

# CENERE PESANTE DA INCENERITORI DI RESIDUI SOLIDI URBANI IN CALCESTRUZZI AUTOCOMPATTANTI AD ALTE PRESTAZIONI



Silvia Collepari\*, Mario Collepari\*,  
Giacomo Iannis\*\*,  
Alessandro Quadrio Curzio\*\*\*

\*Enco, \*\*Tecochem Italiana, \*\*\*Petracem - info@encosrl.it



## INTRODUZIONE

La cenere volante derivante dagli inceneritori dei Rifiuti Solidi Urbani (RSU), dopo essere stata macinata può essere impiegata, grazie alla sua attività pozzolanica, in parziale sostituzione del cemento Portland per la produzione di un calcestruzzo in linea con uno sviluppo sostenibile. In alcune ricerche (1,2) l'attività pozzolanica di questa cenere è dovuta alla sua reazione con la calce di idrolisi formata per idratazione del cemento Portland. Tuttavia, la cenere pesante macinata da RSU finora non è stata impiegata con successo a causa di alcuni effetti collaterali ed in particolare alla presenza di polvere di alluminio che provoca in ambiente con PH di circa 13 la formazione di idrogeno gassoso nel calcestruzzo riducendone le prestazioni meccaniche e la impermeabilità all'acqua.

In questo articolo sono presentati alcuni interessanti risultati sull'impiego della cenere pesante da RSU macinata senza la formazione di idrogeno gassoso grazie alla rimozione delle particelle di alluminio. Il suo comportamento è stato confrontato con quelli del fumo di silice e della cenere volante in calcestruzzi autocompattanti ad alte prestazioni grazie alla presenza di additivi superfluidificanti, additivi anti-ritiro ed agenti espansivi per produrre conglomerati privi di fessure ancorché non stagionati ad umido.

## PARTE SPERIMENTALE

### Materiali

La cenere pesante da RSU si presenta come una miscela di particelle inorganiche mescolate con frammenti metallici. Il nuovo processo messo a punto da Petracem si basa sulla preliminare rimozione dei frammenti metallici in grossa pezzatura contenenti ferro e alluminio e quindi su una macinazione sotto acqua della cenere pesante in grado di formare uno *slurry* molto fluido contenente circa il 60% di acqua dalla quale le particelle metalliche di alluminio furono completamente separate dallo *slurry*.

La Fig. 1 mostra le particelle, di forma irregolare, di cenere pesante macinata al microscopio elettronico a scansione. La Fig. 2 mostra la laser-granulometria della cenere pesante macinata (GBA dall'Inglese *Ground Bottom Ash*), in confronto con quelle di una cenere volante da carbone (FA dall'Inglese

*Fly Ash*) e di un fumo di silice (SF da *Silica Fume* in Inglese). Il valore del  $D_{50}$ , cioè del diametro in corrispondenza del quale il 50% di materiale è più fine, è  $0.3 \mu\text{m}$ ,  $1.5 \mu\text{m}$  e  $30 \mu\text{m}$  rispettivamente per SF, GBA e FA.

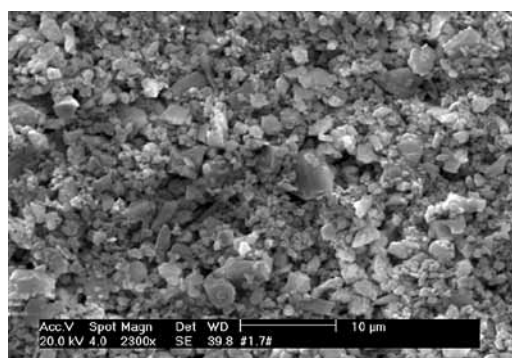


Fig. 1 - Particelle di GBA osservate al microscopio elettronico a scansione

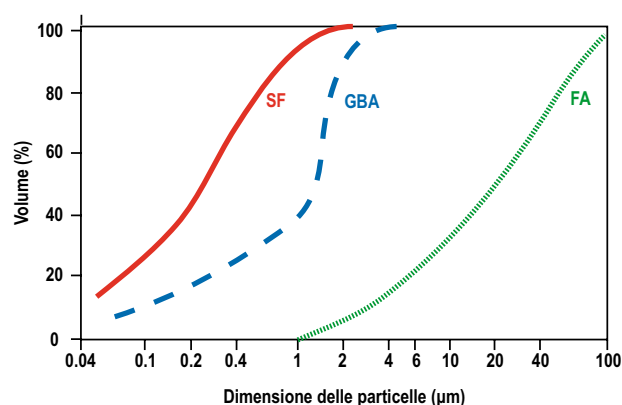


Fig. 2 - Laser-granulometria di fumo di silice (SF), cenere pesante macinata (GBA) e cenere volante (FA)

