

# INFLUENZA DEL TIPO DI SUPERFLUIDIFICANTE SULLA RESISTENZA A COMPRESSIONE DELLE MALTE A POLVERE REATTIVA

Silvia Collepardi\*, Luigi Coppola\*, Roberto Troli\*, Pasquale Zaffaroni\*\*, Mario Collepardi\*\*\*

\*Enco, Engineering Concrete - Spresiano (TV)

\*\*Mapei Spa - Milano

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

## RIASSUNTO

Sono state confezionate alcune malte a polvere reattiva (*Reactive Powder Mortar: RPM*) impiegando diversi tipi di cemento portland, di fumo di silice e di fibre d'acciaio. Tutte le malte sono state maturate alla temperatura di 20°C e U.R. del 95%. Nel presente lavoro è stata analizzata l'influenza del tipo di superfluidificante sulle prestazioni delle malte a polvere reattiva in termini di rapporto acqua/cemento e di resistenza meccanica a compressione.

Lo studio effettuato ha evidenziato che il superfluidificante a base di polimeri acrilici (*acrylic polymer: AP*) è più efficace rispetto ai tradizionali superfluidificanti a base naftalinica (*Sulfonated Naphtalene Formaldehyde: SNF*) o melamminica (*Sulfonated Melamine Formaldehyde: SMF*) in quanto consente di confezionare malte con rapporti acqua/cemento più bassi (a pari lavorabilità iniziale) e con resistenze meccaniche a compressione maggiori purché la stagionatura sia superiore a 3 giorni.

Le resistenze meccaniche a compressione a 1 giorno delle malte a polvere reattiva confezionate con il polimero acrilico risultano decisamente minori rispetto agli analoghi valori ottenuti per le malte confezionate con i polimeri naftalinici o melamminici allorquando viene utilizzato un cemento con tenore di C<sub>3</sub>A nullo e caratterizzato da una area superficiale specifica bassa. Questi risultati sono probabilmente da attribuire al forte effetto ritardante dell'additivo acrilico sull'idratazione iniziale del cemento privo di C<sub>3</sub>A allorquando questo cemento viene utilizzato congiuntamente con alcuni tipi di fumo di silice. Nelle malte confezionate con cementi portland contenenti alluminato tricalcico, l'effetto ritardante del polimero acrilico sull'idratazione del cemento non si manifesta e, quindi, anche le resistenze meccaniche a compressione dopo 1 giorno di stagionatura risultano particolarmente elevate.

Lo studio evidenzia, infine, che le resistenze meccaniche a 28 giorni (R<sub>c28</sub>) dei provini di malta a polvere reattiva sono fortemente dipendenti sia dal tipo di cemento e di fumo di silice che dal tipo di superfluidificante impiegato. I valori di R<sub>c28</sub> ottenuti, (160-180 MPa), tuttavia, risultano più bassi di quelli (170-230 MPa) conseguiti dagli inventori delle malte a polvere reattiva.

## ABSTRACT

*Reactive powder mortar (RPM) mixtures cured at room temperature with different portland cement, silica fume and steel fibers were manufactured. The influence of the superplasticizer type on the RPM performance - in terms of w/c and compressive strength - was studied.*

*The acrylic polymer (AP) admixture performed better than the naphthalene (SNF) or melamine (SMF) based superplasticizers in regard to lower water-cement ratio and higher compressive strength at ages after 3 days.*

*The 1-day compressive strength of the RPM with the AP admixture was much lower than that of the corresponding mixtures with SNF or SMF when a C<sub>3</sub>A-free portland cement with a low specific surface area was used. This was due to a strong retarding effect of the early hydration when this cement was used in combination with some silica fume types. With other portland cements, the retarding in the early hydration caused by AP did not occur and therefore the 1-day compressive strength was quite high.*

*The 28-day compressive strength of RPM specimens, cured at room temperature, were strongly dependent on the type of cement, silica fume and superplasticizer. However, the highest values obtained in this investigation (160-180 Mpa) were lower than those reported by the inventors of RPM (170-230 Mpa).*

