

MATERIALI CEMENTIZI INNOVATIVI: DAGLI HPC VERSO GLI RPC
PARTE II*. L'INFLUENZA DEL CEMENTO E DEL FUMO DI SILICE SULLA RESISTENZA MECCANICA
DEL REACTIVE POWDER CONCRETE

INNOVATIVE CEMENTITIOUS MATERIALS FROM HPC TO RPC
PART II*. THE EFFECT OF CEMENT AND SILICA FUME TYPE ON THE COMPRESSIVE STRENGTH OF
REACTIVE POWDER CONCRETE

LUIGI COPPOLA**, ROBERTO TROLI**, SILVIA COLLEPARDI**, ANTONIO BORSOI**, TIZIANO CERULLI***,
 MARIO COLLEPARDI****

INTRODUZIONE

Nella prima parte della memoria è stata presentata una classificazione generale dei materiali cementizi innovativi appartenenti alla categoria dei CBC (*Chemically Bonded Ceramics*). Questi materiali possono essere suddivisi in MDF (*Macro-Defect Free*) e DSP (*Densified Small Particles*). Questi ultimi, infine, includono i materiali HPC (*High Performances Concretes*) e quelli RPC (*Reactive Powder Concretes*).

Il *Reactive Powder Concrete* (RPC) è un calcestruzzo speciale ad alta resistenza, spesso fibrorinforzato, confezionato con additivi superfluidificanti e fumo di silice, con una omogeneità migliorata, giacché i tradizionali aggregati grossi e fini per i normali conglomerati sono sostituiti da una sabbia finissima di dimensione compresa tra 150 e 400 µm [1]. Secondo Richard e Cheyrezy [1] la resistenza meccanica a compressione degli RPC stagionati a temperatura ambiente o sottoposti ad un trattamento a vapore a 90°C può raggiungere 200 MPa (RPC 200) [1].

Un sostanziale incremento della resistenza meccanica a compressione può essere ottenuto con una compattazione prolungata dell'impasto fresco sia durante la fase di confezionamento che durante la fase di presa, unitamente ad un trattamento termico che consiste nel sottoporre il calcestruzzo indurito ad una temperatura fino a 400°C. In questi casi la resistenza meccanica a compressione può raggiungere il valore di 800 MPa (RPC 800) [1].

A causa di questi trattamenti così sofisticati il processo di confezionamento degli RPC 800 assomiglia a quello di un materiale ceramico. Gli RPC 200, invece, possono essere gettati e stagionati utilizzando le stesse tecniche usualmente impiegate per la realizzazione delle strutture in calcestruzzo sia in cantiere che negli stabilimenti di prefabbricazione.

In questa seconda parte dell'articolo vengono presentati alcuni risultati sperimentali di un esteso progetto di ricerca che ha per obiettivo quello di studiare l'influenza delle materie prime - inclusi il cemento, il fumo di silice, gli additivi superfluidificanti e le fibre d'acciaio - sulle prestazioni degli RPC 200 senza modificare il proporzionamento degli ingredienti adottato da Richard e Cheyrezy [1].

Questo progetto di ricerca è stato attivato perché le straordinarie prestazioni dell'RPC 200 - in termini di resistenza mec-

INTRODUCTION

In the Part I of the present paper, a general classification has been proposed for innovative cementitious materials belonging to the Chemically Bonded Ceramics (CBC) type. These materials can be divided into Macro-Defect Free (MDF) and Densified with Small Particles (DSP) cements. DSP materials include both High Performances Concretes (HPC) and Reactive Powder Concretes (RPC).

Reactive powder concrete (RPC) is a special high strength superplasticized silica fume concrete, often fiber-reinforced, with improved homogeneity because traditional coarse and fine aggregates are replaced by very fine sand with particle size in the range of 150-400 µm [1]. According to Richard and Cheyrezy [1] with ordinary curing at room temperature or steam curing at 90°C, the compressive strength can attain up to 200 MPa (RPC 200).

Additional improvements in compressive strength up to 800 MPa (RPC 800) and in flexural strength up to 100 MPa, can occur with special treatments including prolonged compaction of the fresh mix at the moulding stage and during setting, as well as hot curing up to 400°C of the hardened concrete. Because of these sophisticated treatments the manufacturing process of RPC 800 [1] looks like that of a ceramic material. On the other hand RPC 200 can be placed by casting techniques and curing conditions as those usually adopted for in situ placed or precast concrete structures.

In the present paper some experimental results are shown belonging to a larger research project to study the influence of the raw materials - including cement, silica fume, superplasticizer and steel fibers - on the performances of RPC 200 without changing the mix proportion of the ingredients with respect to that adopted by Richard and Cheyrezy [1]. The reason why this project has been activated is due to the fact that the extraordinary performances of RPC 200 - in terms of strength, fracture energy and Young's modulus - are related with a particular mix composition (Table 1) without knowing the specific role played by each ingredient. In other words, one does not know, for instance, whether a low C₃A portland cement (Type V in Table 1) is necessarily required or even other portland cements can be advantageously used to produce RPC 200.

In the present paper the effect of portland cement and silica fume type upon the RPC performances will be examined in detail. In some exceptional mixes the effect of the steel fibers aspect ratio (length/diameter) will be studied. The influence of the superplasticizer will be published on a subsequent paper.

canica, energia di frattura e modulo elastico - sono strettamente correlate da Richard e Cheyrezy ad una particolare composizione dell'impasto (Tabella 1), senza però conoscere lo specifico ruolo giocato da ognuno degli ingredienti utilizzati. In altre parole, non si sa, per esempio, se l'impiego di un cemento portland con un basso tenore di C₃A è strettamente necessario per conseguire le prestazioni riportate da Richard e Cheyrezy o se, invece, possono essere utilizzati vantaggiosamente altri cementi portland per produrre gli RPC 200.

Nel presente lavoro, in particolare, è stato esaminato in dettaglio il solo effetto del tipo di cemento portland e di fumo di silice sulle prestazioni degli RPC. In alcuni impasti eccezionalmente è stata anche studiata l'influenza del rapporto di aspetto (lunghezza/diametro) delle fibre di acciaio sulle prestazioni del materiale. L'influenza dell'additivo superfluidificante verrà presentata in un successivo lavoro.

PARTE SPERIMENTALE

Giacché il presente lavoro ha come obiettivo specifico quello di valutare l'influenza del tipo di cemento portland e del fumo di silice sulle prestazioni dell'RPC 200, questi ingredienti sono stati accuratamente caratterizzati e le loro proprietà sono state correlate con le prestazioni del calcestruzzo in termini di richiesta di acqua, a pari lavorabilità, e di resistenza meccanica a compressione per differenti condizioni di stagionatura.

MATERIALI

È stato impiegato un additivo superfluidificante - in forma di soluzione acquosa al 30% - costituito da un polimero a base di un estere acrilico carbossilico [2-4]. In tutti gli impasti è stato utilizzato un quantitativo di additivo liquido equivalente ad un contenuto di polimero secco di 13 kg/m³, identico cioè a quello indicato da Richard e Cheyrezy in Tabella 1, e corrispondente ad una percentuale di prodotto attivo dell'1,36% rispetto alla massa del cemento utilizzato per l'impasto (955 kg/m³).

È stata, inoltre, impiegata la stessa quantità nominale (1051 kg/m³) di sabbia fine (150 - 400 µm) utilizzata da Richard e Cheyrezy (Tabella 1).

