio ed indicano che il superfluidificante basato sul CAE è migliore del prodotto liquido a base di naftalensolfonato (SN) in termini di una maggiore riduzione d'acqua, di un bleeding più basso, di tempi di presa più lunghi e di un ritiro più basso. Comunque entrambi i superfluidificanti soddisfano i requisiti della norma GB 8076-1997 e TGPS 05-1998. Il dosaggio dei superfluidificanti fu calibrato per ciascuno in base alla resistenza meccanica e il dosaggio ottimale è stato di 0,7% per il superfluidificante a base di SN (40% di polimero in soluzione acquosa) e dell'1% per il superfluidificante basato su CAE (30% di polimero in soluzione acquosa).

È stata anche studiata la capacità di ritardare il processo di idratazione attraverso i superfluidificanti e la Figura 1 mostra che entrambi i superfluidificanti, sia a base di SN che di CAE, possono



6

ridurre il calore di idratazione durante le prime 24 ore, tuttavia il polimero a base di CAE è più efficace. Dopo circa 48 ore, infatti, il rilascio del calore di idratazione dal provino con il superfluidificante a base di SN già si avvicina a quello del provino senza additivo, mentre occorrono più di 72 ore perché il provino contenente il polimero a base di CAE raggiunga lo stesso livello. Per soddisfare i requisiti della diga delle Tre Gole, circa il 20% del cemento Portland a medio calore di idratazione è stato sostituito dalla cenere volante di tipo I in alcune di queste prove. Il ritardo nel calore di idratazione in presenza di cenere volante e dell'additivo superfluidificante è stato molto più significativo che nel calcestruzzo confezio-

nato con il solo legante di riferimento. La Figura 2 mostra che dopo 12 ore questo calore di idratazione è del 73% più basso nei campioni con SN e dell'85% più basso nei provini contenenti il superfluidificante CAE. Occorrono, inoltre, 5 giorni per i provini con SN e più di 7 giorni per quelli con CAE perché si avvicinino al calore sviluppato dal calcestruzzo di riferimento senza additivo. Questo è in accordo con l'assunzione che l'effetto ritardante di questi additivi è molto più significativo nelle miscele di cemento Portland e cenere volante che non in quelle con il solo cemento Portland. Per minimizzare il rischio di reazione alcali-silice, il contenuto totale di alcali nel calcestruzzo fu limitato a meno di

Foto 6. Lo scorso giugno, quando le acque hanno raggiunto i 135 metri, sono state fatte le prime prove di "tenuta". (Foto tratta da "lo Donna" n. 37/2003, che ringraziamo).

TABELLA 1A
Confronto in laboratorio delle prestazioni del calcestruzzo fresco.

Tabella 1A

Superfluidificante/ Superplasticizer	Dosaggio /Dosage	Acqua/ Water	Riduzione/ Reduction	Slump	Aria/A ir	Bleeding	Tempo di presa / Setting time (min)	
	%	kg/m ³	%	mm	%	%	Iniziale/ Initial	Finale/ Final
Riferimento 1 / Reference 1	0	215	0	74	0.2	Riferimento 1 / Reference 1		
SN	0.7	173	19.5	72	1.7	61.8*	+562**	+480**
Riferimento 2/ Reference 2	0	215	0	81	0.2	Riferimento 2/ Reference 2		
CAE	1.0	161	25.1	80	0.65	30.1*	+574**	+617**
GB8076-1997: additivo superfluidificante- ritardante [4]/ GB8076-1997: retarding superplasticizer [4]			≥ 12	—	< 4.5	≤ 100	> +90	—
TGPS05-1998: additivo superfluidificante- ritardante [5] / TGPS05-1998: retarding superplasticizer [5]			≥ 18	—	≤ 3	≤ 100	> +360	—

*rispetto a quello della miscela di riferimento /with respect to that of the corresponding reference mix.

** in più rispetto al tempo di presa della miscela di riferimento/over the setting time of the corresponding reference mix.



Foto 7. Un'altra immagine dei lavori in corso che mette in evidenza l'imponenza dell'opera.

TABELLA 1B
Confronto in laboratorio delle prestazioni del calcestruzzo indurito.

