

# **USI DELLA CENERE VOLANTE, DEL FUMO DI SILICE, DELLA LOPPA E DELLE POZZOLANE NATURALI IN EUROPA: ORIENTAMENTI PER IL FUTURO**

M. Collepardi

# USI DELLA CENERE VOLANTE, DEL FUMO DI SILICE, DELLA LOPPA E DELLE POZZOLANE NATURALI IN EUROPA: ORIENTAMENTI PER IL FUTURO

Ref. F. Finzi

## 1. Storia dell'uso della pozzolana nell'antichità in Europa

La cenere volante, il fumo di silice ed altri materiali silicei, come le pozzolane naturali, sono stati abbondantemente impiegati in Europa.

Le malte di calce e pozzolana naturale ed il calcestruzzo erano impiegati in Europa molto prima dell'invenzione del cemento Portland nel 19° secolo.

I Romani facevano largo uso di un materiale pozzolanico a base di tufo zeolitico scoperto a Pozzuoli, nella baia di Napoli; così questo materiale divenne popolare in tutto il mondo con il nome di "pozzolana".

Quando altri materiali in grado di reagire con la calce vennero scoperti in altri Paesi come la Germania, la Francia, la Spagna, il termine pozzolana venne usato per indicare qualsiasi materiale pozzolanico, indipendentemente dall'origine geologica e dalla composizione chimica.

Dato che i Romani impararono l'arte della costruzione sviluppata dai Greci, non è sorprendente apprendere che il calcestruzzo a base di calce e pozzolana naturale è stato impiegato in Grecia a partire dal 700 a.C. (1).

Lea (2) riporta anche l'uso presso i Romani della prima pozzolana artificiale ricavata dalla frantumazione dei mattoni di vecchie costruzioni deteriorate. Pozzolane naturali a base di trass, un tufo vulcanico, sono state impiegate in antiche costruzioni romane lungo il Reno, in Germania (2). Depositi di trass sono stati scoperti anche in Romania ed URSS (1).

Molti edifici romani, come il Pantheon a Roma, o strutture idrauliche, come i famosi acquedotti romani, sono ancor oggi in eccellenti condizioni, a testimonianza della durabilità a lungo

*European countries such as Germany, France, Italy, URSS, Greece and the Netherlands have had a long history of interest in saving energy, and therefore since a long time they are engaged in the manufacture of large amounts of Portland blended cements containing pozzolanic materials such as fly ash, natural pozzolans and blast furnace slag. Recently there is interest also in Europe, as it occurs in North America (USA and Canada) since a long time, in utilizing pozzolanic materials in the form of concrete ingredients rather than as components of blended cements: this is particularly true for by-products materials such as fly ash and silica fume. The paper presents the advantages and the drawbacks in using the pozzolanic materials as blended cements produced at the cement plant or concrete ingredients utilized at the batching plant.*

termine dei prodotti cementizi a base di pozzolana.

## 2. Uso attuale in Europa dei materiali pozzolanici ed orientamenti per il futuro

Paesi europei come la Germania, la Francia, l'URSS, l'Italia, la Grecia ed i Paesi Bassi sono orientati da molti anni verso una politica di risparmio energetico e di conseguenza sono impegnati da tempo nella produzione di grandi quantità di cementi di miscela contenenti cemento Portland e materiali pozzolanici come la loppa o le pozzolane naturali.

Recentemente si è sviluppato anche in Europa, come già avviene nel Nord America da tempo, l'interesse per l'uso di materiale pozzolanico quale ingrediente del calcestruzzo anziché come componente di cementi di miscela; questo soprattutto per quanto riguarda dei sottoprodotti come il fumo di silice e la cenere volante.

### 2.1 Cementi Portland di miscela

La produzione e l'uso di cementi Portland di miscela si sono diffusi in Europa fin dal 19° secolo.

In diversi Paesi europei esistono normative standard per cementi pozzolanici e d'altoforno.

Tuttavia, a causa di vari motivi, in alcuni Paesi solo uno dei summenzionati cementi di miscela (3, 4) viene effettivamente prodotto in larga scala. Per esempio in Italia, che è il più grande produttore di cemento dell'Europa occidentale (36 milioni di tonnellate annue), più del 40% del cemento è di tipo Portland pozzolanico contenente circa 25% di pozzolana, mentre la produzione del cemento d'altoforno raggiunge solo il 7%. Questa differenza nella quantità di cemento pozzolanico e d'altoforno può essere attribuita sia alle grandi disponibilità di pozzolane naturali in tutto il Paese, sia all'antica tradizione nell'uso delle pozzolane.

Ragioni simili possono spiegare perché tutti i cementi Portland prodotti in Grecia contengano generalmente il 10% di pozzolana vulcanica dell'isola Santorini, chiamata Terra di Santorini.

D'altro canto, la quantità di cemento pozzolanico prodotto in Germania Occidentale è molto piccola. Non più di 50.000 tonnellate di pozzolana naturale vengono impiegate ogni anno per produrre cementi Portland di miscela. Nella Germania Occidentale il cemento d'altoforno è molto più popolare del cemento pozzolanico, probabilmente perché questo Paese è uno dei maggiori produttori di acciaio in Europa, e

conseguentemente la loppa d'altoforno è disponibile in grandi quantità.

Poiché la pozzolana naturale e la loppa d'altoforno sono generalmente disponibili sotto forma di particelle grossolane, questi materiali sono stati impiegati fin dal 19° secolo per produrre cementi di miscela macinando assieme nel mulino clinker Portland gesso, pozzolane o loppa.

Con l'avvento della cenere volante, fine quasi quanto il cemento, il processo di macinazione della pozzolana nel mulino del cemento non è più necessario, essendo sufficiente un processo di miscelazione nel separatore.

Grazie al risparmio energetico dovuto a questo cambiamento, la cenere volante sta sostituendo la pozzolana naturale in molti paesi europei nella produzione di "cementi di miscela" (a base di pozzolana).

D'altro canto molti Paesi europei che nel passato non producevano cementi pozzolanici, per mancanza di pozzolana naturale locale, stanno cominciando a produrre cemento pozzolanico a base di cenere volante.

## 2.2 Vantaggi dei cementi di miscela

Oltre al risparmio energetico per i cementieri nella produzione di cementi di miscela, ci sono altri vantaggi tecnici per i consumatori di cemento pozzolanico o d'altoforno.

Nella Tabella 1 sono riassunti i miglioramenti ottenuti nelle prestazioni del calcestruzzo sostituendo il cemento Portland con cementi di miscela.

La riduzione dello sviluppo di calore è dovuta sostanzialmente al minor contenuto di cemento Portland. La Fig. 1 mostra lo sviluppo di calore del cemento Portland e dei cementi di miscela

Tabella 1. Miglioramenti tecnici nelle prestazioni del calcestruzzo ottenuti sostituendo il cemento Portland con cemento pozzolanico o d'altoforno

Effetto	Struttura in calcestruzzo interessata
Riduzione dello sviluppo di calore	Dighe ed altre strutture massive
Aumento della resistenza ai solfati del calcestruzzo	Strutture esposte ad attacco solfatico
Riduzione nella penetrazione dei cloruri (miglioramento della protezione delle armature contro la corrosione)	Calcestruzzi armati per strutture marine e strutture esposte ai soli disgelanti
Riduzione della reattività alcali-aggregati	Calcestruzzi con inerti reattivi