## **1. INTRODUZIONE**

La malta a polvere reattiva (*Reactive Powder Mortar RPM\**) è un sistema cementizio speciale ad alta resistenza meccanica, fibro-rinforzato, a base di superfluidificante e fumo di silice, con una "elevata" omogeneità in quanto l'aggregato tradizionale è sostituito da una sabbia finissima con dimensione dei granuli compresa nell'intervallo di 150-400 µm (1). Le potenziali applicazioni dell'*RPM* includono strutture precomprese prive di armatura (2, 3), tubazioni prefabbricate per fluidi o gas ad alta pressione (4), contenitori impermeabili per liquidi pericolosi o rifiuti nucleari (5).

In precedenti lavori è stata studiata l'influenza del tipo di cemento e del tipo di fumo di silice sul rapporto acqua-cemento (*a/c*) e sulla resistenza meccanica dell'*RPM* (6, 7).

Questo lavoro riguarda l'influenza del tipo di superfluidificante (a base naftalinica, melamminica o acrilica), sulle prestazioni dell'*RPM* in termini di rapporto *a/c* e di resistenza meccanica a compressione.

## **2. MATERIALI**

Due cementi Portland (*A* e *B*), entrambi di tipo V ASTM, sono stati scelti per questo lavoro. Le principali differenze nei due cementi sono il contenuto di C<sub>3</sub>A e la finezza Blaine: il contenuto di C<sub>3</sub>A è 0% e 4% mentre l'area superficiale specifica Blaine è di 340 e 530 m<sup>2</sup>/kg rispettivamente per il cemento *A* e per quello *B*.

Molti altri cementi Portland sono stati utilizzati per studiare le prestazioni dell'*RPM*. Tuttavia, per ragioni di brevità, in questo lavoro verranno esaminati soltanto i risultati ottenuti con i cementi *A* e *B*: il cemento *A* (privo di C<sub>3</sub>A e con un'area superficiale specifica minore) è stato scelto per il suo particolare comportamento rispetto a tutti gli altri cementi; il cemento *B* è rappresentativo di molti cementi Portland.

Tre tipi di fumo di silice (*B*, *G*, *N*), sono stati usati per questo lavoro. Essi differivano per il colore (bianco, grigio e nero rispettivamente), per dimensione particellare, per la presenza di componenti minori e per il contenuto di incombusto (Tabella 1). La più importante caratteristica che differenzia i diversi tipi di fumo di silice sembra essere il peso specifico in mucchio il quale è molto più basso per il fumo di silice *G* che per gli altri. Ciò indica che i fumi di silice *B* e *N* sono disponibili in una forma densificata, mentre il tipo *G* è un fumo di silice non densificato.

---

\* *Il termine originale (Reactive Powder Concrete, RPC) coniato dagli inventori del materiale appare improprio per l'assenza di aggregato grosso che contraddistingue un calcestruzzo rispetto ad una malta.*

**Tabella 1 - Composizione e proprietà dei fumi di silice.**

Fumo di silice	B	G	N
Colore	Bianco	Grigio	Nero
SiO <sub>2</sub> (%)	94.43	98.87	95.12
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	2.48	0.01	0.02
SO <sub>3</sub> (%)	0.01	0.23	0.54
K <sub>2</sub> O (%)	0.04	0.08	0.91
Na <sub>2</sub> O (%)	0.01	0.00	0.01
CaO (%)	0.04	0.23	0.49
MgO (%)	0.01	0.01	0.02
TiO <sub>2</sub> (%)	0.21	0.08	0.23
MnO <sub>2</sub> (%)	0.20	0.01	0.21
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0.46	0.30	0.40
Dimensione media particellare (µm) mediante granulometria laser:			
- senza superfluidificante SNF	0.69	13.87	63.59
- con superfluidificante SNF	0.62	0.76	0.73
Incombusto (%)	0.0	0.0	1.6
Massa volumica in mucchio (g/cm <sup>3</sup> )	0.45	0.12	0.47

Sono stati impiegati una sabbia fine naturale (150-400 µm) e silice amorfa precipitata (SiO<sub>2</sub> > 98.8%) in accordo con la composizione proposta da Richard e Cheyrezy per l'*RPM* con una resistenza meccanica a compressione di 200 MPa (1).

