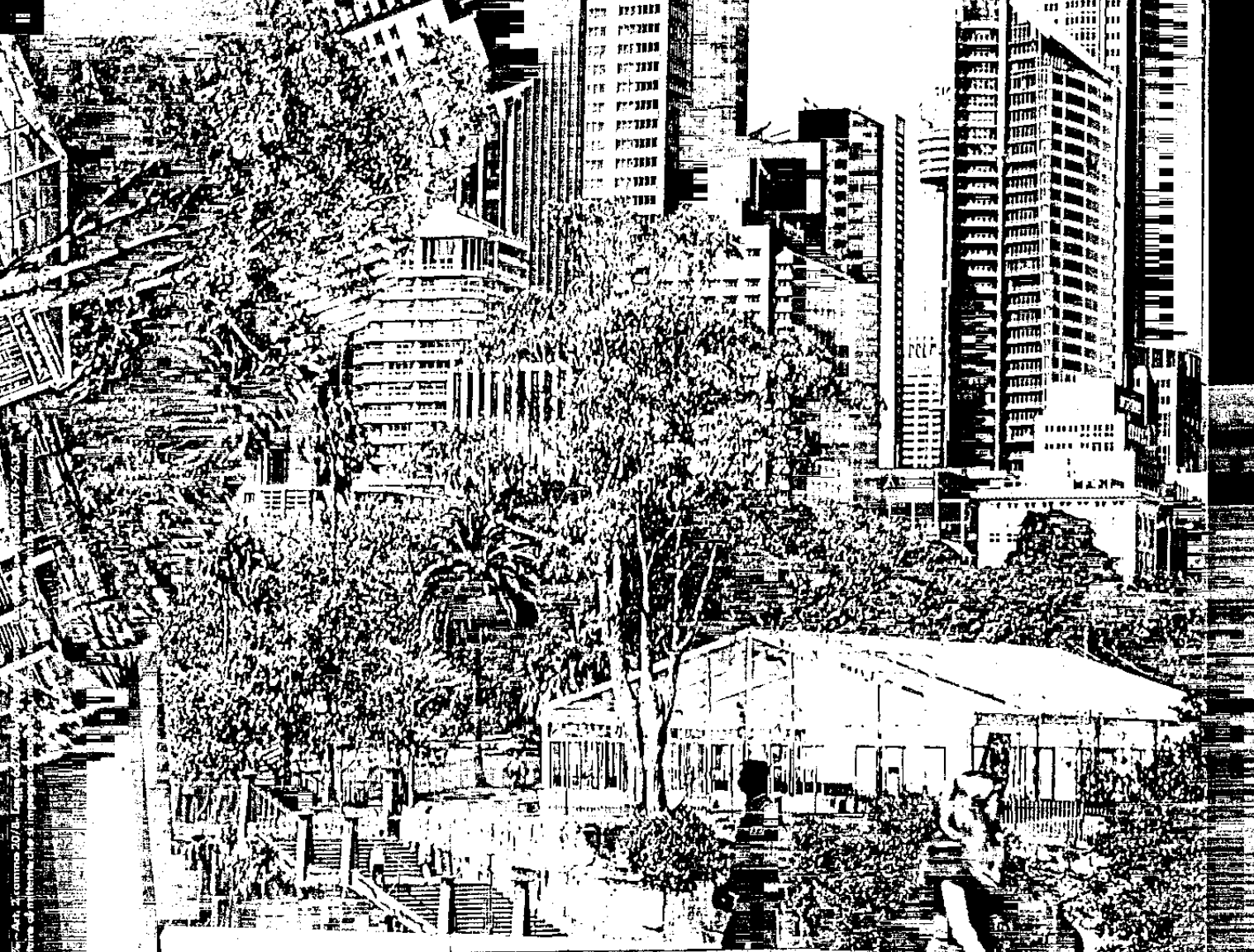




**L'industria
italiana
del Cemento**



**ASSOCIAZIONE ITALIANA
TECNICO-ECONOMICA
DEL CEMENTO**

**RIVISTA MENSILE
ANNO LXIII
GENNAIO 2003**

Ottimizzazione del calcestruzzo ad alta resistenza meccanica con superfluidificante per la diga delle Tre Gole in Cina

Optimization of the high-strength superplasticized concrete of the Three-Gorge dam in China

1. Introduzione

Il "Rapporto finale sulle prove di proporzionamento del calcestruzzo" [1] per la 2^a fase del progetto di costruzione della diga delle Tre Gole ha evidenziato che erano necessari ulteriori studi per migliorare le prestazioni del calcestruzzo resistente alla erosione. Gli argomenti più rilevanti includevano l'inglobamento d'aria oltre alla resistenza all'erosione, la resistenza meccanica, la durabilità, la prevenzione dalle fessure.

In vista delle severe condizioni di esercizio (trasporto pesante di pietrame ed alta velocità di flusso dell'acqua) delle strutture dove avviene lo scarico dell'acqua nella diga delle Tre Gole, 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 gli ardui problemi relativi alla stabilità volumetrica, al controllo della temperatura, e al contenuto totale 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. Questo articolo presenta il progresso di questo progetto attraverso quattro stadi:

- prestazioni delle materie prime in laboratorio;
- prestazioni del calcestruzzo in laboratorio;
- prestazioni del calcestruzzo nella centrale di betonaggio;
- prestazioni del calcestruzzo nelle zone di getto.

Prima di concludere, nel lavoro si accennerà brevemente anche al rapporto costi/benefici di un additivo superfluidificante di tipo ritardante basato sul copolimero di un estere acrilico carbossilato (CAE).