Anche per le fibre di acciaio è stato impiegato lo stesso quantitativo nominale (191 kg/m³) indicato da Richard e Cheyrezy per l'RPC 200. Per tutti gli impasti le fibre di acciaio uti-

TABELLA 1 / TABLE 1
 COMPOSIZIONE DELL'RPC 200 SECONDO RICHARD E CHEYREZY [1]
 COMPOSITION OF RPC 200 ACCORDING TO RICHARD AND CHEYREZY [1]

Cemento Portland (Tipo V) Portland cement (Type V)	955	kg/m ³
Fumo di silice - Silica fume (18 m ² /g)	229	kg/m ³
Sabbia fine - Fine sand	1051	kg/m ³
Silice precipitata - Precipitated silica (35 m ² /g)	10	kg/m ³
Superfluidificante (poliacrilato) - Superplasticizer (polyacrylate)	13	kg/m ³
Fibre di acciaio - Steel fibers	191	kg/m ³
Acqua - Water	153	kg/m ³

EXPERIMENTAL

Since the present paper is specifically devoted to investigate the influence of portland cement and silica fume type on the performances of RPC 200 these ingredients were thoroughly characterized and their properties were related with the concrete performances in terms of water requirement at equal workability and compressive strength in different curing conditions.

MATERIALS

A carboxylic acrylic ester (CAE) polymer has been used as superplasticizer in form of 30% aqueous solution [2-4]. The same nominal amount (13 Kg/m³) of dry polyacrylate in all the mixes was used as that indicated in Table 1 (1.36% by weight of cement).

The same nominal amount (1051 Kg/m³) of fine natural sand (150-400 µm) has been used as that indicated for RPC 200 (Table 1).

The same nominal amount (191 Kg/m³) of steel fibers was used as that for RPC 200 by Richard and Cheyrezy. In general the steel fibers used in the present work were 11 mm long and 0.35 mm thick with an aspect ratio of about 31 (the ratio between the fiber length, L, and the equivalent diameter, D). In just one mix steel fibers 13 mm long and 0.18 mm thick were used with the same aspect ratio (72) as that of the steel fibers used by Richard and Cheyrezy.

* La prima parte dell'articolo è stata pubblicata su "L'Industria Italiana del Cemento", n. 697, pagg. 189-198, Marzo 1995.
 ** Enco - Engineering Concrete - Spresiano (TV).
 *** Mapel Spa - Milano.
 **** Dipartimento di Scienza dei Materiali, Università di Ancona.

* The first part of the paper has been published on "L'Industria Italiana del Cemento", 697, 189-198, March 1995.
 ** Enco - Engineering Concrete - Spresiano (TV).
 *** Mapel Spa - Milan.
 **** Department of Materials Science, University of Ancona.

lizzate erano lunghe 11 mm e spesse 0,35 mm con rapporto di aspetto (rapporto tra la lunghezza della fibra, L, ed il diametro equivalente, D) di circa 31. Solo per un impasto sono state impiegate fibre di acciaio lunghe 13 mm e spesse 0,18 mm con rapporto di aspetto pari a 72, identico a quello delle fibre di acciaio utilizzate da Richard e Cheyrezy.

Per il confezionamento degli impasti è stata impiegata la stessa quantità nominale (10 kg/m³) di silice precipitata (silice amorfa ottenuta per sintesi chimica con elevato contenuto di SiO₂ > 99,8%) indicata da Richard e Cheyrezy. La dimensione media delle particelle di silice precipitata utilizzata nel presente lavoro era di 0,012 µm.

Sono stati utilizzati tre diversi cementi portland (A, B e C) con un differente contenuto di C₃A ed una diversa finezza Blaine. In Tabella 2 vengono mostrate le principali proprietà di questi cementi e la loro classificazione in base alle normative ASTM e ENV 197/1.

I cementi portland A e B posseggono una finezza di 340 e 530 m²/kg rispettivamente; entrambi sono classificabili come cementi di tipo V secondo la norma ASTM C 150 e quindi, appartenenti alla stessa categoria di quelli utilizzati da Richard e Cheyrezy [1]. Il cemento portland C con un contenuto di C₃A dell'11% e una finezza Blaine di 520 m²/kg è classificabile, invece, come cemento di tipo III secondo la norma ASTM 150 o come CEM I 52.5 R secondo la norma UNI ENV 197 parte 1^a.

Sono stati, inoltre, utilizzati tre diversi fumi di silice contraddistinti dalle lettere W, G e D che si presentavano all'apparenza diversi per il colore (bianco, grigio e nero rispettivamente) così come per l'analisi chimica dei costituenti minori (Tabella 3). È difficile capire se il contenuto di carbonio o di altri elementi quali lo zolfo, il calcio ecc. siano responsabili del colore dei tre fumi di silice impiegati. D'altra parte secondo Edwards-Lajnef et al [5] il colore può essere attribuito alla quota di prelievo del fumo di silice recuperato dalla fornace.

Un'altro interessante aspetto relativamente alla caratterizzazione del fumo di silice è la distribuzione granulometrica delle particelle in presenza o in assenza di un additivo disperdente. Le Figg. 1 e 2 mostrano i risultati della analisi granulometrica laser dei tre tipi di fumo di silice in una sospensione acquosa rispettivamente senza e con l'1% di additivo superfluidificante acrilico. La granulometria laser del fumo di silice bianco (Fig. 1 e 2) non dipende dalla presenza dell'additivo superfluidificante; le dimensioni medie delle particelle di fumo di silice bianco si attestano tra 0,62 µm e 0,69 µm con e senza additivo superfluidificante rispettivamente (Tabella 3).

La distribuzione granulometrica del fumo di silice grigio e nero, invece, è strettamente dipendente dalla presenza del

The same nominal amount (10 Kg/ m³) of precipitated silica (amorphous silica produced by chemical synthesis with a SiO₂ content higher than 99.8%) as that indicated by Richard and Cheyrezy was used. The mean particle size of the precipitated silica used in the present work was 0.012 µm.

Three portland cements (A, B and C) have been used which were different for the C₃A content and/or Blaine fineness. Table 2 shows the main properties of these cements and their characterization in terms of ASTM and ENV 197/1 standard specifications. Portland cement brands A and B, with a Blaine fineness of 340 and 530 m²/kg respectively are both type V according to ASTM C-150 as that used by Richard and Cheyrezy [1]. Portland cement C with a C₃A content of 11% and a Blaine fineness of 520 m²/kg corresponds to type III according to ASTM C-150 and CE I 52.5R according to ENV 197/1.

Three silica fume brands (W, G, D) have been used which were different for the apparent colour (white, pale grey and dark respectively) as well as for the chemical analysis of the minor components (Table 3). It is difficult to understand whether or not the content of carbon or other elements such as sulphur, calcium, etc. is responsible for the colour. On the other hand according to Edwards-Lajnef et al [5] the colour is also related with the retrieval level of the furnace where the silica fume is collected.

TABELLA 2 / TABLE 2
COMPOSIZIONE E PROPRIETÀ DEI CEMENTI PORTLAND
COMPOSITION AND PROPERTIES OF PORTLAND CEMENTS

Cemento - Cement	A	B	C
SiO ₂ (%)	20,59	20,79	19,62
Al ₂ O ₃ (%)	3,66	4,32	7,50
Fe ₂ O ₃ (%)	6,10	4,40	5,24
CaO (%)	63,78	64,58	61,48
MgO (%)	0,95	1,03	0,90
K ₂ O (%)	0,48	0,52	0,64
Na ₂ O (%)	0,26	0,14	0,18
SO ₃ (%)	2,50	2,68	3,50
C ₃ A (%)	0	4,00	11,20
Blaine (m ² /kg)	340	530	520
ASTM tipo - type	V	V	III
ENV 197/1 tipo - type	CEM I 42.5R	CEM I 52.5R	CEM I 32.5R

l'additivo superfluidificante (Fig. 1 e 2). Infatti, la dimensione media dei fumi di silice G e D in assenza di additivo superfluidificante è rispettivamente di 13,9 µm e 63,6 µm; in presenza di superfluidificante, invece, le dimensioni medie dei granuli diventano circa 0,7 µm sia per il fumo di silice grigio che per quello nero (Tabella 3).