La Tabella 1 mostra la composizione in termini di ossidi in percentuale presenti nei materiali cementizi impiegati inclusi la GBA (nella sua forma priva di acqua), la cenere volante, il fumo di silice e un calcare (LS dall'Inglese *Limestone*) finemente macinato per la produzione di calcestruzzi auto-compattanti (SCC dall'Inglese *Self-Compacting Concrete*).

In tutti i calcestruzzi sono stati impiegati additivi antiritiro noti come SRA (dall'Inglese *Shrinkage-Reducing Admixture*)

**Tabella 1 - Composizione chimica della cenere pesante (GBA), della cenere volante (FA), del fumo di silice (SF) e del calcare (LS) macinato**

OSSIDI (%)	GBA	FA	SF	LS
SiO <sub>2</sub>	40.07	55.11	95.12	---
CaO	20.43	2.12	0.79	54.92
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.08	27.91	0.21	---
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.60	3.75	0.70	---
MgO	3.37	0.51	0.58	---
Na <sub>2</sub> O	3.52	0.41	0.19	---
K <sub>2</sub> O	0.90	0.71	0.31	---
Perdita al fuoco	5.2	6.8	2.01	44.02

in misura di 4 kg/m<sup>3</sup>, ed è stata impiegata un'adeguata quantità di superfluidificante (da 12 a 16 kg/m<sup>3</sup>) di tipo polycarbosilico (SPC) in modo da mantenere costante al valore di 0.42 il rapporto  $a/(c+mcp)$  (dove  $mcp$  indica i materiali cementizi pozzolanici) con uno *slump-flow* fisso di 720 mm.

In alcuni SCC sono stati anche impiegati un agente espansivo a base di calce (CaO) "cotta a morte" (a 1000°C) per produrre calcestruzzi a ritiro compensato. In altri calcestruzzi sono state aggiunte fibre macrostrutturali in PVA (Poli-Vinil-Alcol) lunghe 30 mm e spesse 1 mm. Gli additivi, l'agente espansivo e le fibre in PVA sono tutti prodotti da Tecnochem.

La Tabella 2 mostra la composizione dei vari SCC tutti con un rapporto  $a/(c+mcp)$  di 0.42 ed uno *slump-flow* di 720 mm. In 3 calcestruzzi sono stati impiegati anche 30 kg/m<sup>3</sup> dell'agente espansivo a base di CaO (in sostituzione del filler calcareo LS) o di 4 kg/m<sup>3</sup> di fibre in PVA. I dosaggi di GBA e di SF sono stati fissati a circa 50 kg/m<sup>3</sup> in sostituzione del cemento Portland CEM I 52.5 R mentre per la cenere volante è stato adottata un'aggiunta di circa 100 kg/m<sup>3</sup> sempre in sostituzione del cemento Portland.

Le composizioni dei vari calcestruzzi sono identificati dai seguenti codici:

- **Control Mix** → SCC di riferimento con SRA, SPC e filler calcareo (LS) senza aggiunte minerali, senza agente espansivo e senza fibre PVA;

- **GBA-1 Mix** → con (GBA), senza agente espansivo e fibre PVA;
- **GBA-2 Mix** → con GBA ed agente espansivo;
- **GBA-3 Mix** → con GBA e fibre in PVA;
- **SF-1 Mix** → con SF senza agente espansivo e fibre PVA;
- **SF-2 Mix** → con SF ed agente espansivo;
- **SF-3 Mix** → con SF e fibre in PVA;
- **FA-1 Mix** → con FA senza agente espansivo e fibre PVA;
- **FA-2 Mix** → con FA ed agente espansivo;
- **FA-3 Mix** → con FA e fibre in PVA

### Prove

Le seguenti prove sono state eseguite sui calcestruzzi:

- resistenza meccanica a compressione di provini cubici (15 cm) stagionati a 20°C con U.R. di 95%;
- penetrazione d'acqua sotto pressione (3 atm) per 5 giorni (secondo la norma EN 12390/8) sui calcestruzzi stagionati a umido per 28 giorni;
- diffusione del cloruro nei calcestruzzi stagionati a umido per 28 giorni e quindi conservati sotto acqua contenente 3.5% di NaCl;
- penetrazione della CO<sub>2</sub> in calcestruzzi stagionati a umido per 28 giorni e quindi esposti all'aria;
- ritiro libero di provini (10x10x50 cm) non armati in calcestruzzi con e senza macrofibre in PVA scasserati a 3 giorni e quindi esposti per 3 mesi in ambiente molto asciutto con U.R. di 55%;
- espansione contrastata di provini armati (con barra in acciaio lunga 240 mm con diametro da 6 mm) in calcestruzzi con e senza agente espansivo;
- prove di campo su lastre (lunghe 8 m, larghe 40 cm e spesse 6 cm) esposte all'aria senza alcuna stagionatura umida e bloccate alle estremità per favorire la fessurazione indotta dal ritiro igrometrico.

**Tabella 2 - Composizione dei calcestruzzi SCC tutti con uno *slump-flow* di 720 mm ed un rapporto  $(a/ c+mcp)$  di 0.42**

MIX	CEMENTO PORTLAND (kg/m <sup>3</sup> )	AGGIUNTE MINERALI (kg/m <sup>3</sup> )				INERTI* (kg/m <sup>3</sup> )	ACQUA** (kg/m <sup>3</sup> )	SPC (kg/m <sup>3</sup> )	SRA (kg/m <sup>3</sup> )	CaO (kg/m <sup>3</sup> )	PVA (kg/m <sup>3</sup> )
		LS	GBA	SF	FA						
Control	398	99	---	---	---	697	166	12	4	---	---
GBA-1	350	97	48	---	---	700	167	12	4	---	---
GBA-2	349	70	49	---	---	698	168	13	4	30	---
GBA-3	351	93	49	---	---	695	167	12	4	---	4
SF-1	349	98	---	47	---	700	167	15	4	---	---
SF-2	348	69	---	48	---	698	167	16	4	30	---
SF-3	348	94	---	47	---	698	167	15	4	---	4
FA-1	302	99	---	---	95	698	168	11	4	---	---
FA-2	305	70	---	---	94	698	167	12	4	30	---
FA-3	301	96	---	---	94	697	167	11	4	---	4

\*Sabbia 0-4 mm = 40% in peso; ghiaia 4-16 mm = 60% in peso

\*\*Include anche l'acqua dello *slurry* di GBA

## RISULTATI

### Resistenza meccanica a compressione

La Fig. 3 mostra l'andamento della resistenza meccanica a compressione da 1 a 180 giorni dei calcestruzzi SCC tipo *Control Mix*, *GBA-1 Mix*, *SF-1 Mix* ed *FA-1 Mix*. La resistenza meccanica dell'*FA-1 Mix* è molto più bassa del *Control Mix* alle stagionature fino a 28 giorni, mentre raggiunge quasi gli stessi valori alle stagionature più lunghe (60-180 giorni). D'altra parte i calcestruzzi con fumo di silice (*SF-1 Mix*) e cenere pesante macinata (*GBA-1 Mix*) si comportano molto meglio del calcestruzzo di riferimento (*Control Mix*) soprattutto alle brevi stagionature. Questi risultati concordano con quelli ottenuti in un precedente lavoro (4) dove furono impiegate GBA con diversi gradi di macinazione e solo quella con dimensioni delle particelle di circa 1.7  $\mu\text{m}$ , come quella impiegata in questa ricerca, si comportava come il fumo di silice.

Risultati simili sono stati ottenuti (Fig. 4) nei calcestruzzi contenenti l'agente espansivo con una maggiore resistenza meccanica nei calcestruzzi *GBA-2 Mix*, *SF-2 Mix* ed *FA-2 Mix* per la presenza dell'agente espansivo CaO che reagisce con l'acqua e riduce l'effettiva acqua d'impasto rispetto al *Control Mix* che non contiene l'agente espansivo.