2,5 kg/m³. Perciò anche il contenuto di alcali nell'additivo superfluidificante è stato tenuto sotto controllo. I risultati delle analisi chimiche hanno mostrato che il contenuto di alcali espresso come ossido di sodio equivalente nell'additivo SN ed in quello CAE è di circa 6,36% ed 1,4% rispettivamente. Riassumendo, tutti i risultati ottenuti indicano che l'additivo CAE presenta prestazioni superiori rispetto all'additivo a base di SN da quasi ogni punto di vista (reologia, durabilità, prestazioni allo stato indurito).

Prestazioni del calcestruzzo in laboratorio

Tutte le prove sui calcestruzzi sono state condotte in accordo con lo standard industriale SD105: 82. Il progetto per la diga delle Tre Gole consente un dosaggio di cenere volante di tipo I non maggiore del 20% e del 10% rispettivamente per i calcestruzzi con resistenza meccanica a 28 gior-

ni di 40 MPa (C40) e 45 MPa (C45). Esso specifica anche che la resistenza ai cicli di gelo e disgelo non sia peggiore dell'F150 (cioè il calcestruzzo deve sostenere almeno 150 cicli di ripetuti congelamenti e conseguenti disgeli), ed una resistenza alla penetrazione dell'acqua che sia W10 (cioè di sostenere con successo un aumento della pressione d'acqua a non meno di 11 bar). La Tabella 2 mostra alcune di queste prove. Confrontando i contenuti di acqua associati con i vari rapporti acqua/legante ($a/l = 0,35$ per le miscele 1-2 e 2-2), i calcestruzzi con il superfluidificante CAE richiedevano 12, 13 oppure 15 kg di acqua in meno rispetto ai calcestruzzi con l'additivo SN. Perciò, per ottenere lo stesso livello di resistenza meccanica, i calcestruzzi con il CAE richiedevano rispettivamente 30, 37 e 50 kg di legante in meno. Questo implica un rilascio nel calore di idratazione e una formazione di fessure

Tabella 1B

Superfluidificante/ Superplasticizer	Resistenza meccanica a compressione/ Compressive Strength (MPa)			Resistenza meccanica / Strength (%)*			Ritiro/Shrinkage (%)*	
	3 giorni/ days	7 giorni/ days	28 giorni/ days	3 giorni/ days	7 giorni/ days	28 giorni/ days	28 giorni/ days	90 giorni/ days
NS	19	32.8	48.6	157	179	132	100	102
CAE	21.6	30.6	47.9	191	194	142	90	87
GB8076-1997: additivo superfluidificante-ritardante [4]/ GB8076-1997: retarding superplasticizer [4]				≥ 125	≥ 125	≥ 120	≤ 135	—
TGPS05-1998: additivo superfluidificante-ritardante [5] / TGPS05-1998: retarding superplasticizer [5]				≥ 125	≥ 125	≥ 120	≤ 125	—

*rispetto al corrispondente calcestruzzo di riferimento / with respect to the corresponding reference mix.

minore per numero e per ampiezza. Questo, specialmente nei calcestruzzi per getti di massa quali le dighe, rende più semplice il controllo della temperatura durante la produzione, il trasporto, la messa in opera e la stagionatura. Poiché i contenuti di acqua e di legante sono stati ridotti nell'insieme da un minimo di 42 ad un massimo di 65 kg/m³, i calcestruzzi con il CAE risultavano essere più densi, per il maggiore contenuto di aggregato ed una maggiore resistenza meccanica, e, cosa più importante per questo tipo di calcestruzzo, presentavano una maggiore resistenza all'erosione nei confronti del corrispondente calcestruzzo confezionato con SN. In un miscelatore della capacità di 150 litri i calcestruzzi prodotti con l'additivo CAE sono stati in grado di ridurre ulteriormente l'acqua di un 10,4% (a/l = 0,40) fino al 12,3% (a/l = 0,30) rispetto ai calcestruzzi con SN. La migliore prestazione in termini di riduzione d'acqua è molto importante per i calcestruzzi di una diga, specialmente per le costruzioni che devono essere resistenti all'erosione.