L'osservazione al microscopio elettronico a scansione (Fig. 3) dei campioni di fumo di silice indica che la morfologia degli agglomerati particellari è sostanzialmente la stessa indipendentemente dal tipo di fumo di silice. I tre fumi di silice W, G e D, infatti, appaiono tutti in forma di agglomerati costituiti da granuli tondi con dimensioni medie delle particelle variabili tra 0,1 e 1 µm. Tuttavia, sulla base delle granulometrie laser gli agglomerati del fumo di silice bianco appaiono molto più disperdibili in soluzione acquosa rispetto a quelli dei fumi di silice grigio e nero (Fig. 1). In presenza di superfluidificante, invece, non c'è alcuna sostanziale differenza in termini di dispersione dei tre fumi di silice (Fig. 2).

IMPASTI

Combinando i tre tipi di cemento portland (A, B e C) con i tre tipi di fumi di silice (W, G e D) sono stati confezionati 9 diversi impasti (Tabella 4). Per tutti gli impasti sono state utilizzate fibre di acciaio lunghe 11 mm e spesse 0,35 mm. Sono stati, inoltre, impiegati per ognuno degli ingredienti utilizzati, gli stessi quantitativi riportati nella Tabella 1 fatta eccezione per il contenuto di acqua che è stato opportunamente mo-

An other interesting aspect for the characterization of silica fume is the particle size distribution in the absence or in the presence of a dispersing agent. Figg. 1 and 2 show the laser granulometry of the three silica fume brands in aqueous suspension without and with 1% of acrylic superplasticizer respectively. The laser granulometry of the white silica fume (Figg. 1-2) does not depend on the presence of the superplasticizer and the mean particle size is 0.62 µm and 0.69 µm with and without superplasticizer (Table 3). On the other hand the particle size distribution of grey and dark silica fumes is strongly depending on the presence of the superplasticizer (Figg. 1-2). The mean particle size of G and D silica fume brands, in the absence of superplasticizer, is 13.9 µm and 63.6 µm respectively. In the presence of superplasticizer, the mean particle size becomes about 0.7 µm for grey and dark silica fume brands (Table 3).

The SEM observations of silica fume samples (Fig. 3) indicate

TABELLA 3 / TABLE 3
COMPOSIZIONE E PROPRIETÀ DEI FUMI DI SILICE
COMPOSITION AND PROPERTIES OF SILICA FUMES

Fumo di silice - Silica fume	W	G	D
Colore - Colour	bianca-white	grigia-grey	nera-dark
SiO ₂ (%)	94,43	98,87	95,12
Al ₂ O ₃ (%)	2,48	0,01	0,02
SO ₃ (%)	0,01	0,23	0,54
K ₂ O (%)	0,04	0,08	0,91
Na ₂ O (%)	0,01	0,00	0,01
CaO (%)	0,04	0,23	0,49
MgO (%)	0,01	0,01	,02
TiO ₂ (%)	0,21	0,08	0,23
MnO ₂ (%)	0,0	0,01	0,21
Fe ₂ O ₃ (%)	0,46	0,30	0,40
Dimensione media dei granuli (µm) / Mean particle size (µm):			
senza superfluidificante - without superplasticizer	0,69	13,87	63,59
con superfluidificante - with superplasticizer	0,62	0,76	0,73
incombusto (%) - Unburnt (%)	0,0	0,0	1,6

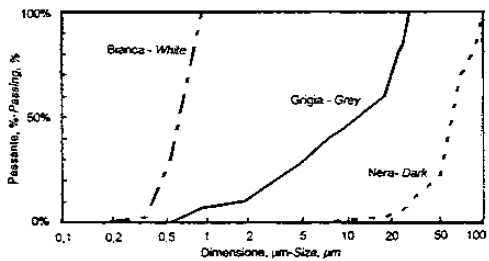


Fig. 1 - Distribuzione granulometrica dei fumi di silice bianco, grigio e nero in assenza di superfluidificante.
Fig. 1 - Particle size distribution of white, grey and dark silica fume in the absence of superplasticizer.

dificato per ogni impasto con l'obiettivo di ottenere la stessa consistenza (circa 150 mm alla tavola a scosse). Il quantitativo di acqua a pari contenuto di cemento e quindi il rapporto acqua/cemento sono risultati strettamente dipendenti dal tipo di cemento e dal tipo di fumo di silice. Pertanto, i dosaggi effettivi di ogni impasto realizzato sono risultati necessariamente diversi da quelli nominali (Tabella 1) in funzione del quantitativo di acqua richiesto per conseguire il livello di lavorabilità prefissato.

Dopo aver mescolato tutti gli ingredienti in un mescolatore planetario da laboratorio per circa 5 minuti, l'impasto fresco risultava particolarmente coloso. Pertanto, il test originale della tavola a scosse non è apparso essere adeguato per valutare il comportamento sotto vibrazione richiesto per compattare questi impasti nelle casseformi. Quindi è stato adottato un sistema di misura della lavorabilità modificato che è consistito nell'impiegare il tavolo vibrante dell'apparecchio Vebe (10 secondi di vibrazione) in sostituzione dell'originale tavola a scosse (10 colpi).

I risultati della Tabella 4 indicano che, per un dato cemento, il rapporto acqua/cemento è più basso con il fumo di silice bianco e più alto con il fumo di silice grigio o nero. Questo sembra che debba essere attribuito al fatto che gli agglomerati del fumo di silice bianco possono essere dispersi in granuli individuali anche in assenza di additivo superfluidificante (Fig. 1): un più elevato contenuto di polimero acrilico, quindi, è disponibile per ridurre il rapporto acqua/cemento dell'impasto per ottenere la lavorabilità prefissata. In altre parole il fumo di silice grigio e quello nero in assenza di additivo superfluidificante, presentandosi in forma di agglomerati di grosse dimensioni (Tabella 3), hanno

that the morphology is substantially the same independently of the brand. The three silica fume brands (W, G and D) all appear in form of the typical agglomerates of round grains with the particle size in the range of 0.1 - 1 μ m. However, on the basis of laser granulometry measurements the white silica fume agglomerate appears to be much more dispersible in a pure aqueous phase than the others (Fig. 1). On the other hand, in the presence of superplasticizer there is no substantial difference in the dispersion of the three silica fume brands (Fig. 2).

CEMENT MIXTURES

By combining the change in portland cement type (A, B, C) and in silica fume brand (W, G, D) nine different mixtures were manufactured (Table 4). For all these mixes the steel fibers were 11 mm long and 0.35 mm thick. The same batch quantities of the ingredient as those shown in Table 1 have been adopted except for the water content which was adjusted for each mix in order to attain to the same plastic consistency (about 150 mm on flow table test). The amount of mixing water, at equal cement content, and therefore the water/cement were strongly depending on the type of cement and silica fume brand.

The actual batch quantities of each mix were necessarily different from the nominal ones (Table 1) depending on the amount of required mixing water for the same workability level.