Sono state impiegate due tipologie di fibre con rapporto di aspetto rispettivamente di 31 (lunghezza 11 mm, diametro 0.35 mm) e 72 (lunghezza 13 mm, diametro 0.18 mm).

In generale, per questo lavoro sono state impiegate le fibre con rapporto d'aspetto 31; tuttavia, per alcune particolari miscele sono state impiegate le fibre con rapporto d'aspetto 72.

Sono stati impiegati tre diversi tipi di superfluidificante:

- 30 % di una soluzione acquosa di polimero acrilico (*AP*);
- 40% di una soluzione acquosa di melammina solfonata condensata con formaldeide (*SMF*);
- 40 % di una soluzione acquosa di naftalina solfonata condensata con formaldeide (*SNF*).

I dettagli su questi superfluidificanti sono disponibili in altre pubblicazioni (8,9).

### 3. MALTE

La Tabella 2 mostra la composizione dei componenti in polvere, inclusa la parte solida del superfluidificante in soluzione acquosa. La quantità di superfluidificante per ottenere l'*RPM* è in genere da 4 a 6 volte più elevata di quella richiesta per i calcestruzzi tradizionali.

La quantità di superfluidificante secco *AP* è stato dell' 1.36% rispetto alla massa di cemento come nella miscela originale proposta da Richard e Cheyrezy (1). La quantità di superfluidificante secco *SNF* oppure *SMF* (1,78%) è stata scelta dopo alcune prove preliminari al fine di individuare la migliore prestazione in termini di riduzione d'acqua per un determinato livello di lavorabilità. In altre parole, non si è trovata alcuna ulteriore riduzione di acqua impiegando quantitativi di *SNF* o *SMF* maggiori di 1.78%.

**Tabella 2 - Composizione delle miscele RPM (parti in massa) senza l'acqua d'impasto.**

<b>Malta con:</b>	<b>AP</b>	<b>SNF</b>	<b>SMF</b>
Cemento Portland	100	100	100
Fumo di silice	24	24	24
Silice precipitata	1	1	1
Sabbia fine	110	110	110
Fibre in acciaio	20	20	20
Superfluidificante	1.36	1.78	1.78

Dopo aver mescolato tutti gli ingredienti inclusa l'acqua in un mescolatore da laboratorio per 5 minuti, si è osservato che le malte fresche si presentavano molto appiccicose. Pertanto, l'originale metodo di prova (spandimento con 15 colpi nella tavola a scosse) non è apparso il metodo più adeguato per valutare la lavorabilità sotto la vibrazione richiesta per compattare queste miscele appiccicose all'interno dei casseri. E' stato adottato, quindi, un metodo modificato dello spandimento utilizzando un tavolo vibrante Vebè (vibrazione per 10 secondi) in luogo dell'originale tavola a scosse. Sono state preparate 18 diverse miscele - tutte allo stesso livello di lavorabilità: 150-160 mm nel metodo di spandimento modificato - cambiando i tipi di cemento Portland (*A* e *B*), i tipi di fumo di silice (*B*, *G* e *N*) ed i tipi di superfluidificante (*AP*, *SNF* e *SMF*). Le Tabelle 3 e 4 indicano la composizione delle miscele, il rapporto acqua-cemento (*a/c*) come anche il rapporto tra l'acqua e il materiale cementizio legante (incluso il fumo di silice) delle 18 miscele ottenute con i cementi *A* e *B*. La quantità di acqua che veniva introdotta attraverso la soluzione acquosa di superfluidificante è stata tenuta in conto nel calcolo del rapporto *a/c* come anche nel rapporto acqua-legante.