2. Prestazioni delle materie prime in laboratorio

Per questa serie di prove, come anche per molte della 2^a fase della costruzione della diga delle Tre Gole, è stato utilizzato un cemento Portland a medio calore di idratazione di tipo 525 (cemento Jingmen). Esso è stato prodotto dalla Gezhouba Cement, e doveva soddisfare gli standard industriali TGPS03-1998 (più cogenti degli standard nazionali cinesi GB 200-89 per il contenuto di MgO e alcali).

Gli aggregati grossi venivano frantumati da graniti scavati alla base della diga delle Tre Gole. La composizione mineralogica evidenziava la presenza di feldspato, quarzo, mica nera e una piccola quantità di keraphyllite e di clorite. La resistenza meccanica a compressione era circa 128 MPa mentre la resistenza meccanica dell'inerte saturo di acqua era circa 124 MPa.

L'aggregato fine usato era ottenuto per frantumazione di una diorite porfirica, caratterizzata da moduli di finezza che rientravano all'interno dell'intervallo 2.4-2.8. La composizione mineralogica di questa sabbia includeva quarzo, anortosio, mica comune e magnetite.

1. Introduction

The "Final report on concrete proportioning tests" for the 2nd phase of the Three-Gorge Dam construction project [1] pointed out that further studies were necessary for improving the performances of erosion-resistant concrete. Relevant issues included also strength, durability, crack-prevention, air-entraining and erosion resistance.

In view of the severe working conditions (e.g. heavily grit-carrying and high velocity flow) of the water-discharging elements of the 3-Gorge Dam, past studies recommended rather high cement content for the erosion-resistant concrete. This led to the thorny challenges of volume stability, temperature control, and total alkali content. To meet these, the Construction Department of the China Three-Gorge Project Corporation (CTGPC) set a project, under which this series of tests and analyses were carried out.

This paper presents the project progress in 4 steps:

- raw material performance in laboratory;
- concrete performance in laboratory;
- concrete performance at batching plant;
- concrete performance in casting bays.

Before concluding, this paper will also briefly touch upon the cost effectiveness of a retarding superplasticizer based on a carboxylated acrylic ester (CAE) copolymer.

2. Raw-material performance in laboratory

For this series of tests, as well as for much of the 2nd phase of the Three-Gorge Dam construction, a medium-heat portland cement of grade 525 (Jingmen Cement) was used. It was produced by Gezhouba Cement, and complied the industrial standard TGPS03-1998 (more stringent than the national standard GB 200-89 for the MgO & alkali contents). The coarse aggregates used were crushed from coarse-grained granite excavated from the base of the Three-Gorge Dam. Their mineralogical compositions comprised feldspar, quartz, black mica, and some small amount of keraphyllite or chlorite. The dry compressive strength was about 128 MPa, while the water-saturated compressive strength was about 124 MPa.

The fine aggregates used were man-made sand crushed from a porphyritic granodiorite, having the fineness moduli controlled within the range of 2.6 ± 0.2 . Their mineralogical compositions comprised quartz, anorthose, common mica and magnetite.

The fly ash used in the tests was of grade I (Pingwei) complying the industrial standard TGPS05-1998 (more stringent than the national standard GB 1596-91). The fly ash was characterised by its water reduction of more than 10 % and alkali content of less than 1.2 %. Although the temperature of the 3-Gorge Dam site goes very rarely below the freezing point, air entraining was specified for many of the

Yuanshu Zhang*, Mario Collepardi**, Luigi Coppola*** and Will Lingwei Guan****, Pasquale Zaffaroni*****

*Professor-Senior Engineer, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan, China

**Professor of Material Science & Technology, Politecnico of Milan, Italy

***Technical Assistance Manager, Mapei S.p.A., Milan, Italy

****Director of Technical Services, Mapei Far East Pte. Ltd., Singapore

*****R&D Manager of Building Materials Division, Mapei S.p.A., Milan, Italy

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 era caratterizzata dal fatto che poteva ridurre l'acqua di più del 10% ed il contenuto di alcali di poco meno dell'1,2%.

Sebbene la temperatura del sito delle Tre Gole scenda molto raramente sotto il punto di gelo, gli aeranti furono specificati per gran parte dei calcestruzzi allo scopo di assicurare la durabilità della costruzione. L'agente aerante era basato su resina del tipo DH9.

L'iniziale obiettivo 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 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 furono usati come punti di riferimento nelle prove successive.

Un superfluidificante basato sul CAE fu esaminato come uno dei superfluidificanti della terza generazione che non contenevano 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 una minore perdita di lavorabilità [2]. Queste caratteristiche saranno mostrate nel proseguo di questo articolo.

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 inglobatori di aria [3]. La Tabella 1 mostra alcuni risultati di questo studio ed indica 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. Tuttavia, entrambi i superfluidificanti soddisfano i requisiti della norma GB 8076-1997 e TGPS 05-1998. La quantità dei superfluidificanti fu aggiustata per ciascuno al suo miglior dosaggio in termini di resistenza meccanica. Il miglior dosaggio fu di 0.7% per il superfluidificante a base di SN (40% di polimero in soluzione acquosa) e 1% per il superfluidificante basato su CAE (30% di polimero in soluzione acquosa).