After mixing all the ingredients in a laboratory planetary mixer for 5 min, the fresh mixture was very sticky. Therefore the original flow table test did not appear to be adequate to assess the workability behaviour under the vibration required to compact the sticky mix into the moulds. Then a modified flow table test was

TABELLA 4 / TABLE 4

INFLUENZA DEL TIPO DI CEMENTO E DI FUMO DI SILICE SUL RAPPORTO ACQUA/CEMENTO
EFFECT OF CEMENT AND SILICA FUME TYPE ON THE WATER-CEMENT RATIO

Impasto - Mix	AW	BW	CW	AG	BG	CG	AD	BD	CD
Fumo di silice - Silica fume	Bianca-White			Grigia-grey			Nera-Dark		
Tipo di cemento - Cement type	A	B	C	A	B	C	A	B	C
C ₃ A (%)	0	+	11	0	+	11	0	+	11
Blaine (m ² /kg)	340	530	520	340	530	520	340	530	520
Spandimento - Flow table (mm)	160	155	155	160	150	155	160	155	155
a/c - w/c	0,18	0,25	0,26	0,22	0,29	0,28	0,26	0,30	0,33
a/(c+FS) - w/(c+SF)	0,14	0,20	0,21	0,18	0,23	0,22	0,21	0,24	0,26

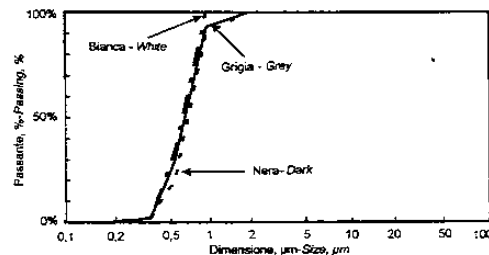


Fig. 2 - Distribuzione granulometrica dei fumi di silice bianco, grigio e nero in presenza di superfluidificante.
Fig. 2 - Particle size distribution of white, grey and dark silica fume in the presence of superplasticizer.

bisogno di una certa quantità di additivo acrilico per poter disperdere le particelle in granuli individuali (Fig. 2). La differenza nel rapporto acqua/cemento che si registra nel fumo di silice grigio e in quello nero, infine, potrebbe essere in parte tentativamente ascritta alla quantità di carbone incombusto (Tabella 3).

Per un dato fumo di silice, il rapporto acqua/cemento dipende anche dal cemento impiegato. La riduzione della superficie specifica ed in particolare del contenuto di C₃A del cemento sembrano favorire una significativa riduzione del rapporto acqua/cemento per conseguire la stessa lavorabilità.

Comparando il rapporto acqua/cemento degli impasti realizzati nel presente lavoro (Tabella 4) con quelli dell'originale RPC 200 (rapporto acqua/cemento 0,15 nella Tabella 1 del riferimento bibliografico [1]) sembra che soltanto il mix AW (rapporto acqua/cemento pari a 0,18) è simile a quello utilizzato da Richard e Cheyrezy [1].

Uno speciale impasto aggiuntivo (AG*) è stato confezionato con la stessa composizione di quello AG riportato in Tabella 4 fatta eccezione per le fibre di acciaio che erano più lunghe (13 contro 11 mm) e più sottili come diametro (0,18 contro 0,35 mm). Per questo impasto è stato registrato un valore di spandimento (155 mm) all'incirca uguale a quello misurato per l'impasto AG.

used by substituting a Vebe vibrating table (10 seconds of vibration) for the original flow table (with 10 drops).

The data of Table 4 indicate that, for a given cement, the water-cement ratio is lower with the white silica fume brand and higher with the grey or dark ones. This seems to be related with the fact that the white silica fume brand can be dispersed into individual grains even in the absence of superplasticizer (Fig. 1), so that a higher amount of the acrylic polymer is available to reduce the water-cement ratio of the cement mix for a given workability. On the other hand, grey and dark silica fume brands appear to be agglomerated in the absence of superplasticizer (Fig. 1), and a certain amount of acrylic superplasticizer is consumed to disperse the silica fume agglomerates into individual grains (Fig. 2). The difference in the water-cement ratio of cement mixes with grey and dark silica fume brands could be tentatively ascribed to the amount of unburnt coal (Table 3).

For a given silica fume brand, the water-cement ratio depends on the cement used. The reduction in the specific surface area and in particular in the C₃A content of the cement appear to favour a significant reduction in the water-cement ratio at a given workability.

By comparing the water-cement ratio of the cement mixes of the present work (Table 4) with that of the original RPC 200 (water-cement ratio = 0.15 in Table 1 from reference 1), it seems that only the mix AW (water-cement ratio = 0.18) is similar to that indicated by Richard and Cheyrezy [1].

An additional special mix (AG*) has been manufactured with the same composition as that of the mix AG (Table 4) except for the steel fibers which were longer (13 vs 11 mm) and thinner in diameter (0.18 vs 0.35 mm). About the same flow table (155 instead of 160 mm) was obtained in the AG* mix.

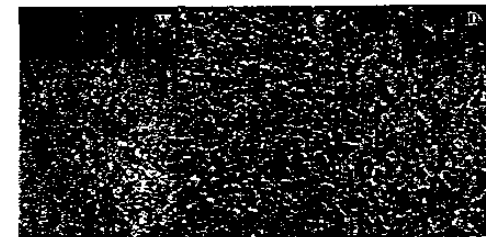


Fig. 3 - Microfotografia al microscopio elettronico del fumo di silice bianco (W), grigio (G) e nero (D).
Fig. 3 - Scanning electron microscopy of white (W), grey (G) and dark (D) silica fume.

CONFEZIONAMENTO E STAGIONATURA

Sono stati confezionati provini cubici (lato 40 mm) - compattati mediante un tavolo vibrante - i quali sono stati stagionati in tre differenti condizioni (Fig. 4):

- a) stagionatura a temperatura ambiente: sempre a 20°C;
- b) trattamento termico a vapore: riscaldamento da 20°C a 90°C in 7 ore, quindi a 90°C per 9 ore, raffreddamento da 90°C a 20°C in 5 ore e, infine, alla temperatura di 20°C fino al 28° giorno;
- c) trattamento termico all'aria: a 20°C per 1 giorno, quindi a 160°C all'aria per 1 giorno e infine a 20°C fino al 28° giorno. Questo trattamento speciale - che è stato utilizzato da Richard e Cheyrezy con una temperatura massima fino a +400°C - è stato adottato soltanto quando i provini potevano essere scasserati. Nel presente lavoro questo trattamento termico è stato effettuato sempre dopo un giorno di stagionatura a 20°C fatta eccezione per i provini degli impasti AW e AD di Tabella 4. Per questi impasti - che dopo un giorno non erano ancora induriti - il trattamento termico è iniziato dopo 2 giorni di stagionatura preliminare a 20°C.

RISULTATI DI RESISTENZA MECCANICA A COMPRESSIONE

Le Figg. 5-14 mostrano i risultati della resistenza meccanica a compressione in funzione del tempo da 1 a 28 giorni. Tutte le figure, fatta eccezione per la Fig. 14, si riferiscono ad impasti confezionati con fibre di acciaio con un rapporto di aspetto di 31. La Fig. 14, invece, si riferisce ad uno speciale impasto che è stato confezionato con fibre di acciaio caratterizzate da un più alto rapporto di aspetto (72).

