

# INFLUENZA DEL TENORE DI INCOMBUSTO DELLA CENERE VOLANTE SULLE PRESTAZIONI REOLOGICHE E MECCANICHE DEL CALCESTRUZZO

L. Coppola\*, S. Collepardi\*, R. Troli\*, G. Belz\*\*, M. Collepardi\*\*\*

\*Enco, Engineering Concrete - Spresiano (TV)

\*\* ENEL SpA, Centro Ricerche e Valorizzazione Residui, Brindisi

\*\*\* Dipartimento di Scienza dei Materiali e della Terra, Università di Ancona

## RIASSUNTO

In molte norme e raccomandazioni viene fissato un limite al tenore di incombusto delle ceneri volanti, espresso come perdita al fuoco (P.A.F.). In particolare, la norma europea EN 450 fissa questo limite al 5%. Questo valore, tuttavia, può essere aumentato al 7% su base nazionale. Pertanto, le ceneri volanti con un tenore di incombusto maggiore del 7% non possono essere impiegate per la produzione di cementi di miscela o per il confezionamento del calcestruzzo.

Sono state impiegate quattro ceneri volanti, provenienti da centrali termoelettriche a carbone, caratterizzate da un tenore in incombusto del 4, 7, 9 e 11%, per confezionare una serie di calcestruzzi, tutti con rapporto acqua/cemento (*a/c*) di 0.68, corrispondente ad un rapporto acqua/legante 0.48 e cenere/legante di 0.30. È stata impiegata una modesta quantità di additivo superfluidificante (0.3-0.4% sulla massa del cemento) per compensare la diminuzione di lavorabilità provocata dall'aggiunta di cenere volante con un tenore di incombusto maggiore o uguale al 7%. Sono stati confezionati anche due impasti di riferimento senza cenere caratterizzati da un rapporto *a/c* di 0.68 e 0.48. Le prestazioni di tutti questi impasti sono state valutate in termini di resistenza meccanica a compressione (da 1 a 180 giorni), di permeabilità all'acqua, di diffusione dei cloruri e dell'anidride carbonica.

I dati sperimentali hanno evidenziato come il tenore di incombusto della cenere non influenza negativamente nessuna delle proprietà studiate. I calcestruzzi con la cenere a più alto tenore di incombusto possiedono resistenze meccaniche a compressione più elevate, una più bassa permeabilità all'acqua, una diffusione più lenta sia dell'anidride carbonica che del cloruro rispetto ai calcestruzzi confezionati con la cenere con il più basso contenuto di incombusto. Pertanto, il criterio adottato dalle norme europee di scartare dall'impiego nel calcestruzzo le ceneri sulla base del contenuto di incombusto, senza determinare le prestazioni del calcestruzzo in termini di resistenza meccanica e durabilità, sembra non adeguato dal punto di vista tecnico ed economico.

## ABSTRACT

*In many standard specifications there is a limit for the maximum amount of unburnt carbon of fly ashes referred to as LOI. In particular, according to the European norm EN 450, this limit is 5% on the continental basis of the European Unity, or 7% on the domestic*

national basis. Therefore, fly ashes with LOI over 7% should be rejected in producing blended cements or manufacturing concrete mixtures.

Four fly ashes from coal-fired electric generating plants, with LOI content of about 4, 7, 9, and 11%, were used to manufacture concrete mixtures. They had the water-cement (w/c) ratio of 0.68, corresponding to a water-binder ratio of 0.48 and a fly ash/binder ratio of 0.30. A small amount of superplasticizer (0.3-0.4% by cement mass) was required to compensate the slump decrease caused by fly ash with higher LOI ( $\geq 7\%$ ). Two reference concrete mixtures, without fly ash, were also produced with a w/c of 0.68 and 0.48. The performance of all these concrete mixtures was assessed in terms of compressive strength (1-180 days), water permeability, chloride diffusion, and carbonation rate.

There was no evidence available which indicated that the LOI content of the fly ash affected negatively any of the properties studied. In particular, due perhaps to its peculiar pozzolanic activity, the fly ash with the highest LOI content (11.30%) performed better than that with the smallest amount of LOI material (4.19%). This occurred in terms of higher compressive strength, lower water-permeability, slower chloride diffusion, and decreased carbonation rate in the corresponding concretes. Therefore, the conformity criteria adopted by some standard specifications in rejecting fly ashes only on the basis of the relatively high LOI content, without determining the corresponding concrete performance in terms of strength and durability, appear to be technologically inadequate and uneconomical.