E' stata anche studiata [3] la capacità di ritardare il processo di idratazione attraverso i superfluidificanti. La Figura 1 mostra che entrambi i superfluidificanti a base di SN e di CAE possono ridurre il calore di idratazione durante le prime 24 ore; l'effetto del polimero a base di CAE è tuttavia più efficace. Dopo circa 48 ore, 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.

concrete types in order to ensure durability. The entraining agent was of a resin-based product, DH9.

The initial focus of this project was to assess the market-available superplasticizers and to select the best suitable for the erosion-resistant concrete. One of the criteria was to have better performances than those products already approved and used in concreting the inner dam body, namely ZB-1A (liquid) and JG3 (powder), both based on sulfonated naphthalene polymers. Therefore, these naphthalene-based products were used as the benchmarks in the analyses.

A CAE-based superplasticizer was examined as one of the "third generation" superplasticizer, containing neither formaldehyde nor chloride. Thanks to its totally different water-reducing mechanism, i. e. relying on steric hindrance instead of electrostatic repulsion, this superplasticizer admixture has not only higher water reduction capability, but also very low slump loss [2]. These characteristics will be demonstrated throughout the rest of the paper.

The China Science Academy of Construction Materials conducted a comprehensive study on the combined performances of 10 retarding superplasticizers and 4 air entrainers [3]. Table 1, shows some results of this study and indicates that the CAE-based superplasticizer is better than the liquid of the sulfonated naphthalene (SN) superplasticizer in terms of higher water reduction, lower bleeding, longer setting times, and lower shrinkage. However both the superplasticizers meet the requirements of GB 8076-1997 and TGPS 05-1998 Chinese standards. The amount of superplasticizers was adjusted each at its best dosage in terms of compressive strength. The best dosage was 0.7% for the SN superplasticizer (40% of polymer in the aqueous solution) and 1% for the CAE-based superplasticizer (30% of polymer in the aqueous solution).

The capability of delaying hydration process by the superplasticizers was also studied [3]. Figure 1 shows that both SN- and CAE-based superplasticizers can reduce the hydration-heat release within 24 hours; the CAE polymer effect is however more significant. After about 48 hours, the hydration-heat released by the specimen with the SN-superplasticizer already approaches that of the plain specimen without superplasticizer, while it took more than 72 hours for the specimen produced with CAE-polymer to reach the same level.

To cater for the 3-Gorge Dam requirements, 20 % of the medium-heat portland cement was substituted by the grade-I fly ash in some of the tests. The delay in the hydration-heat release in the presence of the superplasticizer was much more significant than that in the reference binder (= cement + fly ash) specimens. Figure 2 shows that it is 73 % lower in the SN specimens and 85 % lower in the CAE specimen at 12 hours; and it takes about 5 days for the SN specimens, and much longer than 7 day for the CAE one, to approach the heat level of the reference specimens. This agrees with the assumption that retarding effect of these superplasticizers is more remarkable on the portland cement-fly ash system than on the pure portland cement.

To minimise the risk of the detrimental alkali-silica reaction, the total alkali content in concrete for the 3-Gorge Dam was restricted to less than 2.5 kg/m³. Therefore, the alkali content in the superplasticizers



TABELLA 1A/TABLE 1A

Confronto in laboratorio delle prestazioni del calcestruzzo fresco
Laboratory comparison of performances on fresh concretes

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

TABELLA 1B/TABLE 1B

Confronto in laboratorio delle prestazioni del calcestruzzo indurito
Laboratory comparison of performances on hardened concretes

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

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

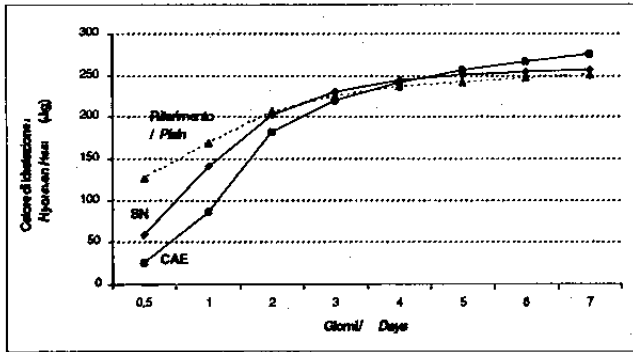
Per soddisfare i requisiti della diga delle Tre Gole, un 20% del cemento Portland a medio calore di idratazione è stato sostituito dalla cenere volante di tipo I in alcune di queste prove. Il ritardo nello sviluppo del calore di idratazione in presenza del superfluidificante è stato molto più significativo che nel legante di riferimento, e cioè cemento più cenere volante. La Figura 2 mostra che questo calore di idratazione è del 73% più basso nei campioni con SN e dell'85% più basso nei provini contenenti il superfluidificante CAE al tempo di 12 ore; occorrono 5 giorni perché i provini con SN e molto di più di 7 giorni per quelli con CAE, si avvicinino al calore

was also checked. Results show that the sodium oxide equivalent in SN and CAE is 6.36 % and 1.40 %, respectively.

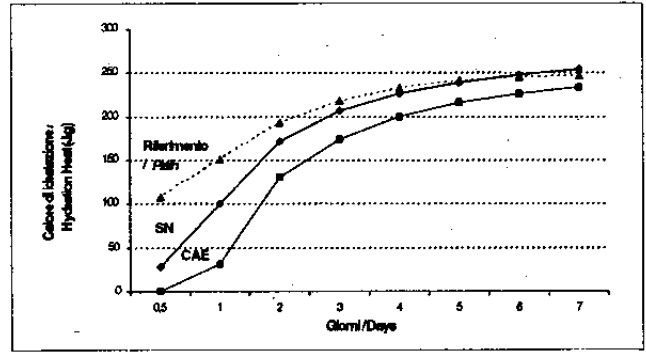
To summarise these results, the CAE-superplasticizer has superior performance over the SN-admixture in nearly all aspects.