**Tabella 3 - Composizione (kg/m<sup>3</sup>) delle miscele RPM con cemento A (C<sub>3</sub>A = 0%) tutte con fibre in acciaio con rapporto d'aspetto = 31**

RPM N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Tipo di fumo di silice	Bianco			Grigio			Nero		
Superfluidificante	AP	SNF	SMF	AP	SNF	SMF	AP	SNF	SMF
Composizione (kg/m <sup>3</sup> ):									
- Cemento Portland	937	900	876	903	876	847	872	854	847
- Fumo di silice: fs	225	216	210	217	210	203	209	205	203
- Silice precipitata	9.4	9.0	8.8	9.0	8.8	8.5	8.7	8.5	8.5
- Sabbia fine	1031	990	963	993	964	932	959	939	932
- Fibre d'acciaio	187	180	175	181	175	169	174	171	169
- Superfluidificante*	12.7	16.0	15.6	11.3	15.6	15.1	11.9	15.2	15.1
- Acqua	169	198	219	199	219	246	227	239	246
<i>a/c</i>	0.18	0.22	0.25	0.22	0.25	0.29	0.26	0.28	0.29
<i>a/(c + fs)</i>	0.14	0.18	0.20	0.18	0.20	0.23	0.21	0.22	0.23
Spandimento (mm)	160	150	150	160**	150	150	160	160	160

\* Polimero secco

\*\* Solo per questo impasto sono state impiegate anche fibre in acciaio con rapporto d'aspetto 72 (spandimento = 150 mm)

**Tabella 4 - Composizione (kg/m<sup>3</sup>) delle miscele RPM con cemento B (C<sub>3</sub>A = 4%), tutte con fibre in acciaio con rapporto d'aspetto 31.**

RPM N°	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Tipo di fumo di silice	Bianco			Grigio			Nero		
Superfluidificante	AP	SNF	SMF	AP	SNF	SMF	AP	SNF	SMF
Composizione (kg/m <sup>3</sup> ):									
- Cemento Portland	879	847	833	850	793	768	843	787	763
- Fumo di silice: fs	211	203	200	204	190	184	202	189	183
- Silice precipitata	8.8	8.5	8.3	8.5	7.9	7.7	8.4	7.9	7.6
- Sabbia fine	967	932	916	935	872	845	927	866	953
- Fibre d'acciaio	176	169	167	170	159	154	169	157	153
- Superfluidificante*	12.0	15.1	14.8	11.6	14.1	13.7	11.5	10.7	13.6
- Acqua	220	246	258	247	293	315	254	299	321
a/c	0.25	0.29	0.31	0.29	0.37	0.41	0.30	0.38	0.42
a/(c + fs)	0.20	0.23	0.25	0.23	0.30	0.33	0.24	0.30	0.34
Spandimento (mm)	155	150	150	150	155	150	155	160	155

\* Polimero secco

#### 4. PREPARAZIONE DEI PROVINI

Sono stati confezionati provini cubici (40 mm) mediante vibrazione i quali, successivamente, sono stati stagionati alla temperatura ambiente di 20°C. Sono state misurate le resistenze meccaniche alle stagionature di 1, 2, 3, 14 e 28 giorni. In alcuni casi sono state eseguite analisi per diffrazione dei raggi X (XRD) allo scopo di studiare l'effetto dell'additivo sull'idratazione del cemento.

#### 5. RISULTATI SPERIMENTALI

Nel seguito saranno presi in considerazione i risultati relativi al il rapporto  $a/c$  e alla resistenza meccanica a compressione.