CEMENTO A

Le Figg. 5-7 mostrano l'andamento della resistenza meccanica a compressione degli impasti AW, AG e AD. Con il trattamento termico a 160°C la resistenza meccanica a compressione degli impasti AW e AG è risultata di circa 180-200 MPa (Figg. 5 e 6). Questi valori sono all'incirca uguali a quelli indicati per l'originale RPC 200 [1]. Anche il rapporto acqua/cemento del mix AG (0,22) e in particolare quello del mix AW (0,18), sono molto simili a quelli indicati da Richard e Cheyrezy per l'RPC 200 [1]. Tenendo conto, infine, che per questi impasti sono state utilizzate fibre di acciaio con un rapporto

CASTING AND CURING

Cube specimens (40 mm) were cast by vibration and then cured in three different conditions (Fig. 4):

- a) room temperature: always at 20°C;
- b) steam curing: heating from 20°C to 90°C in 7 hours, then at 90°C for 9 hours with a cooling process from 90°C to 20°C in 5 hours, and finally at 20°C up to 28 days;
- c) air thermal treatment: at 20°C for 1 day, then at 160°C in

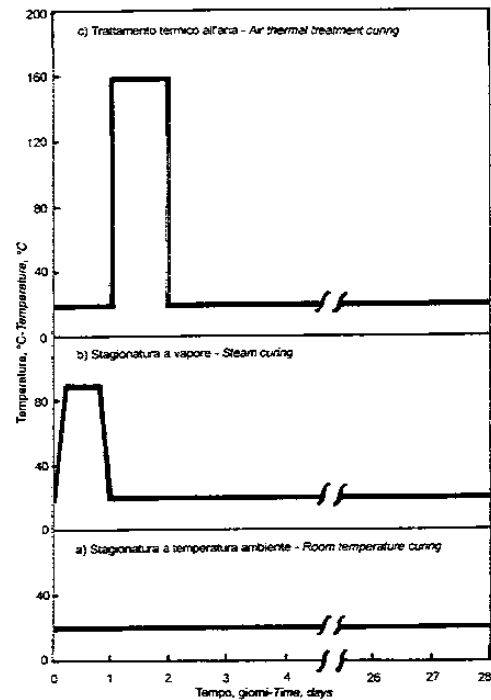


Fig. 4 - Temperatura in funzione del tempo per tre differenti condizioni di stagionatura.
Fig. 4 - Temperature versus time of the three curing conditions.

di aspetto meno favorevole rispetto a quello delle fibre impiegate da Richard e Cheyrezy (lunghezza /diametro di 31 invece di 72), i risultati di resistenza meccanica a compressione degli impasti AW e AG sembrano in buon accordo con quelli ottenuti per l'originale RPC 200. Quando è stato impiegato un cemento con un contenuto di C₃A nullo in combinazione con fumo di silice nero (impasto AD) la massima resistenza meccanica a compressione (Fig. 7) nelle stesse condizioni di stagionatura (160°C) è stata più bassa (140 MPa) probabilmente a causa del maggior rapporto acqua/cemento di questo impasto (0,26).

La resistenza meccanica alle brevi stagionature degli impasti confezionati con cemento A è risultata molto bassa, in particolare modo quando questo cemento è stato utilizzato in combinazione con il fumo di silice bianco e il fumo di silice nero (Figg. 5 e 7). Dopo 1 giorno, infatti, i provini confezionati con questi impasti maturati a temperatura ambiente erano ancora teneri: pertanto, non si è potuto procedere allo scasso e al successivo trattamento termico a 160°C (Fig. 4). Questo trattamento è stato opportunamente ritardato ed effettuato dopo una stagionatura preliminare di 2 giorni a temperatura ambiente anziché di 1 giorno come previsto. Anche alla fine del trattamento termico a vapore (90°C) la resistenza meccanica a compressione degli impasti confezionati con il cemento a contenuto di C₃A nullo in combinazione con il fumo di silice bianco e con quello nero è risultata molto bassa (Figg. 5 e 7). Sembra che quando un cemento con un contenuto di C₃A nullo viene combinato con il fumo di silice bianco o con quello nero, il contenuto di additivo superfluidificante acrilico proposto da Richard e Cheyrezy (13 kg/m³ come polimero attivo) sia troppo elevato. Incidentalmente si fa notare che questo dosaggio è circa 4-5 volte più elevato di quello generalmente impiegato per i tradizionali calcestruzzi [2-4]. Il dosaggio di additivo acrilico utilizzato nel presente lavoro in accordo con quanto proposto da Richard e Cheyrezy è stato molto efficace nel ridurre il rapporto acqua/cemento (0,18 - 0,22), ma esso ha anche provocato un notevole ritardo nell'idratazione del cemento. Tuttavia, il trattamento termico a 160°C effettuato per 24 ore dopo una stagionatura preliminare di 2 giorni a temperatura ambiente, quando il materiale cioè è ormai indurito, ha determinato un significativo incremento della resistenza meccanica a compressione che è risultata di circa 195 MPa con il fumo di silice bianco e di 140 MPa con il fumo di silice nero.

Quando, invece, un cemento a contenuto di C₃A nullo viene combinato con una "silica fume" grigia (Fig. 6) non è stato registrato alcun ritardo dell'idratazione del cemento e, quindi, la resistenza meccanica a compressione a 1 giorno è risultata abba-

di aria per 1 day, and finally at 20°C up to 28 days. This special treatment, which has been used by Richard and Cheyrezy with a maximum temperature up to 400°C [1], may be adopted only when the specimens can be demoulded. In the present work this thermal treatment started always after 1-day of room temperature curing except for the specimens of mixes AW and AD (Table 4). For these mixes, which at 1 day were not yet hardened the thermal treatment started after 2 days of preliminary curing at 20°C.

COMPRESSIVE STRENGTH TESTS

Fig. 5-14 show the compressive strength results as a function of the curing time from 1 day to 28 days. All these Figures - except Fig. 14 - deal with cement mixes containing steel fibers with the aspect ratio of 31. Fig. 14 concerns a special cement mix with steel fibers characterized by a higher steel aspect ratio (72).

CEMENT A

Fig. 5-7 indicate the compressive strength trend for the mixes AW, AG and AD. With the thermal treatment at 160°C, the compressive strength of the mixes AW and AG were about 180-200 MPa (Figg. 5-6). These values are in the same range as that indicated for the original RPC 200 [1]. Even the water-cement ratio of the mix AG (0.22) and in particular that of the mix AW (0.18) was very close to that indicated by Richard and Cheyrezy for RPC 200 [1]. By taking into account that for these mixes steel fibers with a less favourable aspect ratio were used (length/diameter of 31 instead of 72), the compressive strength data of the AW and AG mixes are in a good agreement with that of the RPC 200 indicated by Richard and Cheyrezy. When the C₃A-free cement A was combined with the dark silica fume brand (mix AD) the maximum compressive strength (Fig. 7) at the same curing conditions (160°C) was lower (140 MPa) probably because of the higher water-cement ratio (0.26).

The early compressive strength of the mixes with cement A was very low, particularly in combination with the white and dark silica fume brands (Figg. 5 and 7). At 1 day the specimens of these mixes were still soft at room temperature so that they could not be demoulded and therefore the thermal treatment at 160°C (Fig. 4) was delayed after a preliminary curing of 2 days at room temperature. Even at the end of the steam curing process (90°C) the compressive strength was very low when the C₃A-free cement A was used in combination with the white (Fig. 5) and dark

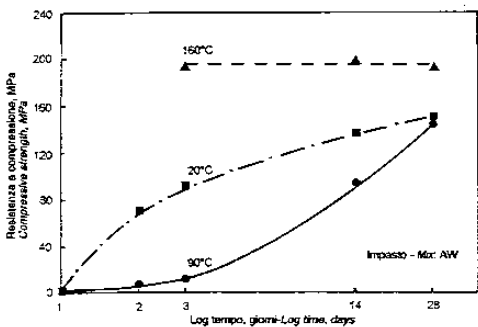


Fig. 5 - Resistenza a compressione in funzione del tempo per l'impasto confezionato con cemento A e fumo di silice bianco. Rapporto d'aspetto delle fibre= 31.
Fig. 5 - Compressive strength versus time for cement A and silica fume white. Aspect ratio of steel fibers= 31.