3. Concrete performance in laboratory

All concrete tests were conducted in accordance with the industrial standard SD105: 82 [6]. The 3-Gorge Dam design allows dosage of



● Fig. 1 - Calore di idratazione rilasciato da provini di cemento con medio calore di idratazione.
● Fig. 1 - Hydration heat release from pure medium-heat Portland cement specimens.



● Fig. 2 - Calore di idratazione rilasciato da provini di cemento con 20% di cenere volante in sostituzione del cemento Portland.
● Fig. 2 - Hydration heat release from concretes with 20% Portland cement replaced by fly ash.

sviluppato dal calcestruzzo di riferimento senza additivo. Questo è in accordo con la supposizione che l'effetto ritardante di questi additivi è molto più significativo sulle miscele di cemento Portland con cenere volante che non sul cemento Portland puro.

Per minimizzare il rischio di reazione alcali-silice, il contenuto totale di alcali nel calcestruzzo per la diga delle Tre Gole fu limitato a meno di 2,5 kg/m³. Perciò, il contenuto di alcali nell'additivo superfluidificante fu anche tenuto sotto controllo. I risultati delle analisi chimiche hanno mostrato che l'ossido di sodio equivalente nell'additivo SN ed in quello CAE è circa 6,36% ed 1,4% rispettivamente.

Per riassumere questi risultati, l'additivo CAE presenta prestazioni superiori rispetto all'additivo a base di SN da quasi ogni punto di vista.

3. Prestazioni del calcestruzzo in laboratorio

Tutte le prove sui calcestruzzi sono state condotte in accordo con lo standard industriale SD105: 82 [6]. 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 giorni di 40 MPa (C40) e 45 MPa (C45). Esso anche specifica che la resistenza ai cicli di gelo-disgelo non sia peggiore di F150 (cioè il calcestruzzo deve sostenere con successo almeno 150 cicli di congelamenti e disgeli ripetuti rapidamente), ed una resistenza alla penetrazione dell'acqua che sia W10 (cioè di sostenere con successo un aumento progressivo 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 ($w/b = 0.35$ 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 minore rilascio nel calore di idratazione e una for-

grade-1 fly ash to be not greater than 20% and 10% respectively for compressive strength of 40 MPa at 28 days (C40) and 45 MPa at 28 days (C45). It also specifies the associated freezing and thawing resistance to be no worse than F150 (to successfully sustain at least 150 cycles of rapidly repeated freezing and thawing), and penetration resistance to be W10 (to successfully withstand progressively increased water pressure of no less than 11 bars). Table 2 shows some of those test results.

Comparing the water contents associated with different water-binder ratios (e.g. $w/b = 0.35$ for the mixes 1-2 and 2-2), the CAE concretes used 12, 13 or 15 kg less of water than the counterparts with SN. Hence, to achieve the same strength level, the CAE concretes respectively consumed 30, 37 and 50 kg less of binder. This implies lower hydration-heat release and fewer or narrower crack formation. Which in turn, especially for the mass concrete in dams, makes it easier for the temperature control process in concrete production, transportation, placement, and curing.

Since the water and binder content were together reduced by 42 to 65 kg/m³, the CAE concrete was denser, having higher aggregate content and 28-day compressive strength, and, more importantly for this particular type of concrete, having stronger erosion resistance, vis-à-vis that of the SN concrete.

In a nutshell, the CAE concretes produced in a small 150-litre drum mixer were able to further reduce water by 10.4% ($w/b = 0.40$) to 12.3% ($w/b = 0.30$) with respect to the SN concretes. This better performance in terms of water reduction is very important for concrete of a dam, especially for the erosion-resistant construction. The next section will show that even higher reduction of the mixing water can be realised in large-capacity batching facilities.

4. Concrete performance at batching plant

The actual construction tests were carried out on concrete mixtures produced by having 4 large batching drums of 6 m³ capacity

TABELLA 2/TABLE 2

Risultati delle prove di laboratorio sui calcestruzzi
Results of the laboratory concrete tests

Miscela Mix	Acqua Water	Acqua/legante (a/l) Water/binder (w/b)	Sabbia nell'aggregato Sand content in aggregate	Genere 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		%	%	%	%	%	mm	MPa	h/cm*
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]

mazione di fessure minore per numero e per spessore. La qual cosa a sua volta, specialmente nei calcestruzzi di massa delle dighe, rende più semplice il controllo della temperatura durante la produzione del calcestruzzo, il trasporto, la messa in opera e la stagionatura.

Poiché i contenuti di acqua e di legante furono 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 con SN.

In un miscelatore della capacità di 150 litri i calcestruzzi prodotti con l'additivo CAE furono 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 debbano essere resistenti all'erosione. Il paragrafo successivo mostrerà che anche riduzioni di acqua maggiori possono essere realizzate in impianti di grande capacità.

4. 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 fu di soli 150 secondi. Si osservò che l'efficacia della miscelazione di questi superimpianti era molto maggiore di quella registrata negli impianti più piccoli usati nelle prove

manufactured by Zhengzhou Hydro-Machinery. The real mixing time was only 150 seconds. It was observed that the mixing effectiveness of these super drums was much greater than that of the smaller one used in the laboratory tests: within each revolution, the CAE-based superplasticizer, together with the other concrete ingredients, absorbed many folds of shear energy with respect to the small drum. Hence, the CAE-based admixture could fully extend their long hair-like graft chains [7] and take full advantage of the steric-hindrance mechanism of water reduction and slump retention [7].