## 1. INTRODUZIONE

Secondo la norma europea EN 450 (1), tra i requisiti tecnici per la cenere volante da impiegare come aggiunta minerale nei cementi di miscela o nei calcestruzzi, vi è un limite nella perdita al fuoco (P.A.F.). Questo limite è del 5% in massa per le ceneri accettabili su base comunitaria e 7% per quelli accettabili su scala nazionale. Pertanto, le ceneri con un contenuto di incombusto maggiori del 7%, non possono essere impiegate né nell'Unione Europea, né in un singolo stato membro dell'Unione. Tuttavia, in molti altri paesi (Canada, India, Korea, etc.) il limite per la P.A.F. della cenere può arrivare fino al 12%.

Lo scopo primario di questa ricerca è stato lo studio dell'influenza della P.A.F. nella cenere volante sulle prestazioni del calcestruzzo in termini di lavorabilità, resistenza meccanica a compressione, penetrazione d'acqua, e durabilità.

## 2. MATERIALI E METODI

### Materiali

È stato impiegato un cemento Portland CEM I 42.5 R con massa volumica di 3.06 Kg/l e con una finezza Blaine di 330 m<sup>2</sup>/Kg, e quattro aggregati aventi massa volumica di 2.71 Kg/l. Al fine di riprodurre la distribuzione granulometrica ottimale di Bolomey ciascuno dei quattro aggregati è stato impiegato nelle seguenti percentuali: sabbia (0.195 - 4 mm) = 33.3%; ghiaia (2-8 mm) = 21.4%; ghiaia (4-10 mm) = 16%; ghiaia (8-20 mm) = 29.3%.

Sono state impiegate quattro ceneri volanti (A, B, C, D), caratterizzate da una diversa P.A.F. (nell'intervallo 4-11%). Le ceneri volanti A e D provenivano da due diverse centrali termoelettriche, mentre le ceneri volanti B e C sono state prodotte in laboratorio mescolando

le altre due ceneri. La Tabella 1 mostra la composizione chimica delle quattro ceneri volanti. La principale differenza tra questi materiali è il livello di P.A.F. il quale varia da un minimo di 4.19% per la cenere volante A fino ad un massimo di 11.3% per la cenere volante D. L'aumento nella P.A.F. è accompagnato da una diminuzione nella massa volumica in mucchio la quale varia da 0.68 Kg/l per la cenere volante D fino ad 0.88Kg/l per la cenere volante A. Non si sono registrate significative differenze nella distribuzione granulometrica delle quattro ceneri eseguite con granulometria laser. Le particelle di cenere volante presentavano un diametro medio di circa 50 µm. L'indice di attività pozzolanica a 28 giorni (Tabella 1), indipendentemente dal tenore di incombusto della cenere, era compreso tra 85.9 e 87.7%. A 90 giorni, invece, le ceneri con maggiore tenore di incombusto evidenziavano un indice di attività pozzolanica maggiore di quella delle ceneri a tenore di incombusto minore (Tabella 1).

Tabella 1 - Analisi chimica e massa volumica in mucchio delle ceneri volanti.

Composizione chimica (%):	Cenere volante:			
	A	B	C	D
SiO <sub>2</sub>	58.45	57.01	55.56	54.12
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	24.60	23.93	23.25	22.58
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.65	2.70	2.74	2.78
CaO	0.96	1.02	1.07	1.13
MgO	0.35	0.48	0.61	0.74
Na <sub>2</sub> O	0.40	0.41	0.42	0.43
K <sub>2</sub> O	3.39	2.97	2.56	2.14
Li <sub>2</sub> O	0.02	0.02	0.03	0.03
SrO	0.23	0.32	0.40	0.48
BaO	0.18	0.14	0.11	0.08
SO <sub>3</sub>	0.22	0.27	0.32	0.37
Cl <sup>-</sup>	0.06	0.08	0.09	0.11
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.01	0.13	0.24	0.36
PAF	4.19	6.56	8.93	11.30
Massa volumica in mucchio (kg/l)	0.88	0.81	0.75	0.68
Indice di attività pozzolanica* (%) a				
28 gg	87.5	85.9	87.7	86.1
90 gg	89.3	88.6	96.8	95.6

\* Rapporto in percentuale tra resistenza a compressione di provini normalizzati di malta confezionata con 75% di cemento e 25% di cenere volante in massa e la resistenza a compressione di provini normalizzati di malta preparati con solo cemento.