##### Rapporto a/c

Il rapporto  $a/c$  delle miscele (Tabelle 3 e 4) è influenzato dal tipo di cemento, di fumo di silice e di superfluidificante:

- indipendentemente dal tipo di superfluidificante, le miscele con il cemento A (quello privo di C<sub>3</sub>A e con minore area superficiale specifica) hanno richiesto sempre un minor quantitativo di acqua, e quindi un minor rapporto  $a/c$ , in confronto alle miscele con il cemento B; risultati simili sono stati ottenuti con altri cementi Portland in presenza dell'additivo superfluidificante AP (6, 7);
- indipendentemente dal tipo di superfluidificante, il rapporto  $a/c$  nelle miscele con fumo di silice bianco è risultato essere significativamente più basso che nelle miscele con fumo di silice nero, mentre il fumo di silice grigio si è comportato un po' meglio di quello nero;
- indipendentemente dal tipo cemento e di fumo di silice, il rapporto  $a/c$ , in presenza di polimero acrilico, è stato sempre più basso rispetto a quello adottato in presenza di superfluidificanti SNF o SMF, sebbene la quantità di AP fosse sempre minore rispetto agli altri additivi (1.36% contro 1.78% rispetto alla massa di cemento).

Pertanto, la migliore prestazione in termini di minor rapporto  $a/c$  è avvenuta con le seguenti combinazioni: cemento portland privo di  $C_3A$ , fumo di silice bianco e polimero acrilico (Tabella 3, miscela N° 1:  $a/c = 0.18$ ). Per contro, il massimo rapporto  $a/c$  è stato ottenuto con il cemento *B*, fumo di silice nero e superfluidificante *SMF* (Tabella 4, miscela No. 18:  $a/c = 2.42$ ). Tuttavia, come sarà mostrato più avanti, non necessariamente la miscela con il minor rapporto  $a/c$  ha fornito la massima resistenza meccanica a compressione.

## 6. RESISTENZA MECCANICA

Le Tabelle 5 e 6 mostrano la resistenza meccanica a compressione delle miscele da 1 a 9 e da 10 a 18 rispettivamente alle stagionature comprese da 1 a 28 giorni.

**Tabella 5 - Resistenza meccanica a compressione in funzione del tempo per le miscele RPM N° 1-9 in Tabella 4.**

TEMPO (giorni)	RESISTENZA A COMPRESSIONE (MPa) delle miscele N°:								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.0	56.0	62.4	28.8 (54.4)*	60.8	41.6	0.0	44.8	35.2
2	67.2	76.8	83.2	72.0 (96.0)*	89.6	62.4	44.8	67.2	56.0
3	96.0	80.0	86.4	100.8 (115.2)*	88.1	78.4	76.8	86.4	68.8
14	132.8	108.8	116.8	139.2 (166.4)*	124.8	108.8	108.8	102.4	92.8
28	150.4	110.0	118.1	150.4 (180.4)*	136.0	118.4	105.6	100.8	93.0

\*Fibre con rapporto d'aspetto 72.

**Tabella 6 - Resistenza meccanica a compressione in funzione del tempo per le miscele RPM N° 10-18 con cemento B in Tabella 5.**

TEMPO (giorni)	RESISTENZA A COMPRESSIONE (MPa) delle miscele N°:								
	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	41.6	54.4	64.0	75.2	59.2	44.8	57.6	46.4	38.0
2	70.4	83.2	92.8	86.4	72.0	59.2	72.0	60.8	44.8
3	86.4	96.0	102.4	99.2	83.4	70.4	75.2	67.2	57.6
14	142.4	124.8	128.0	129.6	112.0	100.0	102.4	86.4	72.0
28	155.2	134.4	140.8	144.0	131.2	116.8	100.2	92.8	80.0

La Tabella 5 mostra la resistenza meccanica a compressione in funzione del tempo di idratazione (1-28 giorni) in miscele con il cemento *A* e fibre d'acciaio con rapporto d'aspetto 31. In presenza di fumo di silice bianco (Tabella 5), la resistenza meccanica alle brevi stagionature con il superfluidificante *AP* è risultata molto più bassa che nelle miscele con superfluidificanti *SNF* o *SMF*. Tuttavia, alle stagionature successive, la miscela contenente l'additivo *AP* raggiungeva resistenze meccaniche maggiori rispetto a quelle delle corrispondenti miscele con *SNF* o *SMF*: la resistenza meccanica a 28 giorni è risultata circa