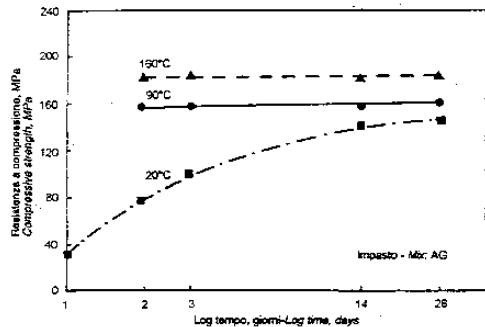


Fig. 6 - Resistenza a compressione in funzione del tempo per l'impasto confezionato con cemento A e fumo di silice grigio. Rapporto d'aspetto delle fibre= 31.
Fig. 6 - Compressive strength versus time for cement A and silica fume grey. Aspect ratio of steel fibers= 31.

stanza elevata sia per gli impasti maturati a temperatura ambiente (30 MPa) che per quelli maturati a vapore (155 MPa).

È difficile spiegare l'influenza del tipo di fumo di silice sullo sviluppo delle resistenze meccaniche degli RPC 200 confezionati con cemento a C_3A nullo. Si possono, tuttavia, fare alcune considerazioni: il fumo di silice bianco non richiede alcun superfluidificante per essere disperso (Fig. 1). Il fumo di silice grigio, invece, appare in forma di agglomerati particellari in assenza di additivo superfluidificante; pertanto, è necessario un certo quantitativo di polimero acrilico adsorbito sulla superficie del fumo di silice grigio, per poter produrre una dispersione particellare così efficace come quella registrata per il fumo di silice bianco (Fig. 2). Questo potrebbe significare che a pari dosaggio di superfluidificante c'è più additivo acrilico disponibile della soluzione acquosa allorché viene utilizzato il fumo di silice bianco; questo eccesso di additivo potrebbe, quindi, essere responsabile del ritardo registrato nell'idratazione alle brevi stagionature degli impasti confezionati con cemento con C_3A nullo. D'altra parte, la presenza nel fumo di silice nero di carbone incombusto relativamente elevato (Tabella 3), potrebbe essere responsabile del ritardo della idratazione allorché questo fumo di silice viene utilizzato in combinazione con un cemento a contenuto di C_3A nullo in presenza di un elevato dosaggio di additivo superfluidificante acrilico.

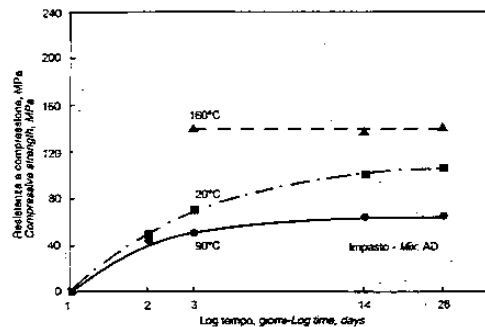


Fig. 7 - Resistenza a compressione in funzione del tempo per l'impasto confezionato con cemento A e fumo di silice nero. Rapporto d'aspetto delle fibre= 31.
Fig. 7 - Compressive strength versus time for cement A and silica fume dark. Aspect ratio of steel fibers= 31.

CEMENTO B

Le Figg. 8-10 mostrano lo sviluppo delle resistenze meccaniche degli impasti BW, BG e BD. Sebbene il cemento B (C_3A 4%) sia un cemento di tipo V (ASTM) come quello utilizzato da Richard e Cheyrezy [1], i risultati ottenuti in termini di rapporto acqua/cemento e di resistenza meccanica a compressione sono diversi rispetto a quelli dell'originale RPC 200. Anche per l'impasto BW che possiede le prestazioni migliori (Fig. 8), il rapporto acqua/cemento (0,25) è significativamente più elevato di quello (0,15) dell'originale RPC 200.

Si conferma che anche con il cemento B, così come è stato segnalato per il cemento A, il tipo di fumo di silice gioca un ruolo molto importante nel determinare sia il rapporto acqua/cemento che la resistenza meccanica a compressione:

- il fumo di silice bianco determina un rapporto acqua/cemento più basso rispetto a quello del fumo di silice grigio che a sua volta richiede un minor quantitativo di acqua rispetto al fumo di silice nero;

- il fumo di silice bianco sembra provocare un ritardo nell'idratazione iniziale e, quindi, nello sviluppo delle resistenze meccaniche (sia 20°C che a 90°C), rispetto al fumo di silice nero ed in particolare rispetto al fumo di silice grigio.

CEMENTO C

Le Figg. 11-13 mostrano lo sviluppo delle resistenze meccaniche a compressione degli impasti CW, CG e CD.

La finezza del cemento C è la stessa di quella del cemento B (Tabella 2). Il contenuto di C_3A nel cemento C (11%), invece, è molto più alto di quello del cemento B (4%). L'influenza del fumo di silice sulle prestazioni degli impasti con cemento C è simile a quella registrata per i cementi A e B:

- il fumo di silice bianco determina la più elevata riduzione nel rapporto acqua/cemento, ma esso riduce le resistenze meccaniche alle brevi stagionature sia a 20°C che a 90°C (Fig. 11);

- con il fumo di silice grigio il rapporto acqua/cemento è leggermente più elevato di quello registrato per il fumo di silice bianco, ma la resistenza meccanica a compressione alle brevi stagionature è maggiore (Fig. 12);

- in presenza del fumo di silice nero il rapporto acqua/cemento è più elevato e la resistenza meccanica alle lunghe stagionature è più bassa (Fig. 13).

IL RAPPORTO DI ASPETTO DELLE FIBRE

Soltanto un impasto, contrassegnato con il simbolo AG^+ , è

(Fig. 7) silica fume brands. It would seem that when the C_3A -free cement A is combined with the white or dark silica fume brand, the amount of acrylic superplasticizer proposed by Richard and Cheyrezy (13 Kg/m³ as dry polymer) is too much. Incidentally, this dosage is 4-5 times larger than that recommended for ordinary concrete mixes [2-4]. The dosage of acrylic superplasticizer used in the present work, in agreement with that proposed by Richard and Cheyrezy, was very effective in reducing the water-cement ratio (0.18-0.22), but it caused a strong retardation in the early cement hydration. However, in the thermal treatment at 160°C for 24 hours after a preliminary curing at room temperature of 2 days - when the material was definitely hardened - there was a significant strength increase (195 MPa with the white silica fume brand and 140 MPa with the dark silica fume brand).

On the other hand, when the C_3A -free cement A was combined with the grey silica fume brand (Fig. 6), there was no retardation in the early cement hydration and therefore the 1-day compressive strength was quite high at room temperature (30 MPa) and even higher with the steam curing process (155 MPa).

It is difficult to explain the different influence of the silica fume brand on the strength development of the RPC 200 system based on a C_3A -free portland cement. The white silica fume brand did not need any superplasticizer to be dispersed (Fig. 1). On the other hand, the grey silica fume appeared in form of agglomerates in the absence of superplasticizer (Fig. 1) and a certain amount of the acrylic polymer adsorbed on the grey silica fume surface was required to produce a particle dispersion as good as that of the white silica fume (Fig. 2). This could mean that, with the same dosage of superplasticizer, there was more acrylic polymer available in the aqueous phase when white silica fume was used and this excess could be responsible for the retardation in the early hydration of a C_3A -free portland cement.

On the other hand, the presence of a certain amount of unburnt coal in the dark silica fume brand (Table 3) could be responsible for the retardation in the early hydration when a C_3A -free portland cement is used in combination with a very high dosage of acrylic superplasticizer.

CEMENTO B

Figgs. 8-10 show the strength development of mixes BW, BG and BD. Although the cement B (C_3A = 4%) is a type V portland cement (ASTM), as that indicated by Richard and Cheyrezy [1], the results in terms of water-cement ratio and compressive strength are quite different with respect to the original RPC 200. Even in the mix BW with the best performances (Fig. 8), the water-cement

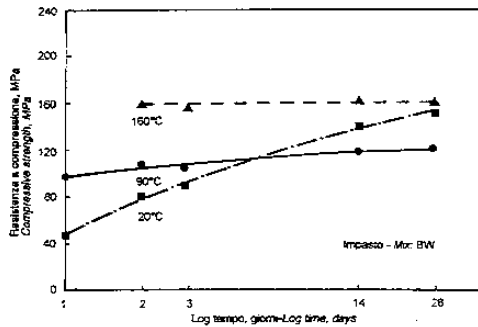


Fig. 8 - Resistenza a compressione in funzione del tempo per l'impasto confezionato con cemento B e fumo di silice bianco. Rapporto d'aspetto delle fibre= 31. Fig. 8 - Compressive strength versus time for cement B and silica fume white. Aspect ratio of steel fibers= 31.