Based on the same mix proportions used for the laboratory tests, the first large batch of concrete came out with a slump of 150 mm (Table 3). Even with this high slump, the concrete samples satisfied all mechanical and durability requirements. After two more trials, the water content in C40 concrete was reduced to only 92 kg/m³.

Being highly thixotropic in casting bays, the CAE concrete was found very easy to work and to compact with the required slopiness; so that workers reported to find some difficulty in maintaining the spillway surface. For this reason, further optimisation was achieved by reducing the CAE dosage from 1% to 0.8%, DH9 from 3.0‰ to 1.0‰ for C40 and from 2.5‰ to 0.8‰ for C45, and limiting the slump at the batching plant to only about 30-50 mm.

The superiority of the CAE concrete with respect to that with the SN superplasticizer is supported by the results of the tests shown in Tables 4/A and 4/B, in which some test results of the batching plant samples are listed.

The drying shrinkage data from the batching plant samples are illustrated in Fig. 3. It shows that, at ages later than 3 days, the shrinkage of the concrete with the CAE-superplasticizer was consistently lower than that of the concrete with SN-based admixture by 39 ~ 44 % for C40, and 14 ~ 24 % for C45.



di laboratorio: a causa della 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 poté pienamente "estendere" le lunghe catene polimeriche laterali [7] e prendere il pieno vantaggio dell'effetto di impedimento sterico di riduzione d'acqua e di ritenzione dello slump [7]. 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 soddisfacevano 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 tixotropico, il calcestruzzo contenente il CAE fu trovato 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, una ulteriore ottimizzazione fu 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 mostrati nelle Tabelle 4/A e 4/B, nelle quali sono riportati alcuni risultati delle prove effettuate all'impianto di betonaggio.

I risultati del ritiro da essiccamento dei campioni prelevati dall'impianto di betonaggio sono mostrati nella Figura 3. Questa figura mostra che, alle età successive ai tre giorni, il ritiro del calcestruzzo con il superfluidificante CAE è considerevolmente minore di quello con l'additivo basato sull'SN. Questa riduzione nel ritiro è del 39-44% per il calcestruzzo C40 e del 14-24% per il calcestruzzo C45.

5. Concrete performance in casting bay

After entering the actual construction stage, the CAE concrete was still found creeping on the rising and dropping slopes of the spillways. In January 2001, further tests were carried out by the superplasticizer producer together with the project corporation (CTGPC), the contractor (Gezhouba Corp.) and the quality-control consultant (Yangtze River Commission), and finally came up with new mix proportions and slump control criterion [8]. The key points included reducing the CAE dosage to 0.6% for the erosion-resistant C40 and C45 concretes and to 0.5% for the spillway surface with very steep slopiness.

In the late summer of July-August, the temperature in casting bays was in a range of 25 - 35 °C, with a relative humidity range of 57 - 60%. Even under such environmental conditions, the concrete with the CAE-superplasticizer showed low loss in both slump and entrained air (Table 5) after having travelled through hundreds of metres on conveying belt and being sampled at the casting sites.

To monitor the core temperature in the dam concrete, as well as the temperature difference with respect to that of the environment, thermocouples were embedded in C40 concretes with SN or CAE as superplasticizer. The record data plotted in Fig. 4 indicate that the core temperature of the concrete with CAE was consistently lower than that of the concrete with SN; differences of 5 - 7.2 °C between the two concretes were found during the first 48 hours.

Subtracting the environmental temperature from that of the concretes core, we obtain the temperature difference between the cooler environment and the hotter core of concrete. By taking the thermal expansion coefficient to be 10×10^{-6} per °C [9], we calculated the differential thermal strains in the concretes (Fig. 5). It is observed that the CAE concrete intermittently went above the strain level of 100×10^{-6} , whereas the SN concrete continuously stayed above this value for more than 53 hours. Refer to the ultimate tensile strain values

TABELLA 3/TABLE 3

Proporzioni del calcestruzzo nelle prove di costruzione The concrete proportions for the construction tests

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	%	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³		kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³
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

TABELLA 4A/TABLE 4A

Prestazioni comparative del calcestruzzo C40 prelevato all'impianto di betonaggio
Performance comparison of C40 concrete samples taken at the batching plant

Superfluidificante <i>Superplasticizer</i>	Slump	Aria/Air	Resistenza all'erosione*	Perdita di massa (%) provocata da un numero di cicli gelo-disgelo					% del modulo elastico originale dopo un numero di cicli di gelo-disgelo				
	mm	%	h/(kg/m ²)	Loss of Mass (%) caused by No. of Freeze/Thaw Cycles					% 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 all'erosione (h/kg/m²) è il tempo in ore(h) per erodere 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 according to the SD 105, 1982 Standard [6].