160 MPa con l'additivo *AP* contro il valore di 100 MPa ottenuto con gli additivi *SNF* o *SMF*. Questo comportamento può essere spiegato in termini di un forte ritardo iniziale della reazione di idratazione del cemento in presenza dell'additivo *AP*, mentre alle stagionature più lunghe il minore rapporto *a/c* di questa miscela (0.18) è responsabile del maggior livello di resistenza meccanica. Il forte ritardo iniziale provocato dall'additivo *AP* può essere ascritto all'alto dosaggio di questo superfluidificante (4-5 volte maggiore del dosaggio usuale, cioè 0.3% di polimero secco rispetto alla massa di cemento) e alla specifica combinazione del fumo di silice bianco con il cemento portland privo di  $C_3A$  che presenta anche una bassa area superficiale specifica.

L'introduzione del fumo di silice grigio in luogo di quello bianco riduce il ritardo dell'idratazione del cemento ad 1 giorno provocato dall'additivo *AP*, ma riduce anche la resistenza meccanica a 28 giorni (Tabella 5) in quanto il rapporto *a/c* è più alto (0.22 contro 0.18, Tabella 3). Il polimero acrilico si comporta meglio dell'*SNF* o dell'*SMF* in termini di rapporto *a/c* (Tabella 3) come anche di resistenza meccanica a 28 giorni.

Di nuovo, in presenza di fumo di silice nero (Tabella 5), l'idratazione del cemento Portland privo di  $C_3A$  è ritardata dal superfluidificante *AP*. Tuttavia, alle stagionature successive (dopo 3 giorni), non vi è alcuna significativa differenza nella resistenza meccanica a compressione delle miscele superfluidificate indipendentemente dallo specifico additivo impiegato.

L'unica proprietà del fumo di silice che potrebbe spiegare l'effetto sulla resistenza meccanica a 1 giorno dell'*RPM* quando si impiega il cemento portland esente da  $C_3A$  sembra essere la caratteristica legata alla densificazione. Il fumo di silice *G*, con una massa volumica in mucchio di  $0.12 \text{ g/cm}^3$  (Tabella 1), è una polvere non densificata, mentre i fumi di silice *B* ed *N* (con una massa volumica in mucchio di  $0.45\text{-}0.47 \text{ g/cm}^3$ ) sono disponibili in forma di polveri compattate e densificate. Pertanto, poichè i granuli individuali dei fumi di silice *B* ed *N* sono risultati meno dispersi al termine del tempo di miscelazione (5 minuti), essi hanno adsorbito una quantità minore di superfluidificante *AP* e questo ha provocato un forte ritardo nella reazione di idratazione del cemento rispetto al fumo di silice non densificato (*G*). Questo effetto - come sarà illustrato più avanti - risulta essere aggravato dalla presenza di un cemento portland esente da  $C_3A$  e poco finemente macinato il quale adsorbe esso stesso una minore quantità di superfluidificante rispetto agli altri cementi portland che sono più ricchi in  $C_3A$  e più finemente macinati (10).

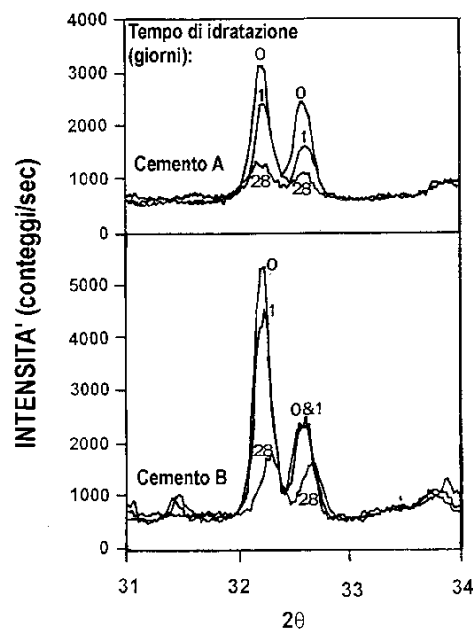
La Tabella 6 mostra la resistenza meccanica a compressione in funzione del tempo di idratazione (1-28 giorni) nelle miscele con cemento *B* e con le fibre di acciaio caratterizzate dal rapporto d'aspetto 31. Questi risultati sono rappresentativi delle prestazioni dell'*RPM* anche con altri cementi Portland diversi da quello impiegato nel presente lavoro.