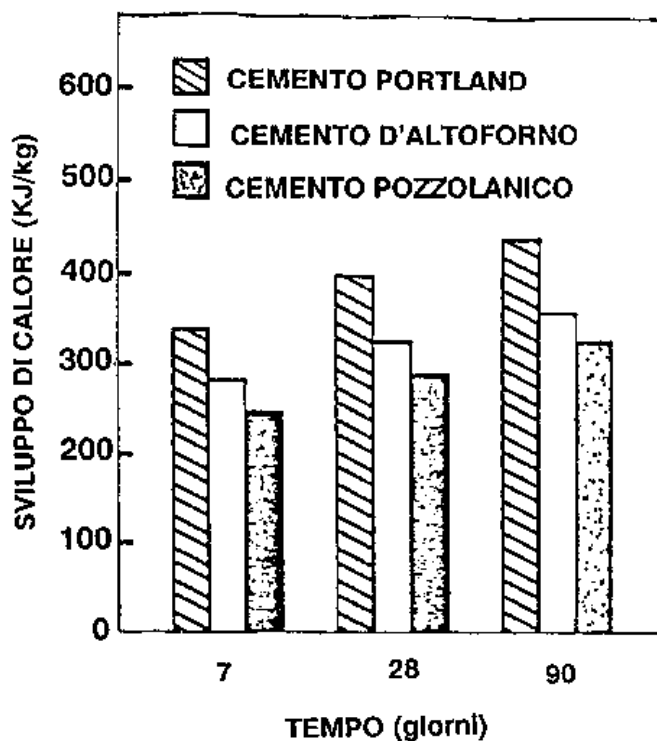


Fig. 1 - Sviluppo del calore di idratazione di cementi Portland e cementi Portland di miscela (25% di loppa o cenere volante tipo F).

contenenti 25% di loppa o pozzolana naturale.

Il miglioramento della resistenza ai solfati del calcestruzzo è dovuto principalmente alla riduzione di idrossido di calcio liberato dall'idratazione del cemento e conseguentemente alla riduzione della quantità di gesso che si forma per reazione dei solfati con l'idrossido di calcio; la Fig. 2 mostra la variazione di lunghezza di

provini di calcestruzzo immersi in soluzione acquosa al 10% di  $MgSO_4$ ; l'impiego di cemento d'altoforno e soprattutto di cemento pozzolanico, anziché di cemento Portland, riduce l'espansione causata dall'attacco solfatico.

La penetrazione dei cloruri nel calcestruzzo è causa di pericolo perché favorisce la corrosione delle armature. La penetrazione dei cloruri si verifica in accordo

con la legge di Fick (5):

$$J = - D \frac{dC}{dx}$$

dove  $J$  è la quantità di cloruri penetrati nel calcestruzzo per unità di superficie e di tempo,  $C$  è la concentrazione di cloruri a varie profondità ( $x$ ) nel calcestruzzo e  $D$  è il coefficiente di diffusione che dipende dalle proprietà intrinseche del calcestruzzo (rapporto  $a/c$ , tempo di stagionatura, tipo di cemento). Il coefficiente  $D$  può essere calcolato se la curva  $x-t$  (Fig. 3) è ricavata dalla seguente equazione:  $4\sqrt{Dt}$

Il coefficiente di diffusione  $D$ , con un rapporto acqua/cemento di 0.55 ed un tempo di stagionatura di 28 gg. per impasti di calcestruzzo contenenti cemento Portland e cementi Portland di miscela, è riportato in Tabella 2.

La Tabella 2 mostra che il coefficiente di diffusione dei cloruri di un calcestruzzo con cemento d'altoforno o cemento pozzolanico è rispettivamente circa il 30% o 50% del valore  $D$  di un calcestruzzo con cemento Portland.

### 2.3 Inconvenienti dei cementi di miscela

I calcestruzzi con miscele di cemento Portland hanno una minore resistenza meccanica e sono maggiormente inclini al rischio di carbonatazione rispetto a calcestruzzi a base di cemento Portland (Tabella 3).

A causa del minore contenuto di cemento Portland, che significa maggior rapporto  $a/c$ , e della relativa lentezza della pozzolana e della loppa nella reazione con la calce e l'acqua, le resistenze meccaniche a breve stagionatura dei cementi Portland di miscela sono inferiori a quelle dei corrispondenti calcestruzzi con cemento Portland (Fig. 4).

Tuttavia, grazie alla successiva

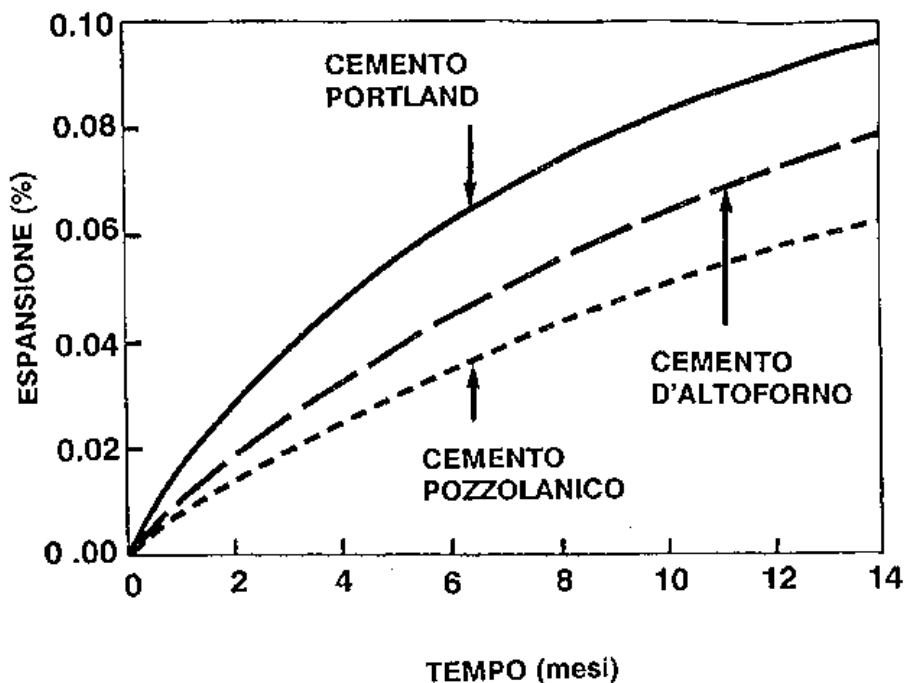


Fig. 2 - Variazione della lunghezza di provini in calcestruzzo immersi in soluzione acquosa di  $MgSO_4$  (10%). Dosaggio cemento =  $300 \text{ kg/m}^3$ ;  $a/c = 0.55$ ; loppa o cenere volante = 20% nel cemento di miscela; stagionatura prima dell'attacco solfatico = 28 giorni.

reazione della loppa o della pozzolana, le resistenze alle lunghe stagionature (dopo i 90 gg.) di calcestruzzi con cementi Portland di miscela sono allo stesso livello

di quelle di calcestruzzo con cemento Portland (Fig. 4).

La carbonatazione consiste nella reazione della calce libera prodotta dall'idratazione del ce-

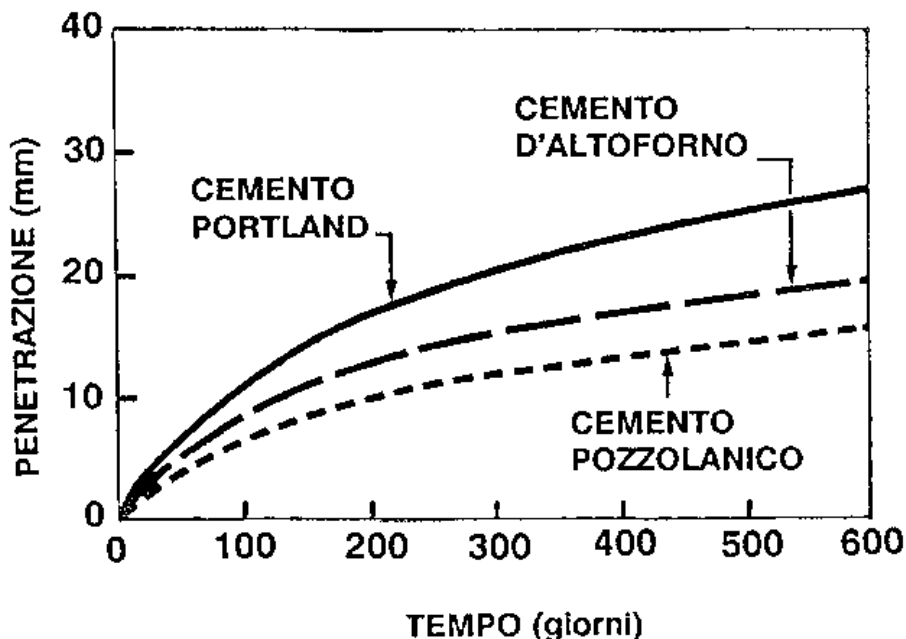


Fig. 3 - Penetrazione dei cloruri in calcestruzzi con cemento Portland e cementi di miscela (per il proporzionamento vedi Tabella 6).