Nei calcestruzzi che contenevano le ceneri volanti *B*, *C*, e *D* è stato impiegato un superfluidificante a base naftalinica (40% in soluzione acquosa) allo scopo di ottenere approssimativamente lo stesso livello di lavorabilità (slump = 180-200 mm). Le composizioni dei calcestruzzi, come anche le proprietà degli impasti freschi sono riportate in Tabella 2. Le due miscele di riferimento, senza cenere volante, sono state prodotte con la stessa quantità di acqua d'impasto (200 Kg/m<sup>3</sup>) e diversi dosaggi di cemento: 417 Kg/m<sup>3</sup> e 294 Kg/m<sup>3</sup> per i calcestruzzi di riferimento individuati rispettivamente come *R*<sub>1</sub> e *R*<sub>2</sub>. Pertanto, il rapporto *a/c* adottato è stato di 0.48 e 0.68 rispettivamente per le miscele di riferimento *R*<sub>1</sub> ed *R*<sub>2</sub>. A causa del minor rapporto *a/c*, la miscela di riferimento *R*<sub>1</sub> è potenzialmente più durabile che non quella di riferimento *R*<sub>2</sub>. In particolare, secondo la norma europea ENV 206 (2), il calcestruzzo di riferimento *R*<sub>1</sub> è impermeabile all'acqua e capace di resistere alla penetrazione della CO<sub>2</sub> in aria umida (classe di esposizione 2a) e di ioni Cl<sup>-</sup> in ambiente marino (classe di esposizione: 4a). Infatti, secondo la norma europea, il rapporto *a/c* non dovrebbe superare il valore di 0.55 per garantire impermeabilità, e 0.60 o 0.55 per i requisiti di durabilità nelle classi di esposizione 2a o 4a rispettivamente. Pertanto, il calcestruzzo di riferimento *R*<sub>2</sub> con un rapporto *a/c* di 0.68, è senza dubbio permeabile all'acqua e non durabile nei confronti della penetrazione della CO<sub>2</sub> e del Cl<sup>-</sup>.

Tabella 2 - Composizioni e proprietà dei calcestruzzi freschi.

Composizione/Proprietà	Calcestruzzi di riferimento:		Calcestruzzo con cenere volante:			
	<i>R</i> <sub>1</sub>	<i>R</i> <sub>2</sub>	A	B	C	D
cemento (kg/m <sup>3</sup> ): c	417	294	294	294	291	293
aggregato (kg/m <sup>3</sup> )	1744	1879	1720	1720	1716	1717
acqua (kg/m <sup>3</sup> )	200	200	200	200	198	199
superfluidificante (kg/m <sup>3</sup> )	-	-	-	0.8	1.1	1.3
cenere volante (kg/m <sup>3</sup> ): cv	-	-	126	126	124	125
cv/(c+cv)	-	-	0.30	0.30	0.30	0.30
<i>a/c</i>	0.48	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68
<i>a/l</i>	0.48	0.68	0.48	0.48	0.48	0.48
slump (mm)	190	200	200	190	190	190
volume di aria (%)	2.1	1.1	1.2	1.2	1.5	1.4
massa volumica (kg/m <sup>3</sup> )	2361	2373	2340	2341	2330	2335