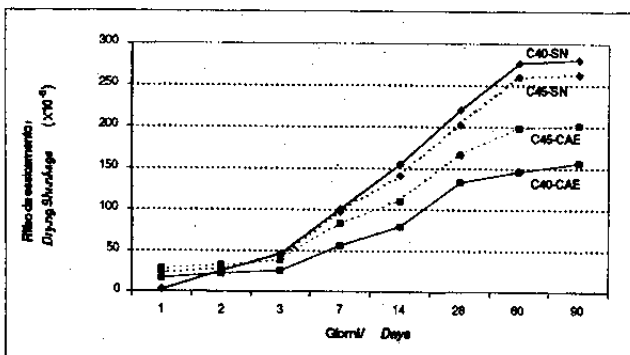
TABELLA 4B/TABLE 4B

Resistenza meccanica e deformazione ultima del calcestruzzo C40
Strength and strain performances on C40 concrete

Superfluidificante / <i>Superplasticizer</i>	Resistenza meccanica a compressione			Resistenza meccanica a trazione			Deformazione ultima a trazione	
	<i>Compressive Strength (MPa)</i>			<i>Split Tensile Strength (MPa)</i>			<i>Ultimate Tensile Strain (x10⁻⁶)</i>	
	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

5. Prestazioni del calcestruzzo nella zona di getto

Dopo essere entrati nello stadio effettivo della costruzione, si è riscontrato che il calcestruzzo con l'additivo CAE ancora scorreva laddove c'erano delle pendenze dello sfioratore. Nel Gennaio 2001,



• Fig. 3 - Ritiro da essiccamento in provini confezionati all'impianto di betonaggio con classi di resistenza 40 o 45 MPa e superfluidificanti SN o CAE.
• Fig. 3 - Drying shrinkage of specimens taken at the batching plant from concrete with different strength class (40 or 45 MPa) and different superplasticizer (SN vs. CAE).

in Table 4/B, we should be able to appreciate the implication of the above strain level.

The reduction of 47 kg/m³ binder in the concrete with the CAE-based superplasticizer with respect to that with the SN-based superplasticizer (Table 3) implies, at this point, no longer merely a lower material cost, but becomes a crucial mean in terms of prevention of thermal cracking. When the naphthalene-based admixture was used for the deep-openings in the dam, the temperature increase was 46 °C and 50 °C respectively in C40 and C45 concretes, and many cracks were found afterwards. Started since October 2000, record shows that using the concrete with the CAE-based superplasticizer has reduced cracking by as much as 83% (Fig. 6).

From the viewpoint of cost effectiveness, it is worthwhile to make some economical assessments. The prices of binder and naphthalene-based superplasticizer are RMB ¥ 0.50/kg* and RMB¥ 8.20/kg respectively. The unit cost should then be RMB ¥ 221.88/m³ for C40 concrete and RMB ¥ 232.44/m³ for C45 concrete respectively (Table 3). Taking into consideration the binder saving and the 0.6% dosage of CAE, these

* 7.65 RMB¥ = 1€



TABELLA 5/TABLE 5

Perdita di slump e perdita d'aria nei campioni di calcestruzzo con superfluidificante CAE prelevati nel sito del getto
Slump-loss and air loss in the CAE concrete samples taken at the casting site

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

ulteriori prove sono state eseguite insieme al produttore del superfluidificante con il team del progetto (CTGPC), l'impresa (Gezhouba Corp.) e con il responsabile del controllo di qualità (Yangtze River Commission); infine furono emessi dei nuovi criteri per il proporzionamento del calcestruzzo ed il controllo dello slump [8]. I punti chiave includevano il dosaggio del riduttore di acqua allo 0.6% per il calcestruzzo resistente all'erosione C40 e C45 e allo 0.5% per la superficie dello sfioratore che presentava maggiori pendenze.

Nella tarda estate (Luglio-Agosto) la temperatura nella zona del getto era nell'intervallo dei 25-35°C, con una umidità relativa compresa nell'intervallo di 57-60%. Anche in queste condizioni ambientali, il calcestruzzo con l'additivo CAE mostrò una bassa perdita di lavorabilità ed una bassa perdita di aria inglobata (Tabella 5) dopo aver viaggiato per centinaia di metri su un nastro trasportatore ed essere stato campionato sul sito del getto.

Al fine di controllare la temperatura nel nucleo del calcestruzzo della diga, come anche di 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; tra i due calcestruzzi furono registrati durante le prime 48 ore differenze di 5-7.2°C.

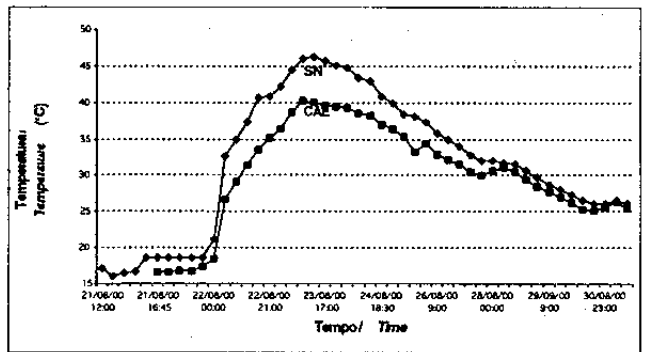
Sottraendo la temperatura ambientale a quella registrata nei nuclei del calcestruzzo, si ottiene la differenza di temperatura tra la parte più fredda e la parte più calda del calcestruzzo. Tenendo in conto i coefficienti di espansione termica, che sono $10 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ [9], si possono calcolare le deformazioni dovute ai gradienti termici nel calcestruzzo (Figura 5). Si è osservato che il calcestruzzo con il CAE raggiungeva ogni tanto una deformazione sopra i 100×10^{-6} mentre il calcestruzzo con l'additivo SN rimaneva costantemente sopra questo valore per più di 53 ore. Se ci si riferisce alla deformazione ultima sotto l'effetto della tensione di trazione (Tabella 4B), si possono infine apprezzare gli effetti di queste minori deformazioni.