In presenza di fibre PVA le resistenze meccaniche (Fig. 5) dei calcestruzzi *GBA-3 Mix*, *SF-3 Mix* ed *FA-3 Mix* sono

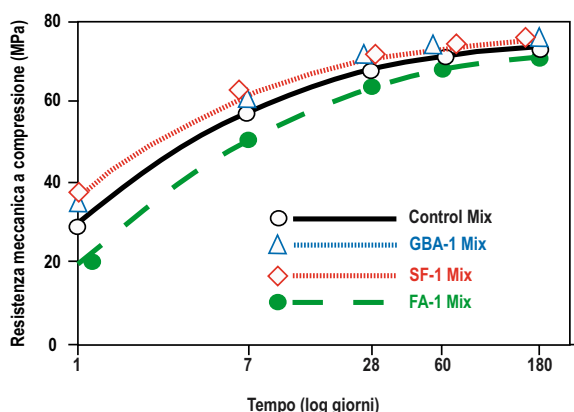


Fig. 3 - Resistenza meccanica a compressione di calcestruzzi Control Mix, GBA-1 Mix, SF-1 Mix ed FA-1 Mix in funzione del tempo

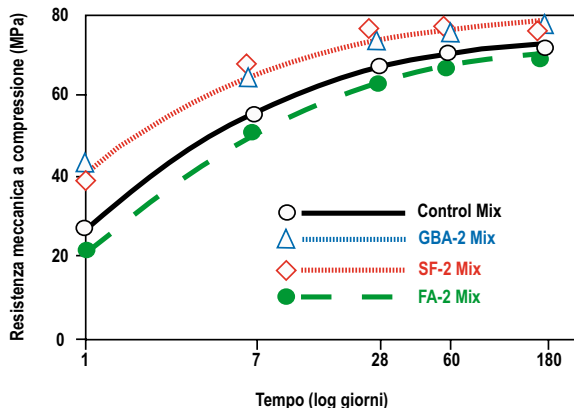


Fig. 4 - Resistenza meccanica a compressione di calcestruzzi Control Mix, GBA-2 Mix, SF-2 Mix ed FA-2 Mix in funzione del tempo

molto simili a quelle ottenute in assenza di fibre (Fig. 3).

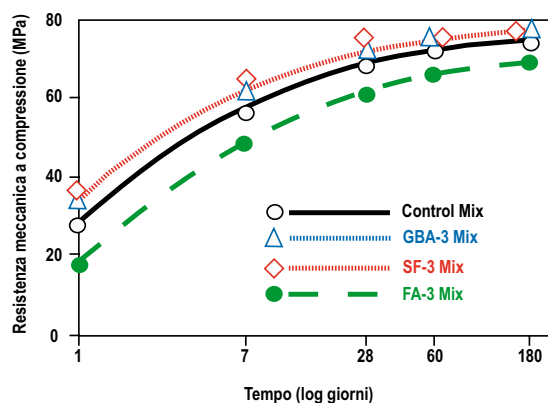


Fig. 5 - Resistenza meccanica a compressione di calcestruzzi Control Mix, GBA-3 Mix, SF-3 Mix ed FA-3 Mix in funzione del tempo

### Penetrazione dell'acqua

La Tabella 3 mostra lo spessore penetrato dall'acqua sotto pressione. Secondo la norma EN 12390/8 un calcestruzzo è considerato impermeabile se lo spessore medio penetrato dall'acqua non supera 20 mm e la penetrazione media dell'acqua non supera 50 mm. I risultati mostrati in Tabella 3 indicano che tutti i calcestruzzi provati sono impermeabili a causa del basso rapporto  $a/(e+mcp)$  (0.42). Tuttavia, la penetrazione dell'acqua nel calcestruzzo con cenere pesante da RSU (*GBA-1 Mix*) è simile a quella che si verifica nel calcestruzzo con fumo di silice (*SF-1 Mix*) e molto più bassa di quella che avviene nel calcestruzzo con cenere volante (*FA-1 Mix*).