Tabella 2 - Legge di Fick e coefficiente di diffusione degli impasti in calcestruzzo di Figura 3.

$J = -D \frac{dc}{dx}$		$x = 4 \sqrt{Dt}$	
TIPO DI CEMENTO	PORTLAND	ALTOFORNO (* *)	POZZOLANICO (* **)
D' (mm <sup>2</sup> /s)	1 · 10 <sup>-6</sup>	0.5 · 10 <sup>-6</sup>	0.3 · 10 <sup>-6</sup>

(\*) Valori di D calcolati dalla Figura 3.

(\* \*) 25% di loppa.

(\* \*\*) 25% di cenere volante tipo F.

mento con l'anidride carbonica dell'atmosfera.

La carbonatazione abbassa quindi l'alcalinità del calcestruzzo e in questo modo ne riduce l'efficacia quale mezzo protettivo per i ferri d'armatura. Di solito la carbonatazione non avviene in profondità nei calcestruzzi di buona qualità con basso rapporto acqua/cemento ed adeguatamente consolidati e stagionati. Essa può provocare la corrosione dei ferri solo in calcestruzzi porosi o dove il copriferro di calcestruzzo è relativamente sottile.

Tabella 3. Inconvenienti dei calcestruzzi con cementi di miscela in confronto a calcestruzzi con cemento Portland.

EFFETTO	SVANTAGGI DELLA STRUTTURA IN CALCESTRUZZO
Minore resistenza iniziale	Ritardo nella rimozione dei casseri soprattutto per il periodo invernale
Processo di carbonatazione più veloce	Minore protezione dei ferri d'armatura in strutture di calcestruzzo "magro" esposte all'anidride carbonica dell'atmosfera.

In tal caso, la diminuzione di calce libera, conseguente alla reazione pozzolanica, può far aumentare il tasso di carbonatazione in calcestruzzi con loppa ed in particolare con ceneri volanti. La Fig. 5 illustra il processo di car-

Il calcestruzzo con cemento Portland ha migliori prestazioni del calcestruzzo con cemento pozzolanico per quanto riguarda la resistenza alla penetrazione della CO<sub>2</sub>.

Entrambi i summenzionati in-

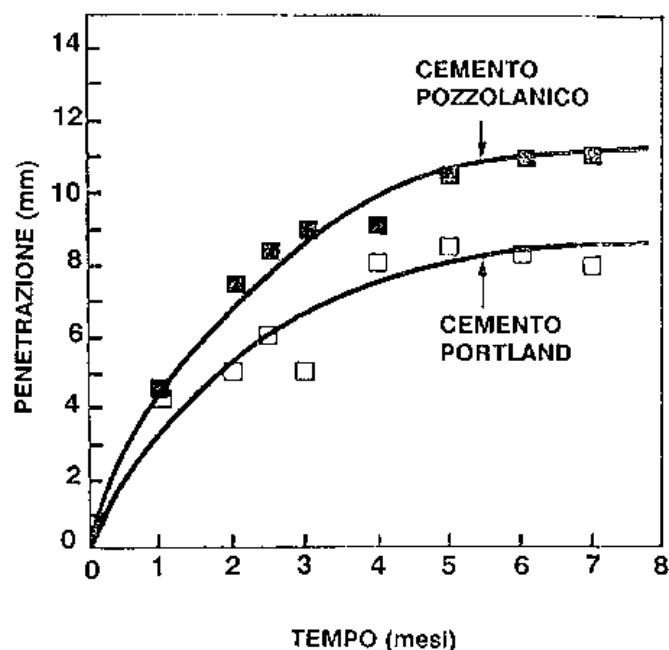


Fig. 4 - Resistenza meccanica a compressione del calcestruzzo in funzione del tempo con cemento Portland o pozzolanico (20% di cenere volante tipo F).

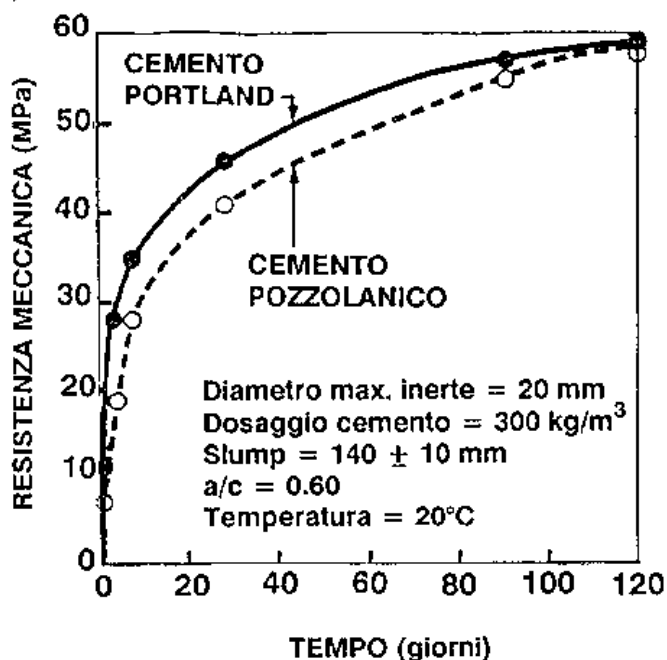


Fig. 5 - Penetrazione dell'anidride carbonica nel calcestruzzo con dosaggio di cemento Portland o cemento pozzolanico (20% di cenere volante tipo F) di 250 kg/m<sup>3</sup>. Dopo una stagionatura umida di 7 giorni, i provini sono stati esposti all'aria (U. R. = 60%).

convenienti (Tabella 3) possono essere ridotti o completamente rimossi con l'aggiunta di cenere volante, come descritto nella sezione 3.

### 3. Uso attuale in Europa della cenere volante ed orientamenti per il futuro.

Nella pratica la cenere volante può essere impiegata nel calcestruzzo in uno dei due seguenti metodi:

- a) La cenere volante può essere impiegata in sostituzione del cemento Portland in un cemento di miscela di tipo pozzolanico; questo utilizzo può avvenire mescolando cenere volante e cemento Portland in cemeniera (come discusso nella sezione 2.1), o sostituendo una parte del cemento con cenere volante all'impianto di betonaggio. Le prestazioni di calcestruzzi contenenti cenere volante in sostituzione di una parte di cemento sono state discusse nelle sezioni 2.2 e 2.3.
- b) La cenere volante può essere introdotta come componente aggiuntivo nell'impianto di miscelazione del calcestruzzo. La prima alternativa è stata messa in pratica in Europa per la produzione di cementi d'altoforno e cementi pozzolanici a base di pozzolana naturale poiché sia la lappa che la pozzolana naturale devono essere macinate nel mulino del cemento. La seconda alternativa si sta lentamente sviluppando in Europa grazie all'avvento della cenere volante che, a causa della finezza relativamente elevata, non necessita di macinazione e quindi non necessariamente deve essere aggiunta in cemeniera.