Prestazioni del calcestruzzo all'impianto di betonaggio

Le prove di costruzione effettiva furono eseguite su miscele di calcestruzzi prodotti con quattro impianti di betonaggio, ciascuno della capacità di 6 m³ prodotti dalla Zhengzhou Hydro-Machinery. Il tempo reale di miscelazione è stato di soli 150 secondi ed è stato osservato che l'efficacia della miscelazione di questi superimpianti era molto maggiore di quella registrata negli impianti più piccoli usati nelle prove di laboratorio. Grazie alla presenza dei superfluidificanti basati sul CAE, gli altri ingredienti del calcestruzzo assorbivano più energia di taglio rispetto agli impianti di piccola capacità. Perciò l'additivo basato sul CAE ha potuto pienamente "estendere" le catene polimeriche laterali e sfruttare il vantaggio dell'effetto di impedimento sterico di riduzione d'acqua e di conservazione dello slump. Sulla base delle stesse proporzioni usate nelle prove di laboratorio, il primo grosso impasto di calcestruzzo risultò avere uno slump di 150 mm (Tabella 3). Anche con questo slump elevato i campioni di calcestruzzo soddisfaceva-

no tutte le prestazioni meccaniche ed anche i requisiti di durabilità. Dopo un paio di altri tentativi, il contenuto d'acqua nel calcestruzzo C40 fu ridotto a soli 92 kg/ m³. Poiché il calcestruzzo nei getti risultava essere altamente tissotropico, il calcestruzzo contenente il CAE si è dimostrato più facile da lavorare e da compattare nei getti con una certa pendenza; gli operai, però, registrarono alcune difficoltà nel mantenere piana la superficie dello sfioratore. Per questa ragione, un'ulteriore ottimizzazione è stata raggiunta riducendo il dosaggio dell'additivo CAE dall'1 allo 0,8%, quello del DH9 dal 3,0‰ all'1,0‰ per i calcestruzzi C40 e dal 2,5‰ allo 0,8‰ per i calcestruzzi C45, ed infine limitando lo slump all'impianto di betonaggio a solo 30-50 mm. La superiorità del calcestruzzo con additivo CAE rispetto a quello con il superfluidificante SN è supportata dai risultati delle prove riportati nelle Tabelle 4A e 4B. I risultati del ritiro da essiccazione dei campioni prelevati dall'impianto vengono evidenziati nella Figura 3, dove si può notare che, dopo i tre giorni, il ritiro del calcestruzzo con il superfluidificante CAE è considerevolmente minore di quello con calcestruzzo con l'additivo basato sull'SN. Questa riduzione nel ritiro è del