Tabella 3 - Penetrazione dell'acqua in calcestruzzi stagionati 28 giorni

TIPO DI SCC	SPESSORE DI CALCESTRUZZO PENETRATO DALL'ACQUA	
	VALORE MASSIMO	VALORE MEDIO
Control-Mix	5 mm	2 mm
GBA-1 Mix	5 mm	1 mm
SF-1 Mix	5 mm	1 mm
FA-1 Mix	8 mm	4 mm

### Diffusione del cloruro

La Tabella 4 mostra la diffusione dello ione  $\text{Cl}^-$  attraverso il calcestruzzo. I risultati indicano che lo spessore di calcestruzzo penetrato dal cloruro è minore nel *GBA-1 Mix* e nell'*SF-Mix* rispetto al *Control Mix* ed all'*FA-1 Mix*.

### Penetrazione della $\text{CO}_2$

I risultati mostrati nella Tabella 5 indicano che la penetrazione della  $\text{CO}_2$  nel *GBA-1 Mix* è simile a quella che avviene nell'*SF-1 Mix* e che entrambi questi calcestruzzi resistono meglio alla penetrazione della  $\text{CO}_2$  che non il *Control Mix* e l'*FA-1 Mix*.

**Tabella 4 - Diffusione del cloruro (Cl<sup>-</sup>) in calcestruzzi stagionati 28 giorni**

TIPO DI MIX	SPESSORE DI CALCESTRUZZO PENETRATO DAL CL <sup>-</sup> DOPO:		
	1 MESE	1.5 MESI	4 MESI
Control-Mix	1.3 mm	6.0 mm	6.6 mm
GBA-1 Mix	1.1 mm	4.0 mm	4.4 mm
SF-1 Mix	1.0 mm	3.9 mm	4.3 mm
FA-1 Mix	2.3 mm	5.8 mm	5.9 mm

**Tabella 5 - Penetrazione della CO<sub>2</sub> in calcestruzzi stagionati 28 giorni**

TIPO DI MIX	SPESSORE DI CALCESTRUZZO PENETRATO DALLA CO <sub>2</sub> DOPO:		
	1 MESE	1.5 MESI	4 MESI
Control-Mix	0.9 mm	1.8 mm	3.0 mm
GBA-1 Mix	0.7 mm	1.0 mm	2.0 mm
SF-1 Mix	0.6 mm	1.0 mm	2.0 mm
FA-1 Mix	1.8 mm	2.6 mm	4.5 mm

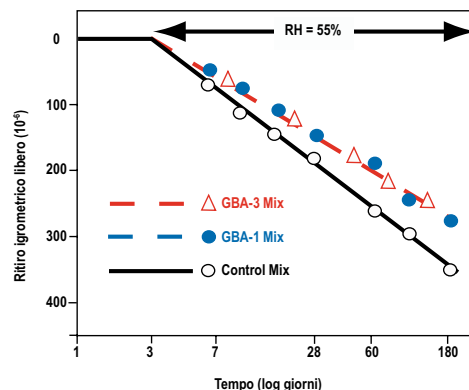
**Ritiro igrometrico**

Le Fig. 6-8 mostrano l'influenza delle fibre in PVA sul ritiro igrometrico libero provocato dall'essiccamento dei provini in ambiente insaturo di vapore (U.R.=55%). I risultati ottenuti indicano che in presenza dell'aggiunte pozzolaniche in tutti i calcestruzzi (*GBA-1 Mix*, *SF-1 Mix* e *FA-1 Mix*) il ritiro è significativamente ridotto rispetto al *Control Mix* privo di aggiunte di materiale pozzolanico. D'altra parte, l'aggiunta di fibre in PVA ai calcestruzzi con aggiunte pozzolaniche (*GBA-3 Mix*, *SF-3 Mix* e *FA-3 Mix*) non provoca alcuna ulteriore riduzione del ritiro igrometrico.