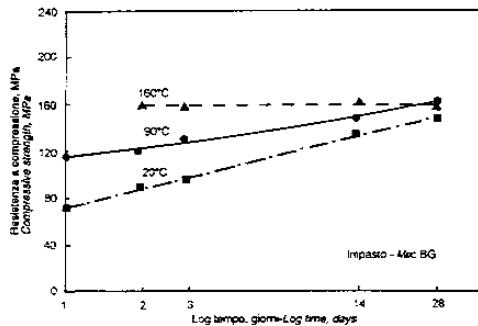


Fig. 9 - Resistenza a compressione in funzione del tempo per l'impasto confezionato con cemento B e fumo di silice grigio. Rapporto d'aspetto delle fibre= 31. Fig. 9 - Compressive strength versus time for cement B and silica fume grey. Aspect ratio of steel fibers= 31.

ratio (0.25) is significantly higher than that (0.15) of the original RPC 200.

It is confirmed that even with the cement B, as well as with the cement A, the silica fume brand plays a very important role in affecting the water-cement ratio and the early compressive strength:

— the white silica fume brand determines a lower water-cement ratio with respect to the grey silica fume brand, which in turn requires a lower amount of mixing water with respect to the dark silica fume brand;

— the white silica fume brand seems to retard the early strength development (at 20°C as well as at 90°C) with respect to the dark silica fume brand and in particular to the grey one.

CEMENT C

Fig. 11-13 show the strength development of the cement mixes CW, CG and CD. The fineness of the cement C is the same as that of the cement B (Table 2). However, the C₃A content of the cement C (11%) is much higher than that of the cement B (4%). The influence of the silica fume brand on the performances of the mixes with cement C is similar to that recorded with cement A and B:

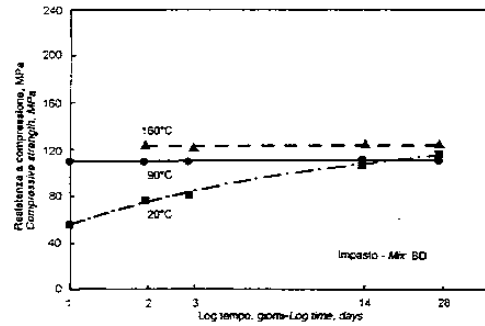


Fig. 10 - Resistenza a compressione in funzione del tempo per l'impasto confezionato con cemento B e fumo di silice nero. Rapporto d'aspetto delle fibre= 31. Fig. 10 - Compressive strength versus time for cement B and silica fume dark. Aspect ratio of steel fibers= 31.

stato confezionato con fibre lunghe 13 mm e spesse 0,18 mm: i risultati di resistenza meccanica ottenuti sono mostrati in Fig. 14. Giacché la composizione dell'impasto AG* è la stessa di quella del mix AG, con la sola eccezione del tipo di fibre di acciaio impiegate, il confronto fra la Fig. 6 e la Fig. 14 dà un'utile indicazione circa l'effetto delle fibre di acciaio sulla resistenza meccanica a compressione. In presenza delle fibre con un più alto rapporto di aspetto (72) la resistenza meccanica a compressione di 200 MPa viene raggiunta in un brevissimo periodo di tempo (2-3 giorni) indipendentemente dal fatto che l'impasto venga sottoposto al trattamento termico all'aria o al trattamento termico al vapore (Fig. 14).

I risultati sopramenzionati indicano il ruolo importantissimo giocato dalle fibre e in particolare dal rapporto di aspetto del rinforzo fibroso impiegato.

CONCLUSIONI

Sebbene siano state impiegate fibre di acciaio con un rapporto di aspetto meno favorevole di quello delle fibre utilizzate da Richard e Cheyrezy [1], sono state ottenute all'incirca le stesse prestazioni degli originali RPC 200 in termini di rapporto acqua/cemento e di resistenza meccanica a compressione. Questi eccellenti risultati possono essere ottenuti purché vengano impiegati i seguenti ingredienti:

— the white silica fume brand determines the highest reduction in the water-cement ratio, but it reduces the early compressive strength at 20°C as well as at 90°C (Fig. 11);

— with the grey silica fume brand the water-cement ratio is a little higher than that with the white silica fume brand, but the early strength development is better (Fig. 12);

— in the presence of the dark silica fume brand the water-cement ratio is still higher and the compressive strength at later ages is lower (Fig. 13).

STEEL FIBERS ASPECT RATIO

Just one mix (AG*) with steel fibers 13 mm long and 0.18 mm thick has been studied. The compressive strength results are shown in Fig. 14. Since the composition of the AG* mix is the same as that of the AG mix except of the steel fiber type, the comparison of Fig. 6 with Fig. 14 gives an indication of the effect of steel fibers. In the presence of steel fibers with a higher aspect ratio a compressive strength as high as 200 MPa is obtained in a very short time (2-3 days) by the air thermal treatment or the steam curing process (Fig. 14).

The above results indicate the very important role played by the aspect ratio of the steel fibers.

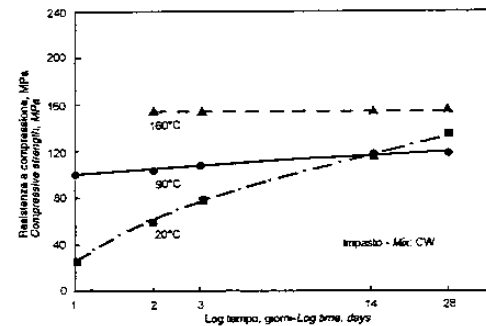


Fig. 11 - Resistenza a compressione in funzione del tempo per l'impasto confezionato con cemento C e fumo di silice bianco. Rapporto d'aspetto delle fibre= 31. Fig. 11 - Compressive strength versus time for cement C and silica fume white. Aspect ratio of steel fibers= 31.

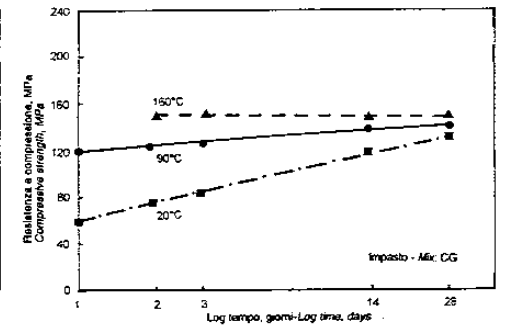


Fig. 12 - Resistenza a compressione in funzione del tempo per l'impasto confezionato con cemento C e fumo di silice grigio. Rapporto d'aspetto delle fibre= 31. Fig. 12 - Compressive strength versus time for cement C and silica fume grey. Aspect ratio of steel fibers= 31.

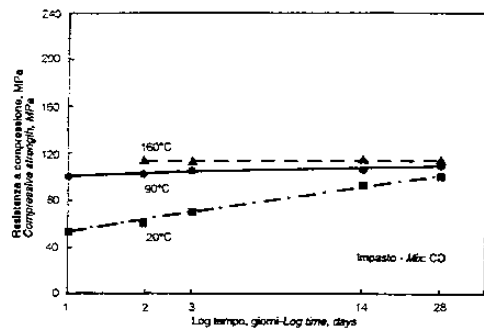


Fig. 13 - Resistenza a compressione in funzione del tempo per l'impasto confezionato con cemento C e fumo di silice nero. Rapporto d'aspetto delle fibre= 31.
Fig. 13 - Compressive strength versus time for cement C and silica fume dark. Aspect ratio of steel fibers= 31.