Figura 1

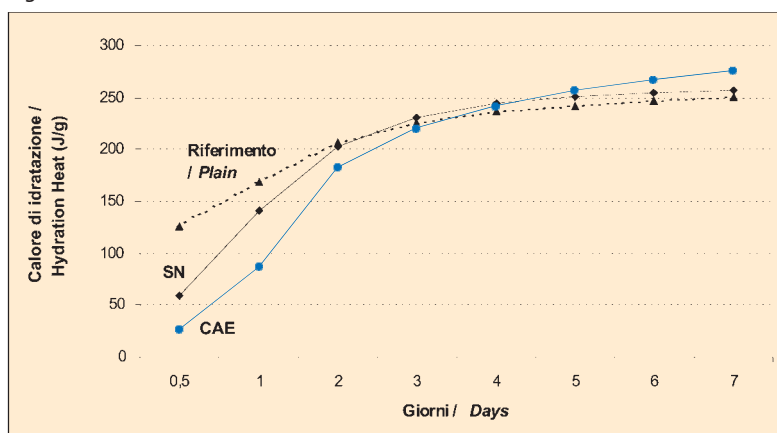


Figura 2

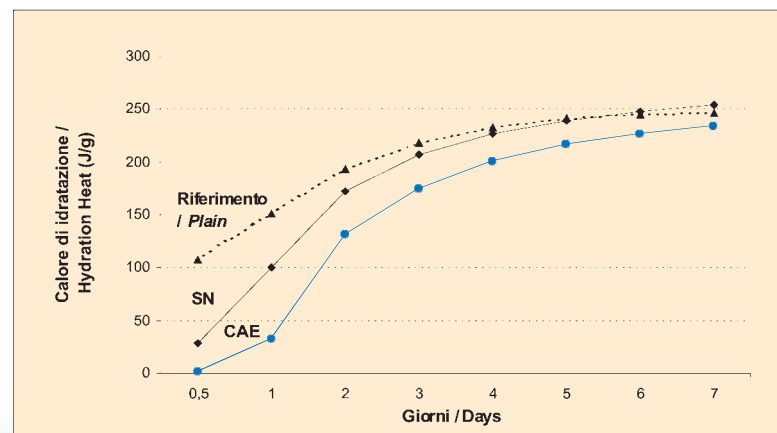


Tabella 2

Miscela/Mix	Acqua/Water	Acqua/legante (a/l) / Water/binder (w/b)	Sabbia nell'aggregato / Sand content in aggregate	Cenere volante nel legante / Fly Ash in the binder	Aerante DH9 / DH9 Air Entraining	Superfluidificante: Tipo e Dosaggio / Superplasticizer Type & Dosage	Volume di aria / Air Content	Slump	Resistenza meccanica a compressione a 28 giorni / Compressive Strength at 28 days	Resistenza all'erosione / Erosion Resistance
	kg/m ³									
1-1	103	0.40	36	20	0.70	CAE @ 1.0	3.9	55	44.8	2.92
1-2	105	0.35	34	20	1.50	CAE @ 1.0	3.6	64	56.0	3.20
1-3	107	0.30	32	20	1.50	CAE @ 1.0	3.6	65	60.9	3.58
2-1	115	0.40	36	20	0.30	SN @ 0.9	3.5	60	43.0	2.67
2-2	118	0.35	34	20	0.38	SN @ 0.9	3.8	58	47.3	3.10
2-3	122	0.30	32	20	0.50	SN @ 0.9	3.6	64	60.4	3.50

*Resistenza all'erosione, in h/cm, è il tempo in ore per consumare 1 cm di calcestruzzo secondo la norma SD 105, 1982 [6] / Erosion resistance, in h/cm, is the time (in hour) to wear-out 1 cm of concrete according to SD105, 1982 standard [6]



8

Foto 8. Veduta aerea della Diga delle Tre Gole: al centro si vedono gli sfioratori per la cui costruzione sono stati impiegati 350.000 m³ di calcestruzzo ad alta resistenza all'erosione, oggetto di questo articolo.

Figura 1. Calore di idratazione in funzione del tempo per i calcestruzzi contenenti solo cemento.

Figura 2. Calore di idratazione in funzione del tempo per i calcestruzzi contenenti cemento più cenere volante.

Tabella 2
Risultati delle prove di laboratorio sui calcestruzzi.

Tabella 3
Proporzioni del calcestruzzo nelle prove presso l'impianto di betonaggio.

Tabella 4A
Prestazioni comparative del calcestruzzo C40 prelevato all'impianto di betonaggio.

Tabella 4B
Resistenza meccanica e deformazione ultima del calcestruzzo C40.

Tabella 3

Codice di prova/ Test Code	Superfluidificante / Superplasticizer		Aerante DH9 / DH9 Air Entraining	Acqua/Water	Cemento / Cement	Cenere volante / Fly ash	Acqua/legante (a/l) / Water/binder (w/b)	Sabbia / Sand	Aggregato / Aggregate 5/20	Aggregato / Aggregate 20/40
	Tipo / Type	Dosaggio / Dosage								
C40	SN polvere/ powder	0.6 %	0.5	121	323	81	0.30	655	568	694
	CAE	1 %	3.0	107	286	71	0.30	664	597	730
C45	SN polvere/ powder	0.7%	0.45	125	375	42	0.30	635	571	698
	CAE	1 %	2.5	113	339	38	0.30	657	592	724

39-44% per il calcestruzzo C40 e del 14-24% per il calcestruzzo C45.

Prestazioni del calcestruzzo in cantiere

Arrivati allo stadio effettivo della costruzione, è stato riscontrato che il calcestruzzo con l'additivo CAE si presentava troppo fluido per quelle zone dove c'erano delle pendenze dello sfioratore. Nel gennaio 2001, ulteriori prove sono state eseguite insieme al produttore del superfluidificante con il team del progetto (CTGPC), l'impre-

sa Gezhouba Corp., e con il responsabile del controllo di qualità. Alla fine furono emessi dei nuovi criteri per il proporzionamento del calcestruzzo ed il controllo dello slump. I punti chiave includevano una riduzione del dosaggio del superfluidificante allo 0,6% per i calcestruzzi resistenti all'erosione C40 e C45 e allo 0,5% per la superficie dello sfioratore che presentava maggiori pendenze. Nei mesi di luglio e agosto la temperatura nella zona del getto variava tra i 25°C e i 35°C, con una umidità del 60%. Anche in queste