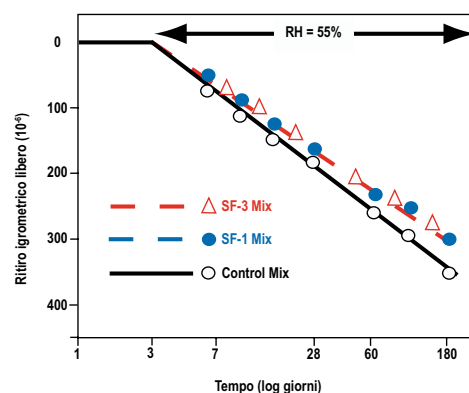
**Espansione contrastata**

L'espansione contrastata dei calcestruzzi contenenti l'agente espansivo CaO è stata misurata sui provini armati sformati dopo la loro presa (4-8 ore). A questo tempo si è misurata la lunghezza iniziale della barra metallica prima che avvenisse l'espansione. Quindi i provini sono stati avvolti da un telo di plastica per evitare l'evaporazione dell'acqua dal calcestruzzo simulando la situazione del calcestruzzo conservato dentro i casseri. A causa dell'adesione del calcestruzzo indurito alla barra metallica, l'espansione del calcestruzzo provoca un allungamento della barra in acciaio che è stato misurato a 1 giorno subito dopo aver rimosso il telo di plastica e a tempi successivi durante i quali i provini sono stati lasciati in ambiente molto asciutto con U.R. del 50%. La Fig. 9 mostra le variazioni di lunghezza della barra metallica annegata nei tre SCC con agente espansivo (CaO) e additivo antiritiro SRA in funzione del tempo: tutti i calcestruzzi espandono durante i primi 2-3 giorni, ma il *GB-2 Mix* e l'*SF-2 Mix* espandono molto di più dell'*FA-2 Mix*. Questo diverso comportamento è causato dalla maggiore adesione dei calcestruzzi con GBA o SF alla barra metallica che, a sua volta, dipende dalla maggiore resistenza meccanica iniziale (2-3 giorni) dei calcestruzzi con GBA ed SF rispetto al calcestruzzo con FA, come è mostrato nella Fig. 4. In altre parole, maggiore è la resistenza

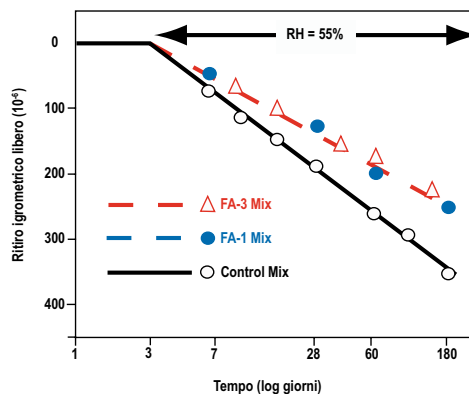
meccanica, maggiore è l'adesione alla barra metallica e maggiore è l'espansione contrastata dei provini armati.



**Fig. 6 - Ritiro igrometrico libero del Control Mix, del GBA-1 Mix e del GBA-3 Mix (con fibre in PVA)**



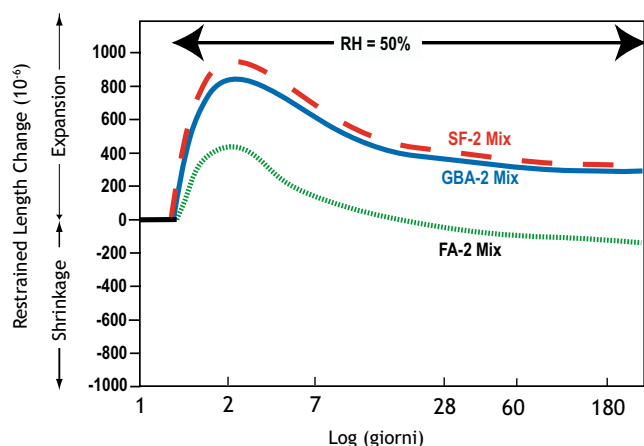
**Fig. 7 - Ritiro igrometrico libero del Control Mix, dell'SF-1 Mix e dell'SF-3 Mix (con fibre in PVA)**



**Fig. 8 - Ritiro igrometrico libero del Control Mix, dell'FA-1 Mix e dell'FA-3 Mix (con fibre in PVA)**

**Prove di campo sulle lastre in calcestruzzo all'aria**

Le prove di campo sono state eseguite per verificare la formazione di fessure provocate dal ritiro contrastato, favorite dalla forma geometrica delle lastre (molto lunghe, poco larghe e molto sottili) e bloccate alle due estremità come è mostrato in Fig.10. Il numero e la larghezza media delle fessure sono state monitorate a 14 giorni mediante un microscopio ottico appoggiato sulla superficie delle lastre. La Tabella 6 mostra i risultati di queste prove di campo che possono essere così