Tabella 4. Percentuale di cenere volante impiegata nelle cementerie o negli impianti di betonaggio di alcuni Paesi europei alla fine degli anni '70

PAESE	% CENERE VOLANTE IMPIEGATA	ANNO
Francia *	24	1978
Regno Unito *	19	1978
Polonia *	14	1945
Danimarca *	14	1981
Germania *	9	1978
Italia * *	24	1980

\* Vedi ref. (7); \*\* da 50 a 60% nel 1987 (8)

La Tabella 4 mostra le percentuali di cenere volante impiegate nel cemento e nel calcestruzzo alla fine degli anni settanta in alcuni Paesi europei, quando, a causa della crisi petrolifera, l'utilizzo del carbone e di conseguenza la disponibilità di cenere volante cominciarono ad aumentare. I dati della Tabella 4 indicano che in alcuni Paesi europei una quantità compresa tra il 10% e il 30% di tutta la cenere volante disponibile alla fine degli anni settanta è stata destinata alle miscele di cemento e al calcestruzzo.

Questi dati dimostrerebbero che in Europa la percentuale di cenere volante devoluta alle costruzioni in calcestruzzo era leggermente superiore al valore medio di 11,4% stimato da Mans (6) nel 1977 per la produzione di cenere volante mondiale (280 milioni di tonnellate circa).

Attualmente la percentuale di cenere volante destinata al cemento o al calcestruzzo è stimata attorno al 50-60% in molti Paesi dell'Europa occidentale.

Alcune difficoltà impediscono l'impiego di percentuali maggiori di cenere volante perché non ci sono generalmente sufficienti aree coperte per lo stoccaggio della cenere volante prima delle distribuzioni ai consumatori di cemento o calcestruzzo [8].

D'altro canto, l'impiego di ce-

mento ed in particolare della cenere volante è sensibilmente ridotto nel periodo invernale, proprio quando viene consumato più carbone ed è quindi disponibile una maggiore quantità di cenere volante. Il contrario avviene nella stagione estiva. Queste discrepanze stagionali fra la disponibilità e la richiesta di cenere volante potrebbero bloccare i progressi nell'uso delle ceneri volanti a meno che non si indirizzino gli investimenti verso la costruzione di aree coperte per lo stoccaggio. Attualmente l'eccesso di cenere volante prodotto nel periodo invernale viene convertito ad usi alternativi per disattivare miniere, consolidare terreni, ecc.

La Tabella 5 illustra la produzione totale di cenere volante (tipo F e C) e cenere pesante prevista fino al 2000 in nove Paesi dell'Europa occidentale. Si prevede che la quantità di cenere volante tipo F aumenterà da 21,8 milioni di tonnellate annue nel 1985 a 13 milioni nel 2000, mentre non ci saranno variazioni sostanziali della quantità di cenere volante tipo C prodotta principalmente dalla lignite. Mentre la cenere volante può essere impiegata come materia prima per i cementi di miscela o come componente aggiuntivo del calcestruzzo, la cenere pesante, essendo più grossolana, può essere impiegata in modo

**Tabella 5. Produzione (milioni di tonnellate/anno) di cenere di carbone prevista nei Paesi Europei \* (8).**

ANNO	CENERE VOLANTE		CENERE PESANTE
	TIPO F	TIPO C	
1985	22.8	16.6	7.2
1990	23.4	16.7	7.3
1995	31.1	16.7	8.3
2000	32.1	16.7	8.4

\* Belgio, Danimarca, Germania, Finlandia, Italia, Paesi Bassi, Spagna, Svizzera, Regno Unito.  
In Italia nel 1990 sono disponibili 1.2 milioni di tonnellate/anno di ceneri, delle quali l'8.5% sono di tipo F.

vantaggioso solo nel mulino del cemento per la produzione di cemento pozzolanico.

Quando la cenere volante viene impiegata come componente aggiuntivo senza alcuna riduzione del contenuto di cemento, gli inconvenienti consistenti nel ritardo dell'indurimento e nell'accelerazione della carbonatazione (Fig. 4 e 5) possono essere completamente rimossi.

Nella tabella 6 vengono riportati i dosaggi di cemento delle miscele di calcestruzzo contenenti cenere volante in aggiunta o in sostituzione del cemento.

Grazie all'impiego di piccoli dosaggi di fluidificante lo slump di tutti gli impasti è stato riportato a 140 mm.

I dati della Tabella 6 dimostrano che la cenere volante riduce i tempi di presa quando viene impiegata come componente aggiuntivo (impasto n° 3), mentre

allunga i tempi di presa quando sostituisce una parte del cemento Portland (impasto n° 2). Questi dati confermano la regola generale di Dodson (9) secondo la quale quando i tempi di presa vengono estesi dalla cenere volante, l'allungamento dei tempi di presa è dovuto alla diluizione del contenuto di cemento Portland: secondo Dodson, i tempi di presa vengono ridotti se il contenuto totale di legante (cemento + cenere volante) è aumentato (impasto n° 3 della Tabella 6) e i tempi di presa vengono allungati se aumenta il rapporto a/c (impasto n° 2 della Tabella 6). Tuttavia questa regola non ha affatto significato generale dato che altri fattori, come il contenuto di solfato e di calcio e l'assorbimento di acqua da parte delle ceneri volanti, possono influenzare le caratteristiche della presa.

I dati della Fig. 6 sono in accor-

do con quelli della Tabella 6 poiché la cenere volante aumenta le resistenze meccaniche sia alle brevi che alle lunghe stagionature qualora venga usata come componente aggiuntivo, mentre riduce la resistenza meccanica alle brevi stagionature quando viene impiegata in sostituzione di una parte del cemento.

Effetti simili sono stati registrati per quanto riguarda il processo di carbonatazione (Fig. 7). La cenere volante riduce la velocità di carbonatazione di miscele di calcestruzzo povere in cemento quando è impiegata come componente aggiuntivo perché riduce la permeabilità del calcestruzzo. D'altro canto, la cenere volante aumenta la velocità di carbonatazione soprattutto durante i primi tre mesi quando è impiegata in sostituzione di una parte di cemento in un cemento pozzolanico perché aumenta la permeabilità: tuttavia dopo tre mesi la differenza nella velocità di carbonatazione di calcestruzzo con cemento Portland e calcestruzzo con cemento pozzolanico è trascurabile.

#### 4. Uso attuale in Europa del fumo di silice e orientamenti per il futuro.

Ultimo, ma non per questo meno importante, il fumo di silice è stato studiato in Europa all'inizio degli anni '50, per la prima volta nel mondo, come additivo minerale per calcestruzzo presso l'Istituto Norvegese di Tecnologia (10). Alla metà degli anni '70 l'uso del fumo di silice è iniziato, sia nella pratica che in laboratorio, in molti Paesi scandinavi: Norvegia, Svezia, Danimarca e Islanda (9). Dopo di allora, il lavoro di ricerca e l'uso pratico del fumo di silice sono iniziati in molti Paesi non europei.

**Tabella 6. Caratteristiche della miscela e tempi di presa di impasti in calcestruzzo con e senza cenere volante (Tipo F).**

IMPASTO N°	DOSAGGIO CEMENTO PORTLAND (kg/m³)	CENERE VOLANTE (kg/m³)	a/c	a / (c+c.v.)	TEMPO DI PRESA (h:min.)	
					INIZ.	FINALE
1	300		0.60	-	4:55	7:15
2	240	60	0.75	0.60	5:15	7:45
3	300	60	0.60	0.50	4:15	6:40

a - acqua; c - cemento; c.v. - cenere volante.