Tabella 4A

Superfluidificante / Superplasticizer	Slump	Aria /Air	Resistenza all'erosione / Erosion Resistance*	Perdita di massa provocata da un numero di cicli gelo-disgelo /Loss of Mass (%) caused by No. of Freeze/Thaw Cycles					% del modulo elastico originale dopo un numero di cicli di gelo-disgelo / % of Original Modulus vs. No. of Freeze/Thaw Cycles				
				50	100	150	200	250	50	100	150	200	250
SN polvere/ powder	36	2.6	1.48	0.32	0.62	0.95	1.24	1.51	92.3	93.7	93.1	91.5	89.3
CAE	65	3.0	1.52	0.13	0.17	0.18	0.25	0.33	92.3	92.6	95.2	94.8	93.2

* La resistenza di erosione (h/kg/m²) è il tempo in ore(h) per portare verso l'esterno 1 kg di calcestruzzo da 1 m² di superficie in accordo con lo standard SD 105, 1982 [6] / The erosion-resistance strength (h/kg/m²) is the time in hour (h) to wear out 1 kg of concrete from 1 m² surface accordi to the SD 105, 1982 Standard [6].

Tabella 4B

Superfluidificante / Superplasticizer	Resistenza meccanica a compressione/ Compressive Strength (MPa)			Resistenza meccanica a trazione / Split Tensile Strength (MPa)			Deformazione ultima a trazione / Ultimate Tensile Strain (×10 ⁶)	
	3 giorni/ days	7 giorni/ days	28 giorni/ days	3 giorni/ days	7 giorni/ days	28 giorni/ days	7 giorni/ days	28 giorni/ days
SN polvere/ powder	28.1	39.0	51.3	2.07	2.28	3.00	93.4	102
CAE	35.1	43.2	56.7	2.31	2.47	3.97	93.2	110

condizioni ambientali, il calcestruzzo con l'additivo MAPEFLUID X404* mostrò una bassa perdita di lavorabilità ed una bassa perdita di aria inglobata (Tabella 5) anche dopo aver viaggiato per centinaia di metri su un nastro trasportatore ed essere stato campionato sul sito del getto. Per controllare la temperatura nel nucleo del calcestruzzo della diga e per registrare le differenze di temperatura rispetto a quelle ambientali, alcune termocoppie furono inserite nei calcestruzzi C40 contenenti l'additivo superfluidificante SN oppure quello CAE. I dati registrati, mostrati in Figura 4, indicano che la temperatura del nucleo nel calcestruzzo con l'additivo CAE era significativamente più bassa di quella del calcestruzzo con l'additivo SN.

Sottraendo la temperatura ambientale a quella registrata nei nuclei del calcestruzzo, si ottiene la differenza di temperatura tra la parte più fredda e la parte più calda del conglomerato (Figura 5). La riduzione di 47 kg/m³ di legante nel calcestruzzo con l'additivo CAE rispetto a quello con l'additivo SN (Tabella 3) implica, a questo punto, non più semplicemente un più basso costo del materiale, ma diventa un mezzo fondamentale

Tabella 5

Prestazione / Performance	Valore iniziale / Initial Value	Slump o Aria / Slump or Air			
		30 min	60 min	90 min	120 min
Slump (mm)	65	41	33	24	15
Aria inglobata / Air Content (%)	3.0	2.8	2.4	2.8	2.6

in termini di prevenzione della fessurazione termica. Quando l'additivo a base di naftalensolfonato fu utilizzato per le parti più interne della diga, si riscontrò un aumento di temperatura di 46°C e di 50°C rispettivamente nei calcestruzzi C40 e C45, e molte fessure furono registrate nei giorni successivi (Figura 6). A partire dall'ottobre