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 in termini di prevenzione della fessurazione termica.

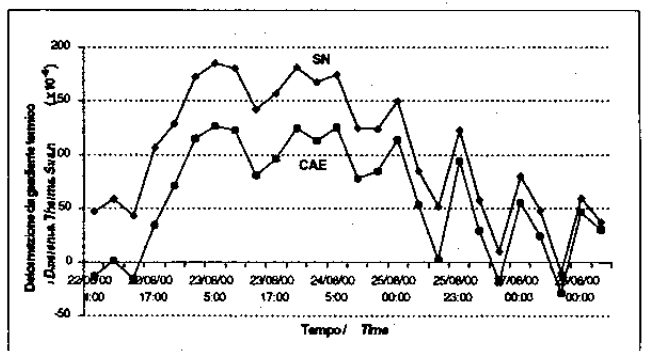
Quando l'additivo a base di naftalensolfonato era stato usato per le parti più interne nella diga, l'aumento di temperatura fu di 46°C e di 50°C rispettivamente nei calcestruzzi C40 e C45, e molte fessure furono registrate nei giorni successivi. A partire dall'Ottobre 2000 si è trovato che usando un calcestruzzo con l'additivo basato sul CAE si poteva ridurre la fessurazione fino all'83% (Figura 6).

Dal punto di vista del rapporto costi/benefici, si può notare che si possono realizzare alcuni vantaggi economici. I prezzi del legante e dell'additivo basato sul naftalene erano di RMB ¥ 0,50/kg* e RMB ¥

unit costs would allow the CAE superplasticizer to be supplied competitively in a level of RMB ¥ 20.00/kg. In other words, even though CAE is produced in Italy, and has to bear high intercontinental transportation cost and input tax, the concrete produced with the CAE-based superplasticizer does not necessarily cost more than that of the naphthalene-based superplasticizers locally produced in China. Moreover, at least the following cost savings are for the contractors to appreciate:



• Fig. 4 - Temperature del nucleo in funzione del tempo per calcestruzzi con superfluidificante SN o CAE.
• Fig. 4 - The core temperature as a function of time for concretes made with different admixtures (SN vs. CAE).



• Fig. 5 - Deformazioni termiche differenziali nel calcestruzzo contenente SN o CAE.
• Fig. 5 - Differential thermal strain in concrete made with different admixtures.

8,20/kg rispettivamente. Il costo unitario risultò essere di RMB ¥ 221,88/m³ per il calcestruzzo C40 e RMB ¥ 232,44/m³ per il calcestruzzo C45 (Tabella 3). Prendendo in considerazione il risparmio nel legante ed il dosaggio di 0.6% del CAE, questi costi unitari consentirebbero all'additivo CAE di essere fornito competitivamente ad un livello di RMB ¥ 20,00/kg. In altre parole, anche se il CAE è stato prodotto in Italia, ed ha dovuto subire trasporti intercontinentali e tasse doganali, il calcestruzzo prodotto con l'additivo CAE non necessariamente costa di più di quello con il superfluidificante a base di naftalina prodotto localmente in Cina. Inoltre, almeno due risparmi di costi sono prevedibili per l'impresa:

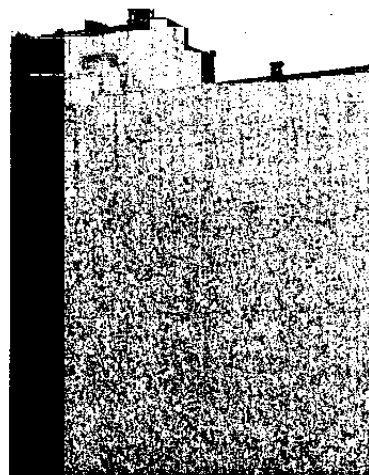
- a) Secondo il prezzo del contratto, il raffreddamento artificiale del calcestruzzo di 1°C costa circa RMB ¥2,20/m³. Poiché l'uso dell'additivo superfluidificante CAE può ridurre la temperatura nel nucleo del calcestruzzo in media di 6°C, se si fosse impiegato l'additivo CAE nel totale dei 350.000 m³ di calcestruzzo già gettati (ma usando l'additivo SN) nella diga delle Tre Gole si sarebbe realizzato un risparmio di $2,20 \times 6 \times 350.000 = \text{RMB } ¥4,62$ Milioni.
- b) A causa delle proprietà tixotropiche del calcestruzzo con l'additivo basato sul CAE, la compattazione nella zona del getto è stata ridotta ad un'unica volta e così non vi era più la necessità 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.

* 7,65 RMB¥ = 1€

6. Conclusioni

Attraverso una serie di prove, l'additivo superfluidificante basato sul CAE, è stato usato con grande successo nella costruzione della diga delle Tre Gole. Le seguenti conclusioni possono essere tratte da questa applicazione:

- (1) L'additivo basato sul CAE ha una più alta capacità di riduzione dell'acqua ed un minor contenuto di alcali, ed è in grado di produrre un abbassamento del calore di idratazione durante i primi sette giorni. In confronto con tutti gli altri superfluidificanti basati sul naftalensolfonato disponibili in Cina questo additivo ha una prestazione generale migliore. 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 del 10-12,3% rispetto al superfluidificante basato sull'additivo SN.
- (2) L'alta resistenza meccanica prodotta con l'additivo CAE, richie-



• Fig. 6 - Fessurazioni di origine termica nel primo getto di calcestruzzo con il superfluidificante a base di SN [10].
• Fig. 6 - Thermal-related cracking in the first placement with concrete combining the SN-based superplasticizer [10].