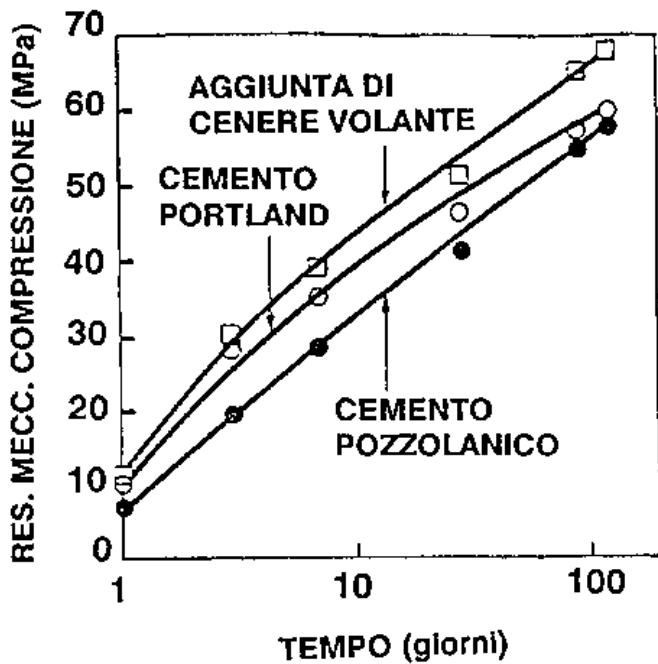


Fig. 6 - Effetto della cenere volante in aggiunta o in sostituzione del cemento sulla resistenza meccanica a compressione del calcestruzzo (vedi Tabella 5).

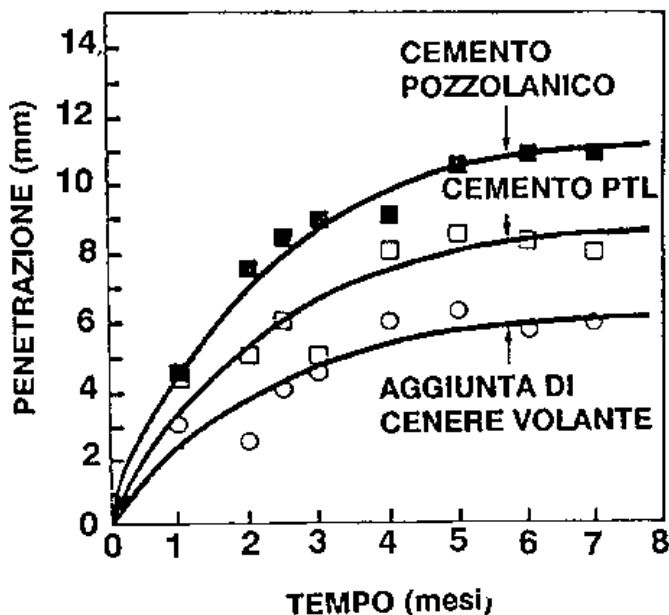


Fig. 7 - Effetto della cenere volante sulla carbonatazione in miscele di calcestruzzo povere di cemento. Cenere volante come componente aggiuntivo del calcestruzzo = 50 kg/m<sup>3</sup>. Contenuto di cemento Portland o pozzolanico (20% di cen. vol.) = 250 kg/m<sup>3</sup>. I provini, dopo 7 giorni di stagionatura umida, sono stati esposti all'aria (U.R. = 60%).

Attualmente la Norvegia e l'Unione Sovietica sono fra i maggiori produttori di fumo di silice. Quantità minori di fumo di silice sono disponibili in altri Paesi europei quali la Francia, la Germania, l'Italia, ecc.

Ci sono molte interessanti relazioni (10-16) sulle eccellenti pre-

stazioni del fumo di silice impiegato come materiale pozzolanico che non vengono discusse in questa sede.

In questo articolo vengono esaminati solo alcuni aspetti specifici concernenti l'uso futuro del fumo di silice.

Innanzitutto la quantità totale

di fumo di silice è molto piccola in comparazione ad altri materiali pozzolanici come la cenere volante o la loppa. Jahren (14) stima che molto meno di 1 milione di tonnellate annue siano disponibili in Europa occidentale e in Giappone.

A causa della forte richiesta di mercato, il prezzo del fumo di silice è relativamente elevato, da 1.5 a 3 volte il prezzo del cemento. Questo significa che nel futuro l'uso del fumo di silice sarà rivolto alle miscele di cemento speciale come le malte premiscelate per restauro ed ancoraggio, oppure a calcestruzzi speciali di grande qualità dove sono richieste resistenza meccanica elevata e soprattutto durabilità a lungo termine. Inoltre, poiché il fumo di silice non dà grandi prestazioni quando è impiegato da solo, a causa della forte richiesta d'acqua, per le applicazioni speciali summenzionate il fumo di silice deve essere usato in combinazione con un superfluidificante a dosaggi piuttosto elevati (da 2 a 6% sul peso del cemento).

La spesa aggiuntiva per il superfluidificante trasformerà ancor più il fumo di silice in un additivo pozzolanico veramente speciale.

In vista di questi orientamenti futuri, l'autore del presente articolo ritiene che, nell'ambito della ricerca scientifica, dovrebbero essere analizzati e/o approfonditi i tre seguenti aspetti:

- a) comportamento tixotropico degli impasti di cemento;
- b) fragilità dei calcestruzzi ad alta resistenza;
- c) tendenza alla fessurazione.

#### 4.1 Comportamento tixotropico degli impasti di cemento

Quando una malta o un calcestruzzo freschi vengono spruzzati su una vecchia struttura in calce-



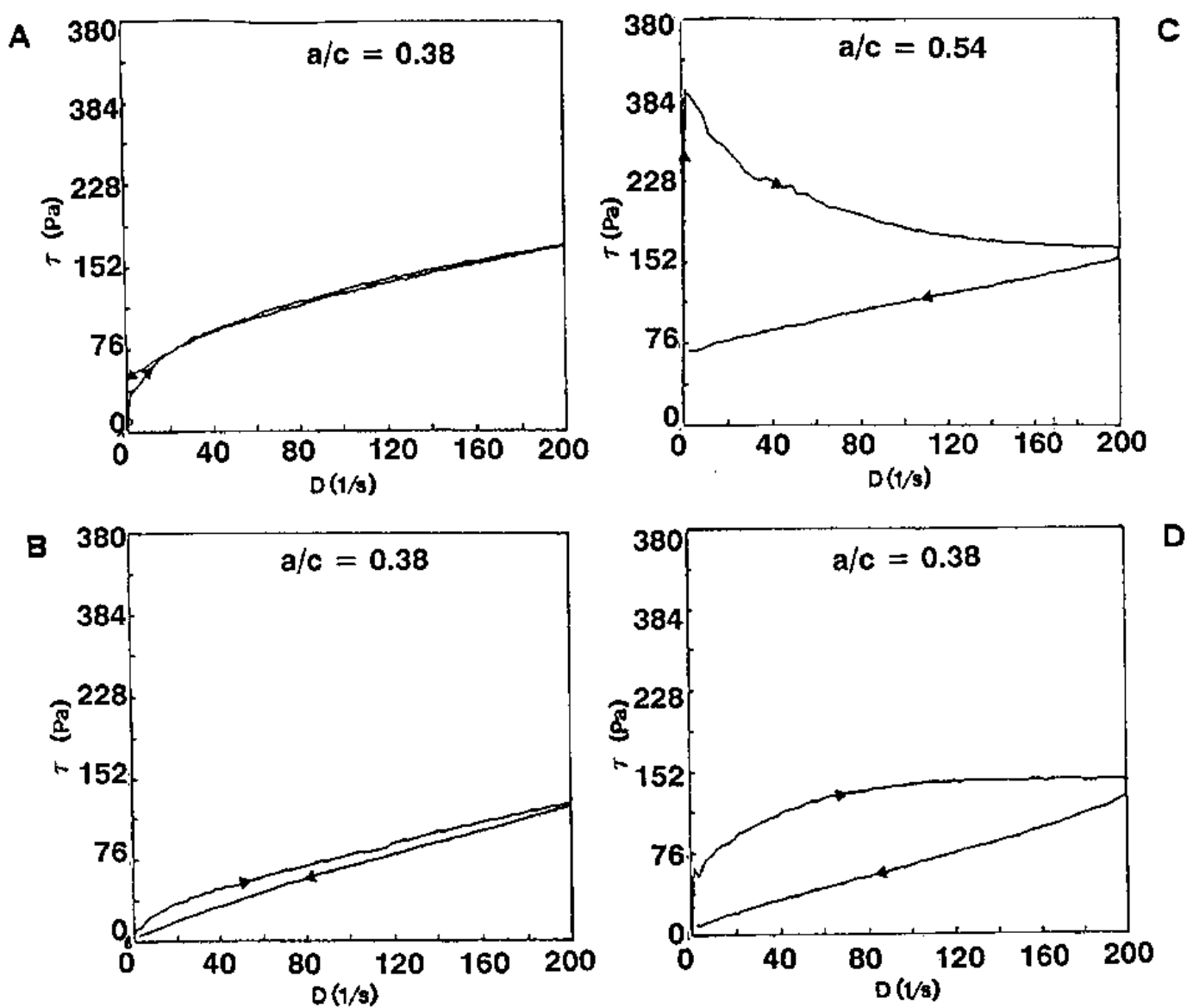


Fig. 8 - Tensione di scorrimento ( $\tau$ ) in funzione del gradiente di scorrimento ( $D$ ) per paste di cemento (A); paste di cemento e superfluidificante (B); paste di cemento e fumo di silice (C); paste di cemento, fumo di silice e superfluidificante (D).