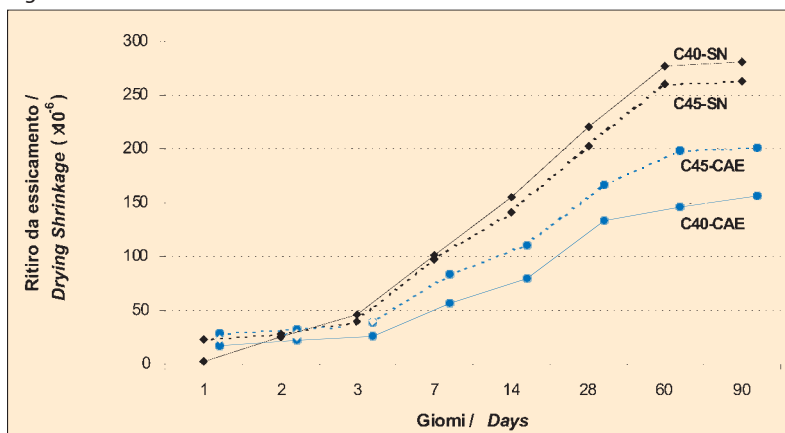
2000 si è accertato che usando un calcestruzzo con l'additivo basato sul CAE si poteva ridurre la fessurazione fino all'83%. A causa delle proprietà tissotropiche del calcestruzzo con l'additivo basato sul CAE, la compattazione nella zona del getto è stata ridotta ad un'unica volta, evitando di ripetere la compattazione come avveniva con i calcestruzzi contenenti superfluidificanti a base di SN. Il risparmio sia nella manodopera

che nel tempo ovviamente è stato importante.

La conclusione delle prove e la scelta del prodotto

Dopo questa attenta serie di prove, l'additivo iperfluidificante MAPEFLUID X404*, è stato rite-

Figura 3



nuto il migliore ad essere utilizzato nella costruzione degli sfioratori della diga delle Tre Gole. Questo additivo basato sul CAE ha una capacità più alta di riduzione dell'acqua ed un minor contenuto di alcali, ed è in grado di produrre una riduzione del calore di idratazione sviluppato durante i primi sette giorni. Il confronto con tutti gli altri superfluidificanti basati sul naftalensolfonato disponibili in Cina ha dimostrato che questo additivo presenta prestazioni decisamente

Figura 3. Ritiro da essiccamento in provini confezionati all'impianto di betonaggio con classi di resistenza 40 o 45 MPa e superfluidificanti SN o CAE.

Tabella 5. Perdita di slump e perdita d'aria nei campioni di calcestruzzo con superfluidificante CAE prelevati nel sito del getto.

Figura 4

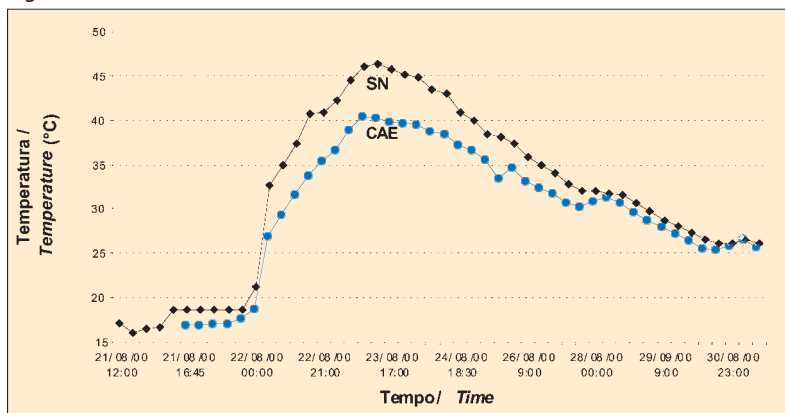


Figura 5

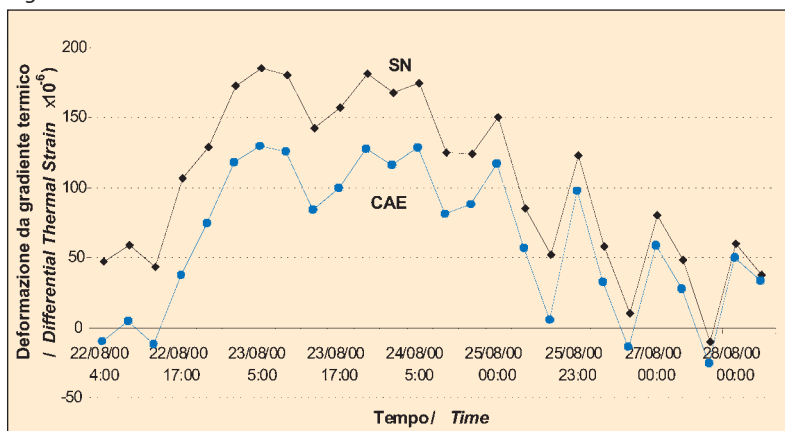


Fig. 6



9


Figura 4. Temperature del nucleo in funzione del tempo per calcestruzzi con superfluidificante SN o CAE.