In generale, la prestazione in termini di rapporto *a/c* è risultata essere molto migliore con il cemento *A* (Tabella 3) che non con il cemento *B* (Tabella 4). Tuttavia, lo sviluppo della resistenza meccanica a compressione non sempre è in accordo con i dati del rapporto *a/c*. Per esempio, la miscela n. 10 con il cemento *B*, fumo di silice bianco e superfluidificante *AP* (*a/c* = 0.25) si comporta molto meglio che non la corrispondente miscela n. 1 con il cemento *A* (*a/c* = 0.18) in termini di resistenza meccanica a compressione a 1 giorno: (45 MPa) contro 1 MPa (Tabelle 5 e 6). Questa differenza può essere attribuita alla specifica combinazione dell'additivo *AP* (al dosaggio altissimo di 1.36%) con il cemento portland privo di  $C_3A$  e caratterizzato da una bassa area superficiale specifica. Questa combinazione di materiali è risultata responsabile del ritardo dell'idratazione iniziale del cemento *A*.

I dati XRD del cemento anidro, come anche quelli del cemento idratato a 1 e 28 giorni, confermano queste ipotesi: la Fig. 1 mostra i picchi XRD ( $2\theta$  a  $32.2^\circ$  e  $32.6^\circ$ ) del  $C_3S$  e del  $C_2S$  dei cementi *A* e *B* in presenza di fumo di silice bianco ed additivo *AP*. Il grado di

idratazione del cemento *A* ad 1 giorno è risultato essere trascurabile - in termini di riduzione del picco XRD a  $32.6^\circ$  - e molto minore - in termini di diminuzione del picco XRD a  $32.2^\circ$  - rispetto a quello registrato con il cemento *B* e questo spiega la maggiore resistenza meccanica del cemento *B* rispetto al cemento *A*. Alle stagionature più lunghe, la differenza nel grado di idratazione tra cemento *A* e cemento *B* diminuisce e perciò la resistenza meccanica a 28 giorni della miscela con il cemento *A* è risultata essere maggiore a causa del minor rapporto *a/c* rispetto alla miscela con il cemento *B*.

Questi risultati, in generale, sono in accordo con gli altri dati pubblicati in letteratura sulla relazione tra il tipo di cemento e l'effetto del superfluidificante (10): cementi con un contenuto trascurabile o piccolo di  $C_3A$ , e comunque caratterizzati da una bassa area superficiale specifica - come il cemento *A* del presente lavoro - adsorbono una minore quantità di superfluidificante. Questo, pertanto, è disponibile nella fase acquosa in maggiore quantità e risulta essere responsabile di un maggiore effetto di dispersione delle particelle di cemento, ma anche di un maggiore ritardo della reazione di idratazione del  $C_3S$  e del  $C_2S$ . Questo modello può spiegare perchè con tutti gli additivi impiegati in questo lavoro - indipendentemente dalla loro natura - l'effetto superfluidificante in termini di riduzione nel rapporto *a/c* a pari lavorabilità, è risultato essere maggiore (Tabelle 3 e 4), mentre la resistenza meccanica a 1 giorno è risultata essere minore (Tabelle 5 e 6), quando si è impiegato il cemento *A* in luogo del cemento *B*. Ciò che in particolare emerge da questo lavoro è che il suddetto effetto, particolarmente con il cemento privo di  $C_3A$ , è molto più significativo con l'additivo *AP* che non con gli additivi *SNF* o *SMF*. Questo sembra essere in relazione con il maggior effetto ritardante sull'idratazione provocato dal superfluidificante *AP* soprattutto agli alti dosaggi quali quello impiegato in questo studio.