Sono stati prodotti quattro calcestruzzi introducendo la cenere in luogo del 30% del cemento (in massa) nel calcestruzzo di riferimento *R*<sub>1</sub>. Pertanto, la quantità di legante nei calcestruzzi con cenere (circa 420 Kg/m<sup>3</sup>) è la stessa del contenuto di cemento nel calcestruzzo di riferimento *R*<sub>1</sub>. D'altra parte, il contenuto di cemento nei calcestruzzi con cenere (circa 294 Kg/m<sup>3</sup>) è lo stesso del calcestruzzo di riferimento *R*<sub>2</sub>. Nei calcestruzzi con la cenere è stata impiegata la stessa quantità di acqua d'impasto (circa 200 Kg/m<sup>3</sup>) di quella

presente nei calcestruzzi di riferimento (*R*<sub>1</sub> ed *R*<sub>2</sub>). Tuttavia, con le ceneri volanti con maggior contenuto di P.A.F. (*B*, *C*, e *D*), è stato impiegato un superfluidificante (circa 1 kg per m<sup>3</sup> di calcestruzzo) per raggiungere la stessa lavorabilità iniziale (slump = 190-200 mm) dei calcestruzzi di riferimento a pari quantità di acqua d'impasto (circa 200 Kg/m<sup>3</sup>). Ciò significa che, all'aumentare del contenuto di incombusto nella cenere la lavorabilità del calcestruzzo diminuisce leggermente, probabilmente per l'assorbimento d'acqua da parte del carbonio incombusto di natura porosa. Tuttavia, questa leggera diminuzione di lavorabilità può essere compensata con una piccola aggiunta di additivo superfluidificante. Il rapporto *a/c* nei calcestruzzi con cenere (0.68) è lo stesso del calcestruzzo di riferimento *R*<sub>2</sub> ed è più alto del calcestruzzo di riferimento *R*<sub>1</sub> (0.48). Tuttavia, tenendo conto della quantità di cenere presente nell'impasto, il rapporto *a/l* nelle miscele con cenere è lo stesso del rapporto *a/c* (0.48) del calcestruzzo di riferimento *R*<sub>1</sub> e minore del rapporto *a/c* (0.68) del calcestruzzo di riferimento *R*<sub>2</sub>. In sostanza - a parità di lavorabilità - tutti i calcestruzzi con cenere (*A*, *B*, *C* e *D*) posseggono lo stesso rapporto *a/c* del calcestruzzo di riferimento *R*<sub>2</sub> e lo stesso rapporto *a/l* del calcestruzzo di riferimento *R*<sub>1</sub>.

### Metodi

Sono state eseguite misure di resistenza meccanica a compressione su provini cubici (100 mm) stagionati a 20°C (U.R. = 95%) da un giorno fino a sei mesi.

Sono state eseguite prove di permeabilità all'acqua (secondo il metodo ISO 7031) su calcestruzzi stagionati a umido a 28 o a 90 giorni. Sono considerate impermeabili secondo la norma ENV 206 (2), le strutture in calcestruzzo che presentino una penetrazione dell'acqua nei provini stagionati 28 giorni non superiore a 20 mm secondo il metodo ISO 7031 soprannominato (3).

E' stata misurata la penetrazione del cloruro secondo la norma italiana UNI 7928 (4) nei provini sformati a 7 giorni, stagionati a umido fino a 28 giorni, e quindi permanentemente esposti ad una soluzione acquosa di NaCl (10%).

E' stata misurata la penetrazione dell'anidride carbonica secondo la norma italiana UNI 9944 nei provini di calcestruzzo sformati a 7 giorni e quindi immediatamente esposti ad una atmosfera di aria arricchita con CO<sub>2</sub> (30%) con una umidità relativa del 65%. Non è stata eseguita alcuna stagionatura umida addizionale per simulare le condizioni reali nelle quali avviene la carbonatazione allorché le strutture sono state appena scasserate.

### 3. RISULTATI

La Figura 1 mostra l'influenza del tipo di cenere volante sulla resistenza meccanica a compressione (da 1 a 180 giorni) rispetto ai due calcestruzzi di riferimento *R*<sub>1</sub> e *R*<sub>2</sub>.

La resistenza meccanica a compressione del calcestruzzo di riferimento *R*<sub>1</sub> è risultata sempre più alta di quella del calcestruzzo di riferimento *R*<sub>2</sub> sia alle brevi che alle lunghe stagionature. Questa differenza è dovuta, naturalmente, alla differenza nel rapporto *a/c* dei due calcestruzzi (0.48 contro 0.68).