struzzo, lo "sfrido" può essere ridotto o completamente eliminato aumentando la tixotropicità della miscela di cemento spruzzata. Questa tecnica viene impiegata in Europa per spruzzare miscele di cemento di elevata qualità per ripristinare strutture in calcestruzzo deteriorate senza impiegare additivi acceleranti di presa, che potrebbero danneggiare la durabilità a lungo termine della

malta o calcestruzzo per restauro.

La combinazione di fumo di silice e superfluidificante è vantaggiosamente impiegata per ottenere degli impasti di cemento molto tixotropici, che siano pompabili e spruzzabili anche con rapporto acqua/cemento molto basso e che allo stesso tempo non debba "cedere" subito dopo la spruzzatura.

La valutazione delle caratteristiche tixotropiche può essere effettuata esaminando le proprietà reologiche della miscela di cemento. Lo Fig. 8 illustra la curva tensione di scorrimento ( $\tau$ ) - gradiente di scorrimento ( $D$ ) per impasto di cemento tal quale (A); con superfluidificante (B); con fumo di silice (C); con superfluidificante (4%) e fumo di silice (D).

In presenza del solo fumo di si-

lice (Fig. 8-C), l'impasto appare coesivo, ma molto rigido anche con rapporto acqua/cemento di 0.55. Ciò corrisponde ad un valore molto elevato del limite di scorrimento ed un valore relativamente grande dell'area del ciclo di isteresi fra la curva superiore e quella inferiore. Con l'aggiunta combinata di superfluidificante e fumo di silice il rapporto acqua/cemento passa da 0.55 a 0.38. L'aspetto di questo impasto è molto coesivo e coloso ma, al tempo stesso, molto scorrevole. In confronto all'impasto tal quale (Fig. 8A) o a quello con il solo superfluidificante (Fig. 8B), l'impasto di cemento contenente sia il superfluidificante che il fumo di silice (Fig. 8D) mostra un maggior limite di scorrimento ed un più grande ciclo di isteresi in conse-

guenza del più spiccato carattere tixotropico: in altre parole un impasto del genere, pur fluido, rimane attaccato per la sua "appiccicosità".

#### 4.2 Fragilità dei calcestruzzi ad elevata resistenza meccanica

Anche se il fumo di silice da solo non provoca nessun cambiamento significativo nella duttilità del calcestruzzo (10), il calcestruzzo con elevata resistenza meccanica - incluso il calcestruzzo additivato con superfluidificante e fumo di silice - si comporta come un materiale relativamente fragile. Tuttavia, un materiale fragile non significa necessariamente una costruzione fragile perché il progetto e le armature possono trasformare comple-

tamente una struttura fragile in una duttile.

Prove di sforzo-deformazione sono state eseguite su un calcestruzzo di resistenza meccanica medio-alta (40 MPa) e su uno ad elevata resistenza meccanica (80 MPa) entrambi contenenti superfluidificante (4%) e fumo di silice (15%); prove di caricamento ciclico sono state eseguite con curve di carico e scarico a velocità costante (fig. 9-10-11).

La Fig. 10 mostra il comportamento relativamente duttile di un provino di calcestruzzo con resistenza meccanica normale, mentre la Fig. 10 mostra la fragilità di un provino di calcestruzzo ad elevata resistenza meccanica poiché la pendenza della curva sforzo-deformazione è molto più ripida. Tuttavia quando il calcestruzzo

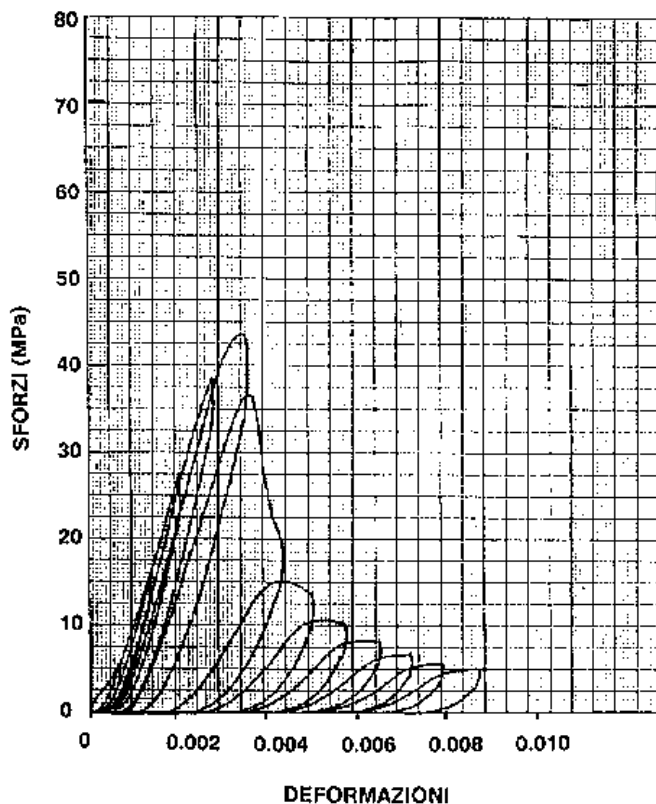


Fig. 9 - Prova di carico con cicli sforzo-deformazione su calcestruzzo a resistenza meccanica normale (40 MPa).

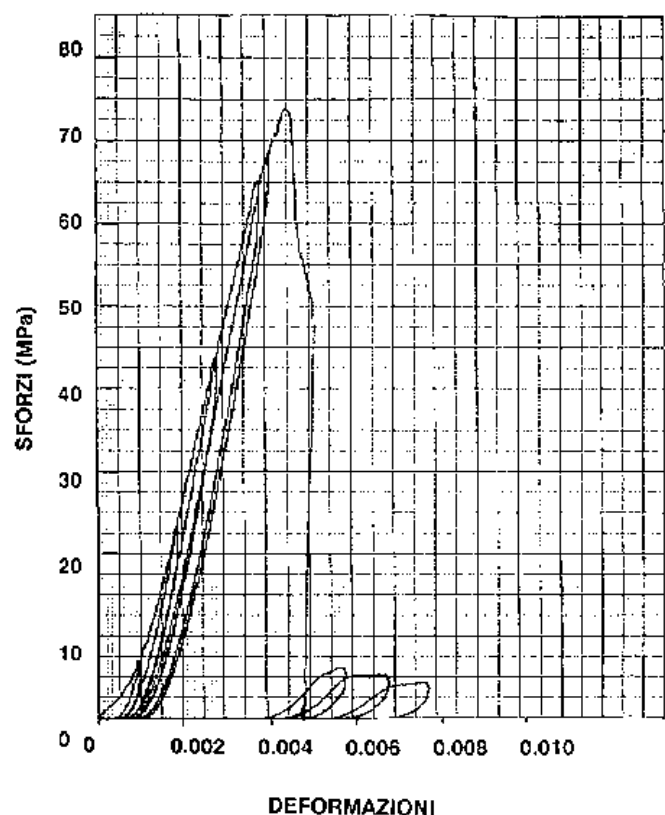


Fig. 10 - Prova di carico con cicli sforzo-deformazione su calcestruzzo ad alta resistenza meccanica (80 MPa).