**Fig. 9 - Variazione di lunghezza contrastato nei calcestruzzi con agente espansivo (CaO) ed additivo SRA nel GBA-2 Mix, nell'SF-2 Mix e nell'FA-2 Mix**

riassunti:

- in presenza di GBA, SF ed FA il numero e la larghezza delle fessure sono minori di quelle osservate nel *Control Mix*, in particolare se si impiega la cenere volante FA;
- in tutti i calcestruzzi con agente espansivo non si sono verificate fessure a causa dell'azione espansiva contrastata che ha compensato il ritiro igrometrico;
- in presenza delle macrofibre in PVA non si sono formate fessure sebbene le fibre non abbiano provocato alcuna variazione nel ritiro igrometrico (Fig. 6-8): questo effetto potrebbe essere messo in relazione con un rinforzo della matrice cementizia da parte delle fibre in PVA.



**Fig. 10 - Lastre (lunghe 8 m, larghe 40 cm e spesse 6 cm) bloccate alle estremità e lasciate all'aria esposte al ritiro igrometrico contrastato**

## CONCLUSIONI

La cenere pesante (GBA) da inceneritori di rifiuti solidi urbani (RSU) è stata macinata sotto acqua per produrre uno *slurry* molto fluido con un 40% di materiale solido e con una dimensione massima delle particelle macinate di 1.7  $\mu\text{m}$ . Questo *slurry* è stato impiegato per produrre calcestruzzi SCC in sostituzione del 12,5% di cemento Portland CEM I 52.5 R. Il comportamento della cenere pesante da RSU è stato confrontato con un fumo di silice e una cenere volante disponibili

sul mercato.

Sono state misurate la resistenza meccanica a compressione oltre alla durabilità attraverso prove di penetrazione d'acqua sotto pressione, diffusione del cloruro e penetrazione della  $\text{CO}_2$ .

Calcestruzzi con un additivo antiritiro SRA ed agente espansivo a base di CaO sono stati preparati per ridurre il ritiro igrometrico e le conseguenti fessure in tutti i calcestruzzi.

Inoltre, si è trovato che anche con l'impiego combinato di SRA e macrofibre in PVA sono state ridotte le fessure per numero e larghezza.

I risultati ottenuti hanno mostrato che i calcestruzzi con GBA si comportano in termini, di resistenza meccanica e durabilità come quelli con fumo di silice e meglio di quelli con cenere volante.

**Tabella 6 - Numero e massima larghezza delle fessure provocate dal ritiro igrometrico contrastato nelle lastre di calcestruzzo bloccate alle estremità (Fig. 10)**

OSSIDI (%)	Numero di fessure	Ampiezza massima delle fessure
Control Mix	3	1.5 mm
GBA-1 Mix	2	1.2 mm
SF-1 Mix	2	1.3 mm
FA-1 Mix	1	1.0 mm
GBA-2 Mix	---	---
SF-2 Mix	---	---
FA-2 Mix	---	---
GBA-3 Mix	---	---
SF-3 Mix	---	---
FA-3 Mix	---	---

## BIBLIOGRAFIA

1. Macias A., Fernandez E., Goñi S., Guerrero A., "Valorización de las cenizas de incineración de residuos sólidos urbanos en los materiales de construcción" (2001), Papel de los sectores cementero y de la construcción en la gestión y reciclado de residuos, CSIC, Madrid.
2. Paine K.A., Dhir R.K., Doran V.P.A., "Unprocessed and processed incinerator bottom ash as a cement bound material" in R.K.Dhir, T.D.Dyer, K.A. Paine (Eds.) "Use of incinerator ash" Proceedings of the International Symposium organized by the Concrete Technology Unit, University of Dundee (UK) 20-21/3/2000.
3. Bertolini L., Carsana M., Cassago D., Quadrio Curzio A. and Collepari M., "MSWI ashes as mineral additions in concrete", Cement and Concrete Research, 34, 1899-1906, 2004.
4. Collepari M., Collepari S., Ongaro D., Quadrio Curzio A. and Sammartino M., "Concrete with bottom ash from municipal solid wastes incinerators", 4th Non-Traditional Cement and Concrete Symposium, Brno Czech Republic, June 2011.