Le resistenze meccaniche dei calcestruzzi con cenere volante sono risultate sempre più basse di quelle del calcestruzzo di riferimento *R*<sub>1</sub> e sempre più alte di quelle del calcestruzzo

di riferimento  $R_2$ . Questi risultati si accordano molto bene con le resistenze meccaniche che ci si

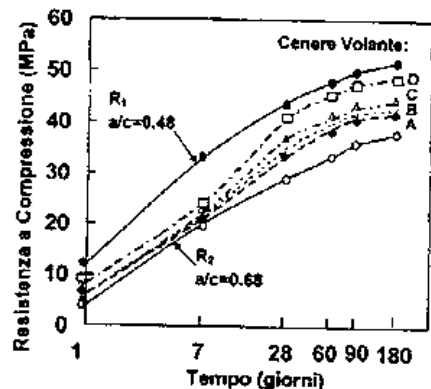


Fig. 1 - Sviluppo della resistenza meccanica per i calcestruzzi di riferimento (senza cenere) e con cenere volante.

dovrebbe attendere in base al rapporto  $a/c$  (0.68) ed al rapporto  $a/l$  (0.48) dei calcestruzzi con cenere volante. Alle stagionature più lunghe (maggiori di 7 giorni) la velocità di aumento della resistenza meccanica nei calcestruzzi con cenere è stata più alta di quella dei calcestruzzi di riferimento senza cenere. Di nuovo, questi risultati si accordano molto bene con il ruolo giocato dalla cenere volante la quale agisce come legante cementizio solo a tempi molto lunghi quando l'idrossido di calcio prodotto per idratazione del cemento Portland diventa disponibile e quindi può avvenire la reazione pozzolanica. Tuttavia, si è sorprendentemente trovato che non vi era alcuna relazione tra il contenuto della P.A.F. e la resistenza meccanica dei calcestruzzi. Di fatto, la cenere volante *D*, con il maggior contenuto di P.A.F. (11.30%), si è comportata molto meglio della cenere volante *A* con il minor contenuto di P.A.F. (4.19%).

Questo non necessariamente significa che ad un maggior contenuto di P.A.F. corrisponda sempre un calcestruzzo con migliori prestazioni in termini di resistenza meccanica. Questo semplicemente significa che la discriminazione basata sul contenuto di P.A.F. oltre il 5 o il 7% - come nella norma europea EN 450 - può non essere adeguato come criterio per stabilire se una determinata cenere sia o no accettabile come ingrediente del calcestruzzo.

Le prove di penetrazione dell'acqua eseguite dopo 28 e 90 giorni di stagionatura indicano che il calcestruzzo di riferimento  $R_1$  è "impermeabile" sia a 28 che a 90 giorni in quanto la penetrazione dell'acqua è stata significativamente più bassa del massimo valore consentito (20 mm) dalla norma europea (2). Ciò è dovuto al rapporto  $a/c$  (0.48) che è molto più basso del massimo valore (0.55) raccomandato per la produzione di calcestruzzo impermeabile secondo la norma ENV 206 (2). D'altra parte, il calcestruzzo di riferimento  $R_2$  è risultato essere, invece, permeabile all'acqua, poiché la penetrazione dell'acqua (60 mm a 28 giorni e 50 mm a