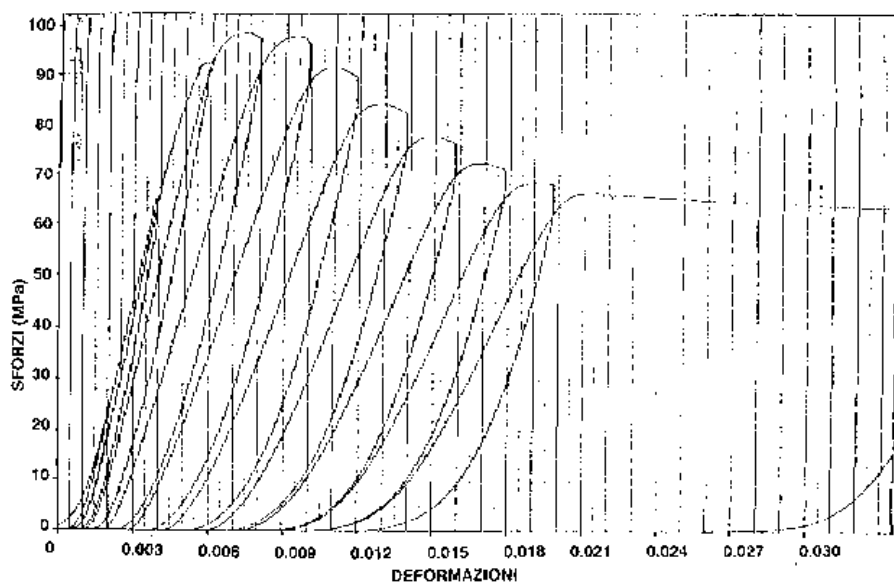


Fig. 11 - Prova di carico con cicli sforzo-deformazione su calcestruzzo armato ad alta resistenza meccanica (80 MPa).

ad elevata resistenza meccanica viene armato si trasforma in un materiale molto duttile (Fig. 11).

Poiché il calcestruzzo ad elevata resistenza meccanica contenente fumo di silice è destinato generalmente solo a strutture armate, si dovrebbero incoraggiare gli studi su progetti ed armature adeguate all'utilizzo delle potenziali proprietà di calcestruzzi di elevata resistenza meccanica con fumo di silice.

#### 4.3 Tendenza alla fessurazione

In genere gli impasti cementizi con fumo di silice hanno un ritiro potenzialmente maggiore di quello degli impasti cementizi di riferimento.

L'effetto è più evidente sui provini in pasta (17) o malta (18) soprattutto con elevato contenuto di fumo di silice (superiore al 10%). I dati del ritiro (10, 18, 19) del calcestruzzo sono più difficili da valutare e si sono ottenuti anche risultati contraddittori (10).

Johansen ha riscontrato che il fumo di silice rende il calcestruzzo vulnerabile alle fessurazioni do-

vute sia al ritiro plastico (20) che a quello da essiccamento (18).

Alcuni esperimenti effettuati da Chatterji, Collepari e Moriconi (21) hanno dimostrato che il procedimento di miscelazione influenza significativamente la formazione delle fessurazioni in presenza di fumo di silice. Quando il cemento e il fumo di silice sono stati miscelati normalmente con acqua, le fessure sono apparse entro le 24 ore dal getto anche se i provini erano stati conservati ancora nella cassaforma ed in ambiente umido. Quando il fumo di silice è stato miscelato con acqua, e quindi successivamente si è aggiunto il cemento, non si sono osservate fessurazioni se non quando i provini sono stati esposti in un'atmosfera molto asciutta.

Perciò sembra che, in assenza di umidificazione preliminare, il fumo di silice possa assorbire acqua dalla pasta di cemento provocando un ritiro "interno" e poi delle fessurazioni visibili anche in atmosfera umida.

Per spiegare tale tendenza alla fessurazione, ed in particolare l'effetto del procedimento di miscelazione, si dovrebbe proporre

un nuovo modello per la morfologia del fumo di silice. Dalla misura della grandezza delle particelle, il fumo di silice appare formato da particelle molto piccole, da 0,01 e 1 micron, con un valore medio di 0,1 micron. Secondo le fotografie al microscopio elettronico a scansione il fumo di silice appare sotto forma di particelle che arrivano fino a 30 micron (Fig. 12) e anche più. Attualmente, si assume che le particelle da 0,1 micron possano formare delle particelle più grandi tramite "deboli" legami solido-solido (modello "chicchi d'uva separati").

Un modello alternativo (modello "grappolo d'uva") viene proposto dall'autore del presente articolo. Secondo questo nuovo modello fra le piccole particelle di fumo di silice (0,1 micron) esistono dei legami relativamente forti, dovuti probabilmente ad un processo di vetrificazione, che provocano l'aggregazione delle particelle più piccole in "grappoli" più grandi come quelli osservati con il microscopio elettronico a scansione (Fig. 12).

La superficie specifica BET relativamente alta del fumo di silice, misurata tramite l'assorbimento di  $N_2$  (da 15 a 30  $m^2/g$ ) è in accordo sia con il modello "grappolo d'uva" sia con il modello "chicchi d'uva separati". Effettivamente, anche per il nuovo modello, la superficie specifica dovrebbe essere molto elevata per il fatto che le molecole di  $N_2$  possono penetrare negli interstizi vuoti fra le singole particelle di fumo di silice. Il modello "grappolo d'uva" potrebbe spiegare perché il fumo di silice può causare fessurazioni negli impasti di cemento anche in atmosfera umida. Parte dell'acqua d'impasto potrebbe lasciare la pasta di cemento e penetrare negli interstizi vuoti fra le singole particelle della microstruttura "grappolo d'u-

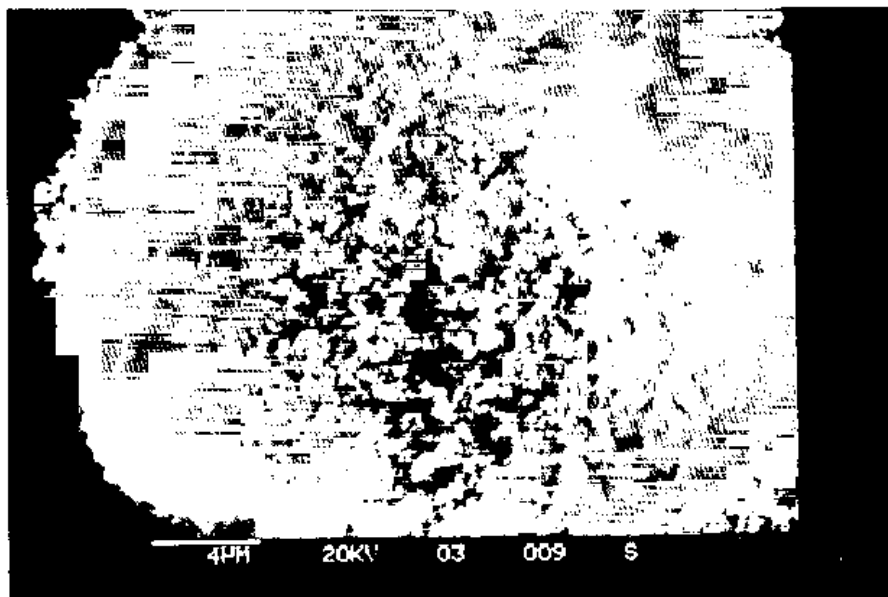


Fig. 12 - Silice fume vista al microscopio a scansione elettronica. Si noti l'aggregazione delle piccole particelle che formano come un "grappolo".

va". D'altro canto mescolando inizialmente con cura il fumo di silice con acqua si potrebbe saturare la microstruttura del fumo di si-

lice e rimuovere l'inconveniente della tendenza alla fessurazione delle miscele di cemento contenenti fumo di silice.