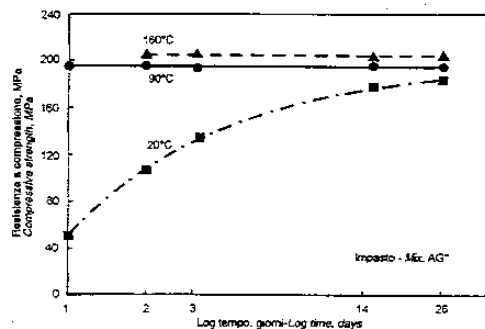


Fig. 14 - Resistenza a compressione in funzione del tempo per l'impasto confezionato con cemento A e fumo di silice grigio. Rapporto d'aspetto delle fibre= 72.
Fig. 14 - Compressive strength versus time for cement A and silica fume grey. Aspect ratio of steel fibers= 72.

— un cemento portland con un contenuto C_3A nullo e con una bassa superficie specifica ($340 \text{ m}^2/\text{kg}$);

— fumo di silice bianco non contenente carbone incombusto con dimensione media delle particelle di circa $0,7 \mu\text{m}$ in assenza di additivo superfluidificante.

— La resistenza meccanica a compressione per questo impasto (acqua/cemento = 0,18) di circa 200 MPa è stata ottenuta dopo un trattamento termico all'aria alla temperatura di 160°C per 3 giorni. Tuttavia, le resistenze meccaniche a compressione registrate per gli impasti maturati sia a 20°C che a 90°C sono risultate molto basse alle brevi stagionature.

Quando il cemento con contenuto di C_3A nullo viene sostituito da altri tipi di cemento con un più alto contenuto di C_3A , variabile tra 4-11%, il rapporto acqua/cemento aumenta e la resistenza meccanica a compressione che si ottiene dopo il trattamento termico a 160°C è di circa 160 MPa. Sebbene il fumo di silice bianco abbia prestazioni migliori rispetto agli altri fumi di silice impiegati (grigio e nero), sia in termini di rapporto acqua/cemento che di resistenza meccanica a compressione, questo tipo di fumo di silice riduce notevolmente le resistenze meccaniche a breve stagionatura sia degli impasti maturati alla temperatura ambiente che di quelli sottoposti a trattamento termico a vapore, soprattutto quando viene utilizzato con un cemento a contenuto di C_3A nullo.

CONCLUSIONS

Although steel fibers have been used with less favourable aspect ratio than that of steel fibers utilized by Richard and Cheyrezy [1], approximately the same performances as those of the original RPC 200 were obtained in terms of water-cement ratio and compressive strength. These excellent results have been obtained provided that the following ingredients were used:

— C_3A -free portland cement with low specific surface area ($340 \text{ m}^2/\text{kg}$);

— white silica fume with no unburnt carbon at all and mean particle size of about $0,7 \mu\text{m}$ in absence of superplasticizer.

A compressive strength of about 200 MPa was obtained at 3 days for this mix (water-cement ratio = 0.18) after a thermal treatment at 160°C . However, the early compressive strength at 20°C or 90°C was very low.

When the C_3A -free cement was replaced by other portland cements with a higher C_3A content (4-11%), the water-cement ratio increased and the compressive strength attained at about 160 MPa after the thermal treatment at 160°C .

Il fumo di silice grigio sembra essere meno dipendente dal cemento. Esso è risultato leggermente meno efficace del fumo di silice bianco nel ridurre il rapporto acqua/cemento; il fumo di silice grigio, tuttavia, è risultato molto più efficace di quello bianco per quanto attiene alla resistenza meccanica a compressione a breve termine. La resistenza meccanica a compressione a lungo termine dopo il trattamento termico a 160°C varia tra i 160-180 MPa per gli impasti confezionati con il fumo di silice grigio. Tuttavia, utilizzando fibre di acciaio con un rapporto di aspetto più favorevole (72), la combinazione di fumo di silice grigio con cemento portland privo di C_3A dà la stessa eccellente resistenza meccanica a compressione (circa 200 MPa) di quella dell'impasto con il fumo di silice bianco.

Questo lavoro è stato eseguito con il supporto finanziario del CNR per il Progetto Strategico "Materiali Innovativi" intitolato "Caratterizzazioni delle proprietà dei materiali compositi a matrice cementizia in relazione alla tecnologia di fabbricazione".

Il fumo di silice nero (con un contenuto di carbonio dell'1,6%) è risultato meno efficace rispetto agli altri due tipi di fumo di silice per quanto attiene sia alla riduzione del rapporto acqua/cemento che alle prestazioni meccaniche degli impasti. La resistenza meccanica a compressione a lungo termine per questi impasti dopo un trattamento termico a 160°C varia nell'intervallo 110-140 MPa.

Although the white silica fume brand performed better than other silica fume brands (grey or dark) in terms of lower water-cement ratio, this silica fume reduced the early compressive strength at room temperature as well as in the steam curing process particularly when a C_3A -free portland cement was used.

The grey silica fume brand was less depending on the cement. It was a little less effective than the white one in reducing the water-cement ratio, but it was much more effective for the early strength development.

The compressive strength at later ages after the thermal treatment at 160°C was in the range of 160-180 MPa. However, by using steel fibers with a more favourable aspect ratio (72) the combination of grey silica fume with a C_3A -free portland cement gives the same excellent compressive strength (200 MPa) as that of the white silica fume cement mix.

The dark silica fume brand (with a carbon content of 1.6%) was less effective than the other silica fume brands in terms of water-cement ratio and strength. The compressive strength at later ages after the thermal treatment at 160°C was in the range of 110-140 MPa when the dark silica fume brand was used.

Questo lavoro è stato eseguito con il supporto finanziario del CNR per il Progetto Strategico "Materiali Innovativi" intitolato "Caratterizzazioni delle proprietà dei materiali compositi a matrice cementizia in relazione alla tecnologia di fabbricazione".

The present work has been carried out with the financial support of CNR for the Strategic Project "New materials" entitled "Characterization of composite materials properties based on cement matrix in relationship with the technological process".

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

[1] RICHARD, P. CHEYREZY, M.H., *Reactive Powder Concretes with High Ductility and 200-800 MPa Compressive Strength*, "Concrete Technology. Past, Present, and Future", editor: P. Kumar Metha, S. Francisco, USA, 1994, pp. 507-518.
[2] COLLEPARDI, M., COPPOLA, L., CERULLI, T., FERRARI, G., PISTOLESI, C., ZAFFARONI, P. AND QUEK, F., *Zero Slump-Loss Superplasticized Concrete*, "Quality in Concrete and Structures", editor: C.T. Tam, Singapore, 1993, pp. 73-79.
[3] COLLEPARDI, M., *Superplasticizers and Air Entraining*

Agents: *State of the Art and Future Needs*, "Concrete Technology. Past, Present, and Future", editor: P. Kumar Metha, S. Francisco, USA, 1994, pp. 399-416.

[4] COLLEPARDI, M., *Advances in Chemical Admixtures for Concrete*, "Advances in Cement and Concrete", editors: M. W. Grutzeck and S.L. Sarkar, Durham, Usa, 1994, pp. 257-291.
[5] EDWARDS-LAJNEF, M., BONNAMY AND VAN DAMME, H., *Another Way to Understand the Silica Fumes Filler Effect: A study in (Micro)structure*, "Fifth CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete", Supplementary Papers, Milwaukee, USA, 1995, pp. 443-459.