90 giorni) è risultata significativamente al di sopra del limite dei 20 mm. Ciò è dovuto al rapporto  $a/c$  (0.68) che è risultato molto più alto del valore massimo raccomandato (0.55) dalla norma ENV 206 (2). La penetrazione di acqua attraverso i provini di calcestruzzo con cenere volante è risultata in accordo con il comportamento atteso dei materiali pozzolanici: sia a 28 giorni che a 90 giorni, la penetrazione dell'acqua è risultata minore di quella del calcestruzzo di riferimento  $R_2$  (a pari  $a/c = 0.68$ ) e maggiore di quella del calcestruzzo di riferimento  $R_1$  (a parità di  $a/l = 0.48$ ). Tuttavia, a causa della reazione pozzolanica che si sviluppa alle stagionature più lunghe, i calcestruzzi con cenere volante dopo una stagionatura di 90 giorni diventano impermeabili all'acqua (penetrazione dell'acqua minore di 20 mm), e, quindi prossimi alle prestazioni di impermeabilità del calcestruzzo di riferimento  $R_1$ . Questo andamento è simile a quello già esaminato per lo sviluppo delle resistenze meccaniche (Fig. 1). Di nuovo, non si registra alcun ruolo negativo da parte del contenuto di P.A.F. delle ceneri volanti nei confronti della penetrazione dell'acqua purché tutte le miscele siano state prodotte a parità di slump e di rapporto  $a/c$  (Tabella 2). Il calcestruzzo con la cenere volante *D*, caratterizzata dal maggior contenuto di P.A.F. (11.30%), si è comportata leggermente meglio del calcestruzzo con cenere volante *A* contenente materiale incombusto molto più basso (4.19%). Pertanto, con un contenuto di P.A.F. entro l'intervallo di 4-11%, esaminato in questa ricerca, sembrerebbe che, la qualità della matrice cementizia che circonda le particelle di carbonio incombusto giochi un ruolo più importante che non la quantità stessa di carbonio incombusto nei confronti della prestazione del calcestruzzo, in termini sia di resistenza meccanica (Fig. 1) sia di impermeabilità. È possibile che, per qualche ragione non ancora conosciuta ma che sia in relazione con le specifiche caratteristiche pozzolaniche, la cenere volante *D*, malgrado il suo maggior contenuto di incombusto, sia di qualità tale da migliorare le caratteristiche della matrice cementizia più di quanto non faccia la cenere volante *A* con un minor contenuto di incombusto.

La Figura 2 mostra la penetrazione del cloruro nei provini di calcestruzzo immersi in una soluzione acquosa di NaCl (10%). I dati ottenuti confermano che vi è una relazione lineare tra la penetrazione del  $Cl^-$  ( $x$ ) e la radice del tempo ( $\sqrt{t}$ ):  $x=4 \cdot \sqrt{Dt}$ . Ciò indica che la penetrazione del cloruro attraverso il calcestruzzo avviene in accordo con un processo di diffusione che è regolato dalla seconda legge di Fick (6) e che il coefficiente di diffusione ( $D$ ) possa approssimativamente essere calcolato dal valore di  $k$  che rappresenta la pendenza delle curve (7):  $D=k^2/16$ .

Dalla pendenza delle curve in Fig. 2 è possibile calcolare il valore di  $D$ :

calcestruzzo di riferimento $R_2$ ( $a/c=0.68$ )	:	$D = 6.3 \cdot 10^{-6} \text{ mm} \cdot \text{sec}^{-1}$
calcestruzzo di riferimento $R_1$ ( $a/c=0.48$ )	:	$D = 3.2 \cdot 10^{-6} \text{ mm} \cdot \text{sec}^{-1}$
calcestruzzi con ceneri <i>A, B, C</i> ( $a/l=0.48$ )	:	$D = 1.8 \cdot 10^{-6} \text{ mm} \cdot \text{sec}^{-1}$
calcestruzzo con cenere <i>D</i> ( $a/l=0.48$ )	:	$D = 1.6 \cdot 10^{-6} \text{ mm} \cdot \text{sec}^{-1}$

Questi dati indicano che il coefficiente di diffusione dei cloruri è minore nei calcestruzzi con la cenere volante rispetto al valore dei corrispondenti calcestruzzi di riferimento  $R_1$  ed  $R_2$ . Ciò è in accordo con i dati consolidati della letteratura sulla diffusione del cloruro attraverso calcestruzzi confezionati con cemento Portland e cemento pozzolanici a pari rapporto  $a/l$ , e questo è stato attribuito alla interazione tra gli ioni  $Cl^-$  che diffondono attraverso i pori saturi d'acqua del calcestruzzo e l'area superficiale della pozzolana e/o i prodotti calce-pozzolana che sono in grado di

adsorbire i cloruri e ritardare, quindi, il processo di diffusione di questi ioni (6). Naturalmente, i calcestruzzi con cenere volante si comportano molto meglio del calcestruzzo di riferimento  $R_2$  non solo per la presenza di pozzolana, che ritarda la diffusione del Cl<sup>-</sup>, ma anche per il minor rapporto  $a/c$  (0.48 contro 0.68).