Figura 5. Deformazioni termiche differenziali nel calcestruzzo contenente SN o CAE.

Figura 6. Fessurazioni di origine termica nel primo getto di calcestruzzo con il superfluidificante a base di SN.

Foto 9. La diga delle Tre Gole sul fiume Yangtze, un'opera monumentale che mostra il nuovo volto della Cina. La realizzazione di questo progetto ha comportato anche la riorganizzazione degli spazi circostanti.

migliori. In particolare, per determinati valori del rapporto acqua/legante e dello slump, l'additivo basato sul CAE è in grado di ridurre la quantità di acqua di impasto dal 10 al 12,3% in più rispetto al superfluidificante basato sull'additivo SN. L'alta resistenza meccanica prodotta con MAPEFLUID X404*, richiede 47 kg/m³ o 40 kg/m³ in meno di legante rispettivamente per il calcestruzzo con resistenza meccanica di 40 MPa e 45 MPa rispetto alle corrispondenti miscele basate sull'additivo SN. Questa riduzione provoca un minor picco termico di 6°C, particolarmente importante per la prevenzione delle fessurazioni nelle strutture delle dighe.

Il calcestruzzo con l'additivo MAPEFLUID X404*, inoltre, ha una bassa perdita di lavorabilità, un'alta tixotropia e quindi è facile da mettere in opera e da compattare, riducendo il tempo e la manodopera per la costruzione della diga. Grazie alla sua maggiore capacità di ridurre l'acqua, il calcestruzzo con MAPEFLUID X404* contiene meno legante, e questo migliora molte prestazioni, come per esempio un minor ritiro, una maggiore resistenza, un miglior comportamento nei confronti dei cicli di gelo-disgelo e una minore penetrazione dell'acqua sotto pressione; per il minor quantitativo di legante, il calcestruzzo possiede un maggior contenuto di aggregati e quindi una maggiore resistenza all'erosione. Ultimo, ma non per importanza, il vantaggio offerto dall'additivo a base di CAE anche dal punto di vista economico. Il suo utilizzo, infatti, riducendo le operazioni relative al controllo della temperatura e alla messa in opera determina un rilevante calo dei costi. 

**Il prodotto citato in questo articolo appartiene alla linea "Additivi per calcestruzzi". La relativa scheda tecnica è contenuta nel CD "Mapei Global Infonet" e nel sito www.mapei.com.*

Gli additivi per calcestruzzo Mapei sono conformi alla norma EN 934-2 e gli additivi per malte alla norma 934-4.

Mapecfluid X404: iperfluidificante per calcestruzzi a bassa perdita di lavorabilità, con elevata riduzione dell'acqua di impasto per calcestruzzi di alta ed altissima resistenza meccanica. (Qui è stato usato nella speciale versione **Mapecfluid X404/C**, appositamente studiata per questo intervento).

La ricerca continua effettuata nei laboratori Mapei ha portato all'evoluzione degli additivi acrilici della **Linea Mapecfluid**, di cui fa parte Mapecfluid X404, e ha consentito di mettere a punto i prodotti della **Linea Dynamon**, superfluidificanti acrilici di nuova generazione conformi alla norma UNI EN 934-2, di cui si parla a pag. 31 e a pag. 33.



SCHEDA TECNICA

Diga delle Tre Gole, provincia di Sichuan, Cina
Intervento: realizzazione degli sfioratori della diga
Anno di intervento: 2001-2003
Impresa: Impregilo Durez - Gtm & China Hydropower Engineering Buro n.8
Prodotto Mapei: MAPEFLUID X404,
Coordinamento Mapei: Gianluca Bianchin, Luigi Coppola, Will Lingwei Guan, Pasquale Zaffaroni.