- a) According to the contract pricing, artificially cooling concrete down by 1 °C costs about RMB ¥ 2.20/m³. Since the use of the CAE-based superplasticizer can reduce the concrete core temperature by an average of 6 °C, the total 350,000 m³ of concrete with the CAE admixture already cast (by using SN-based admixtures) in the 3-Gorge Dam would have saved the construction cost by $2.20 \times 6 \times 350,000 = \text{RMB } ¥ 4.62$ Million.
- b) Due to the good thixotropic property of the concrete with the CAE-based admixture, compaction in the casting bays has been reduced to one time only, and then there was no need of repeating it as for the concretes with SN-based superplasticizers. The saving in both manpower and time was significant.

6. Conclusions

Through a series of tests and analyses, the CAE-based retarding superplasticizer, has been successfully used for the Three-Gorge Dam construction. The following conclusions can be drawn from the application:

- (1) The CAE-based superplasticizer has high water-reduction capability and low alkali content, and is able to properly reduce the binders' hydration-heat release during the first 7 days. In comparison with many other superplasticizers based on sulfonated naphthalene, this admixture has the best overall performance. In particular, at given water-binder ratio and slump, the CAE-based admixture is able to reduce the amount of mixing water by 10.4 % to 12.3 %, with respect to SN-based superplasticizer.
- (2) The high-strength concrete produced with the CAE-based



de 47 kg o 40 kg 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 riscaldamento nel picco termico di 6°C, che può quasi mantenere la deformazione provocata dal gradiente termico nel calcestruzzo al di sotto del valore permesso di 100×10^{-6} . Questo è estremamente importante per la prevenzione delle fessurazioni nelle strutture delle dighe.

- (3) Il calcestruzzo con l'additivo CAE ha una bassa perdita di lavorabilità, un'alta tixotropia e quindi è facile da mettere in opera e da compattare sul getto. Esso riduce il tempo e la manodopera per la costruzione della diga.
- (4) A causa della sua maggiore capacità di ridurre l'acqua, il calcestruzzo con l'additivo CAE contiene meno legante, e questo migliora molte prestazioni, come per esempio la compattazione, un minor ritiro, una maggiore resistenza, un miglior comportamento nei confronti dei cicli di gelo-disgelo e una minore penetrazione dell'acqua sotto pressione; con meno legante, il calcestruzzo possiede un maggior contenuto di aggregati e quindi una maggiore resistenza alla erosione.
- (5) Il calcestruzzo con l'additivo CAE è anche molto efficace dal punto di vista del costo, riducendo il controllo della temperatura e del processo di messa in opera durante la costruzione.

superplasticizer, needs 47 kg and 40 kg less of binder for concrete with 40 MPa and 45 MPa compressive strength respectively with respect to the corresponding mixtures with the SN-based superplasticizer. This reduction produces a lower thermal peak of 6 °C, which can almost keep the differential thermal strain in the concrete below its permissible ultimate tensile strain of $100 \cdot 10^{-6}$. This is extremely important for the thermal-crack prevention for the dam structure.

- (3) *The concrete with the CAE-based superplasticizer has low slump loss and high thixotropy, and then it is easy to place and compact it in the casting bays. This reduces the time for the dam construction.*
- (4) *Due to its high water-reduction capability, the concrete with the CAE-based superplasticizer contains less binder, and this improves many performances, such as compaction, lower shrinkage, higher strength, improved freeze/thaw behaviour and lower water-penetration; with less binder, the concrete has higher content of aggregates, and then stronger erosion resistance.*
- (5) *The concrete with CAE-based superplasticizer is also very cost effective: without necessarily increasing the unit cost of the concrete, this superplasticizer can significantly reduce the cost temperature control and placing process during the construction.*

Bibliografia/References

- [1] CTGPC, *Final report on concrete proportioning tests*, Yichang, Testing Centre of China Three-Gorge Project Corp., (1998).
- [2] COLLEPARDI, M., COPPOLA, L., CERULLI, T., FERRARI, G., PISTOLESI, C., ZAFFARONI, P. and QUEK, F., *Zero slump-loss superplasticized concrete*, Proceedings, 18th Conference on Our World in Concrete & Structures, Singapore, (1993).
- [3] CHEN, Y. M. and YAO, Y., *Final report on admixture selection for 3-Gorge-Dam concrete*, Beijing, China Science Academy of Construction Materials, (1998).
- [4] GB 8076, *Concrete admixtures*, Beijing, National Bureau of Standard (1997).
- [5] TGPS 05, *Technical requirements and QC plan for concrete admixture*, Yichang, Industrial standard for the Yangtze 3-Gorge construction (1998).
- [6] SD105, *Standard for testing concrete for hydro-structures*, Beijing, Ministry of Hydraulic Power, (1982).
- [7] COLLEPARDI, S., COPPOLA, L., TROLI, T. and COLLEPARDI, M., *Superplasticizers in high performance concrete structures*, Proceedings, (1998).
- [8] LI, H. B., *Application studies of using Mapei X404 retarding superplasticizer in the concrete for the second phase of 3-Gorge Dam construction*, Yichang, Testing Centre of Gezhouba Corp, (2002).
- [9] NEVILLE, A. M., *Properties of concrete*, 4th Ed., London, Longman, (1995).
- [10] COLLEPARDI, M., *The New Concrete*, in Italian, 2nd Ed., Tintoretto, Villorba (TV), Italy (2002).