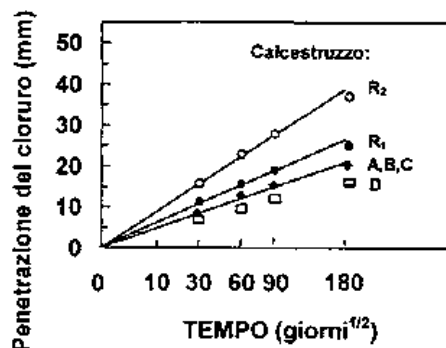


Fig. 2 - Penetrazione del cloruro in provini di calcestruzzo stagionati per 28 giorni in funzione del tempo di esposizione ad una soluzione acquosa di NaCl (10%).

Di nuovo non vi è alcun incremento nella velocità di diffusione del Cl<sup>-</sup> all'aumentare della quantità di carbonio incombusto nelle ceneri volanti (Fig. 2). La cenere volante  $D$ , con il maggior contenuto di incombusto (11.3%), si comporta meglio, in termini di minor penetrazione del cloruro, delle altre ceneri volanti, ed in particolare della cenere  $A$  che possiede il minor contenuto di incombusto (4.19%).

La Fig. 3 mostra la velocità di carbonatazione dei provini di calcestruzzo esposti all'aria arricchita in CO<sub>2</sub> (30%). In generale, la penetrazione della CO<sub>2</sub> in questo test accelerato è circa 100 volte più rapida che non quella che avviene in aria naturale. A scopi comparativi la carbonatazione di diversi calcestruzzi può essere valutata in pochi mesi usando questo test accelerato. La velocità di carbonatazione dei calcestruzzi con cenere volante è risultata essere più bassa di quella del calcestruzzo di riferimento  $R_2$  a pari rapporto  $a/c$  (0.68) e più alta di quella del calcestruzzo di riferimento  $R_1$  a pari  $a/c$  (0.48). Il processo di carbonatazione non è controllato da un semplice meccanismo di diffusione della CO<sub>2</sub> attraverso i pori aperti del calcestruzzo. Esso è in realtà il risultato di due distinti fenomeni:

- la diffusione della CO<sub>2</sub> attraverso il sistema poroso della matrice cementizia: più il sistema è poroso, più rapida è la velocità di diffusione della CO<sub>2</sub>;
- combinazione della CO<sub>2</sub> con il Ca(OH)<sub>2</sub> prodotto per idratazione del cemento: maggiore è la quantità di calce di idrolisi prodotta per idratazione del cemento Portland, più lungo è il tempo richiesto per la neutralizzazione di tutta la calce.

Ciò che viene misurato attraverso il test alla fenofaleina è lo spessore di calcestruzzo nel quale la calce di idrolisi è neutralizzata dalla CO<sub>2</sub>. Perciò, in confronto ai calcestruzzi con la cenere volante, il processo di carbonatazione nei calcestruzzi di riferimento  $R_2$  a pari  $a/c$

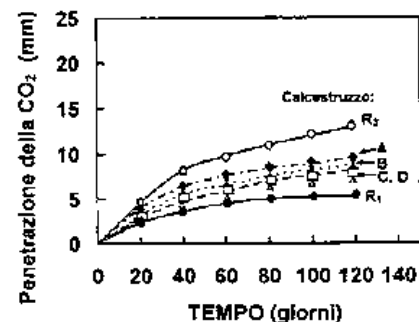


Fig. 3 - Penetrazione della CO<sub>2</sub> nei provini di calcestruzzo esposti ad aria arricchita in CO<sub>2</sub> (30%).  $R_1$  ed  $R_2$ : calcestruzzi di riferimento; A, B, C e D: calcestruzzi con cenere volante.