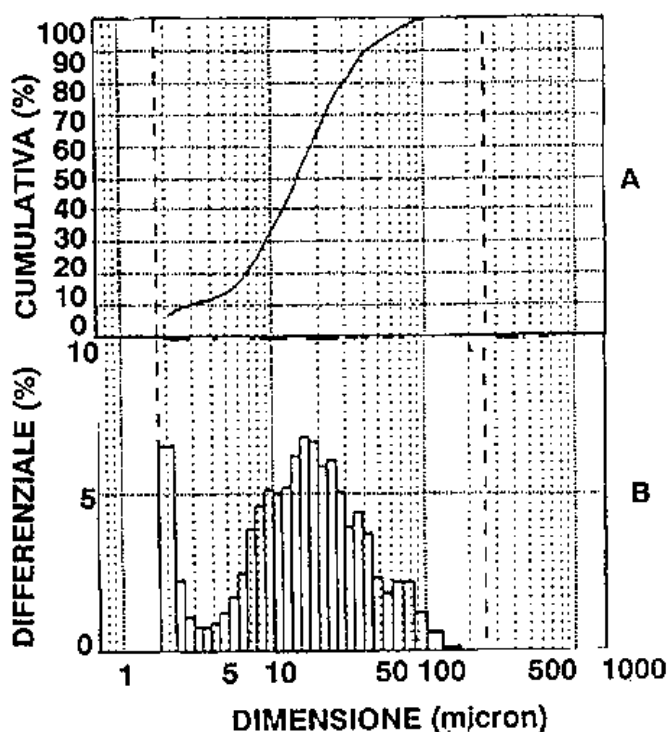


Fig. 13 - Distribuzione della dimensione delle particelle di fumo di silice eseguita mediante analizzatore laser: cumulativa (A) e differenziale (B).

Se il suddetto modello a "grappolo d'uva" fosse corretto, ciò non sarebbe in accordo con la misura delle dimensioni delle particelle (da 0.01 a 1 micron) trovata in letteratura (15). Effettivamente l'autore del presente articolo non è mai stato in grado di riprodurre questi risultati sulla dimensione delle particelle analizzando molti campioni di fumo di silice di origini diverse. La fig. 13 illustra la distribuzione delle particelle di fumo di silice ottenuta impiegando un analizzatore a laser dopo aver disperso il campione polverizzato di fumo di silice in acqua tramite impulsi a ultrasuoni. La distribuzione delle dimensioni delle particelle fino a 100 micron (Fig. 13) è in accordo sia con la fotografia al microscopio elettronico a scansione (Fig. 12) sia con il modello "grappolo d'uva".

Sono necessarie maggiori ricerche per spiegare la discrepanza nella distribuzione delle dimensioni delle particelle fra i risultati del presente articolo (Fig. 13) e quelli precedentemente riportati dalla letteratura tecnica (15).

## Bibliografia

[1] Mehta, P.K., "Natural Pozzolans", *Supplementary Cementing Materials for Concrete*; Editor: V. M. Malhotra; CANMET; 1987.

[2] Lea, F. M. *The Chemistry of Cement and Concrete*; chemical Publishing, inc; 1971.

[3] Massazza F., "Chemistry of Pozzolanic Additions and Mixed Cements", *Proceedings of the Sixth International Congress on the Chemistry of Cement*; Moscow; 1974.

[4] Sersale, R., "Structure and Characteristics of Pozzolans and Fly Ashes", *Proceedings of the Seventh International Congress on*

the Chemistry of Cement; Paris; 1; 1980.

[5] Collepardi, M. Marcialis, A. and Turriziani, R. "Penetration of Chloride Ions in Cement Pastes and in Concretes", *Journal of American Ceramic Society*; 55, pp 534-535; 1972.

[6] Manz, O.E. "United Nations economic commission for Europe" Report EP/SEM. 7/R.51; 1980.

[7] Idorn, G.M. "Use of fly ash in cement and concrete"; Workshop Proceedings: Research and Developments Needs for Use of Fly Ash in Cement and Concrete, Palo Alto, California; March 3-5 1982; Electric Power Research Institute Report, CS-2616-SR; Sept. 1982.

[8] Puccio, M. Personal Communication, ENEL, Electric Power institute of Italy - R&D Fly Ash Center.

[9] Dodson, V. H. "The effect of fly ash on the setting time of concrete - chemical or physical"; Proceedings, Symposium on Fly Ash Incorporation IN Hydrated Cement Systems; Editor, Sidney Diamond; Materials Research Society; Boston; pp 166-171; 1981.

[10] Sellevold, E. J. and Nilsen T., "Condensed Silica Fume in Concrete: a World review"; Supple-

mentary Cementing Materials for Concrete; Editor. V. M. Malhotra; CANMET, 1987.

[11] Regourd, M., Mortureux, B. and Gauthier, E. "Hydraulic reactivity of various pozzolans"; Fifth International Symposium on Concrete Technology; Monterrey, Mexico; March 1981.

[12] Traetteberg; A. "Silica fume as pozzolanic material", *Il Cemento*, 75,369-376 (1978).

[13] Gyrov, O. E., "Durability of concrete containing condensed silica fume", *Fly ash, Silica fume, Slag & Other Mineral By-Products in Concrete*, Montebello, Canada, Vol II, pp 695-708, ACI Publication SP-79, 1983.

[14] Jahren, P., "Use of Silica Fume in Concrete" *Fly ash, Silica Fume, Slag & Other Mineral By-Products in Concrete*, Vol II, pp 625-642, ACI Publication SP-79, 1983.

[15] Mehta, P. K., "Mineral Admixtures" in *Concrete Admixture Handbook, Properties, Science and Technology*; Ed.: V.S. Ramachandran, Noyes Publication, Park Ridge, N. J., USA; 1984.

[16] Malhotra, V. M. and Carette, G.E., "Silica Fume Concrete - Properties, Applications and Limita-

tions", CNMET Division Report HPP/-MSL 82-54 (OP&J), 23 pp.; 1982.

[17] Traetteberg, A. and Alstad, R., "Volumstabilitet i blandigssmenter med rajemslag og silica-stov", Report STF 65 A81034 FCB/SINTEF; The Norwegian institute of Technology, Trondheim, Norway; 1983.

[18] Johansen R., "Silicostov i fabriksbetong, Landits-effecter", Report SFF65 F79019, FCB/SINTEF; The Norwegian Institute of Technology, Trondheim, Norway; 1979.

[19] Carette, G.G. and Malhotra, V. M. "Mechanical properties, durability and drying shrinkage of portland cement concrete incorporating silica fume", *Cement, Concrete, and Aggregates*, CCAC-DP, 5:1-3-13, 1983.

[20] Johansen, R., "Risstenders ved plastisk svinn"; Report STF65 A80016, FCB—SINTEF; The Norwegian institute of Technology, Trondheim, Norway, 1980.

[21] Chatterji, S. Collepardi, M. and Moriconi, G. "Pozzolanic Property of Natural and Synthetic Pozzolans: A Comparative Study", *Fly Ash, Silica Fume & Other Mineral By-products in Concrete*, ACI publication SP-79. Vol I, pp 221-233; 1983.



#### **M. Collepardi**

Docente di tecnologia dei materiali e chimica applicata all'Università di Ancona, ha lavorato in alcuni centri di ricerca industriale per il cemento ed i materiali ceramici. All'Università di Cagliari nel '57 e di Roma nel '71 è autore e co-autore di oltre 150 pubblicazioni scientifiche e di due libri nel campo della chimica del cemento e della tecnologia del calcestruzzo. Attualmente dirige la Enco, società di servizi per consulenze tecniche nel campo dei materiali da costruzione.