(0.68), è avvenuto con maggiore velocità (Fig. 3) a causa della più alta porosità che è risultata un fattore predominante rispetto alla maggiore quantità di idrossido di calcio che si è formato. D'altra parte, la velocità di carbonatazione è risultata più bassa nel calcestruzzo di riferimento  $R_1$ , che non nei calcestruzzi con cenere volante, in quanto il calcestruzzo di riferimento conteneva più calce di idrolisi che non gli altri calcestruzzi. Inoltre, la matrice cementizia risultava essere meno porosa a causa del più basso rapporto acqua/cemento ( $a/c$ ). Tutti i dati sopra esaminati sono in buon accordo con i dati pubblicati sin dal 1990 sulla influenza delle aggiunte pozzolaniche nei confronti dei processi di carbonatazione (8). Ciò che appare di nuovo nel presente lavoro - e in disaccordo con quanto previsto dalla norma EN 450 - è l'assenza di una qualsiasi relazione tra il contenuto di incombusto nelle ceneri di carbone e la velocità di carbonatazione nei calcestruzzi contenenti le ceneri. Di nuovo, il calcestruzzo con la cenere volante  $D$ , caratterizzato dal più alto valore di incombusto (11.3%), si è comportato meglio, in termini di una minore velocità di carbonatazione (Fig. 3), che non il calcestruzzo con la cenere volante  $A$  caratterizzato da un minor contenuto di incombusto (4.10%).

#### 4. CONCLUSIONI

I risultati di questa ricerca indicano che le ceneri volanti con un minor contenuto di materiale incombusto non necessariamente si comportano meglio di quelle con un maggior contenuto di incombusto. Questi risultati non sono in accordo con i criteri di conformità della norma europea EN 450 (1) secondo la quale si dovrebbero rigettare le ceneri volanti, da impiegare come materiali supplementari nel calcestruzzo o come materie seconde per la produzione dei cementi di miscela, allorché il contenuto di perdita al fuoco è al di sopra del limite del 5% (su scala europea) o del 7% (a livello di norma nazionale).

In realtà, i risultati della presente ricerca hanno mostrato che, a parità di *slump* e di rapporto *a/c* delle miscele, il contenuto di incombusto (4-11%) non influenza negativamente la prestazione del calcestruzzo in termini di resistenza meccanica, di penetrazione d'acqua, di diffusione del cloruro, e di carbonatazione.

Anzi, si è sorprendentemente trovato che la cenere volante *D*, quella caratterizzata dal maggior contenuto di P.A.F. (11.30%), si è comportata sempre meglio della cenere *A* che era caratterizzata da un minor contenuto di incombusto (4.19%). Questo potrebbe essere attribuito alla specifica composizione ed allo specifico comportamento della cenere *D* la quale si è comportata come una pozzolana migliore malgrado il maggior contenuto di incombusto.

Tuttavia, poiché l'aumento di materiale incombusto nella cenere volante è stato accompagnato da un aumento nella richiesta di acqua d'impasto a pari lavorabilità, è stata richiesta una piccola quantità di superfluidificante (0.3-0.4 % in massa sul cemento oppure 0.6-1% rispetto alla massa della cenere) per compensare questo effetto e mantenere costante il rapporto *a/c* a pari lavorabilità. In termini di costo il superfluidificante basato sul prezzo medio del superfluidificante naftalinico disponibile in Italia (1000 lire/Kg), corrisponde a circa 4 - 8 lire per kg di cenere volante. Con questo costo leggermento maggiore è possibile utilizzare, per la produzione dei cementi di miscela e del calcestruzzo, anche ceneri volanti che dovrebbero, invece, essere escluse da questo impiego per l'eccesso di incombusto rispetto ai limiti della norma europea EN 450.

#### BIBLIOGRAFIA

- (1) European Standard EN 450, "Fly Ash for Concrete. Definitions, Requirements and Quality Control", 1994.
- (2) European Prestandard ENV 206, "Concrete. Performance, Production, Placing and Compliance Criteria", 1988.
- (3) ISO 7031, "Hardened Concrete. Determination of Water Penetration Under Pressure" (in Francese).
- (4) UNI 7928 "Determinazione della penetrazione dello ione cloruro".
- (5) UNI 9944, "Corrosione e protezione dell'acciaio nel calcestruzzo. Determinazione della profondità di carbonatazione e del profilo di penetrazione degli ioni cloruro".
- (6) Collepari, M., Marcialis, A. and Turriziani, R., *Journal of American Ceramic Society*, 55, pp. 534-535, 1972.
- (7) Collepari, M., Marcialis, A. and Turriziani, R., *Il Cemento*, 67, pp. 157-164, 1970.
- (8) Collepari, M., *L'Edilizia*, 10, pp. 609-620, 1990.