**Fig. 1 - L'influenza del cemento (A o B) sui picchi XRD di miscele RPM con fumo di silice bianco ed additivo AP (miscele N° 1 e 10).**

In questo lavoro, la resistenza meccanica a compressione a 28 giorni dell'*RPM* è risultata essere nell'intervallo di 70-160 MPa, con le migliori prestazioni ottenute in presenza di cemento *A* in combinazione con il fume di silice bianco ed additivo superfluidificante *AP*



(Tabella 5), e con le peggiori prestazioni registrate con il cemento *B* combinato con il fumo di silice nero ed additivo con *SMF* (Tabella 6).

Tutti questi dati non sono in accordo con i risultati di resistenza meccanica (170-230 MPa) riportati da Richard e Cheyrezy (1). La principale discrepanza tra i risultati finora discussi e quelli riportati da Richard e Cheyrezy sembra essere attribuita al diverso rapporto d'aspetto delle fibre d'acciaio che era maggiore nelle fibre impiegate da Richard e Cheyrezy rispetto a quelle utilizzate nel presente lavoro (72 contro 31). Sono state eseguite, pertanto, prove supplementari con fibre di acciaio aventi un rapporto d'aspetto simile a quello usato da Richard e Cheyrezy. In Tabella 5 si può valutare, ad esempio, l'effetto del rapporto d'aspetto delle fibre sulla resistenza meccanica della miscela n. 4 (cemento *A*, fumo di silice *G*, superfluidificante *AP*). Risultati simili sono stati ottenuti con altre combinazioni di cemento, fumo di silice e superfluidificante: la resistenza meccanica a compressione aumentava di 20-30 MPa con l'aumento del rapporto d'aspetto delle fibre da 31 a 72. In generale, il cambio nel rapporto d'aspetto delle fibre non modifica significativamente la resistenza meccanica a compressione delle miscele cementizie. La quantità relativamente elevata delle fibre d'acciaio usate in questo studio (20% rispetto alla massa di cemento) potrebbe giustificare l'aumento nel valore della resistenza meccanica. Tuttavia, anche con l'impiego di fibre con un rapporto d'aspetto più favorevole (72), la resistenza meccanica a compressione delle miscele *RPM* studiate in questo lavoro e stagionate a temperatura ambiente (Tabella 5) è risultata essere più bassa del valore di 200 MPa riportato da Richard e Cheyrezy per una miscela cementizia apparentemente identica. Solo adottando dei trattamenti termici a temperature di 160°C gli autori di questo lavoro sono stati capaci di raggiungere la resistenza meccanica di 200 MPa (7).

## 7. CONCLUSIONI

L'additivo a base di polimero acrilico si comporta meglio dei superfluidificanti a base di *SNF* o *MSF* in termini di minor rapporto *a/c*, indipendentemente dal tipo di cemento o fumo di silice impiegato nella produzione delle miscele *RPM*.

Tuttavia, quando viene impiegato un cemento esente da  $C_3A$  e con bassa area superficiale specifica (340 m<sup>2</sup>/kg) la resistenza meccanica a 1 giorno risulta essere molto più bassa in presenza di additivo *AP* che non in presenza di superfluidificanti *SNF* o *SMF*, particolarmente quando si impiegano fumi di silice bianco o nero. Tale comportamento potrebbe essere messo in relazione con uno specifico effetto ritardante sulla idratazione iniziale di questo cemento per la presenza di *AP* e di fumi di silice densificati (come sono risultati quelli di colore bianco o nero). Con altri cementi portland ed in presenza di fumo di silice non densificato (colore grigio), l'additivo *AP* non ha provocato alcun ritardo iniziale.

Alle stagionature successive (dopo 3 giorni), la resistenza meccanica delle miscele *RPM* con l'additivo *AP* è risultata essere sempre più alta di quella ottenuta per le malte con additivi *SNF* o *SMF*, indipendentemente dal tipo di cemento o fumo di silice impiegato.

Aumentando il rapporto d'aspetto delle fibre d'acciaio da 31 a 72, la resistenza meccanica è aumentata di 20 a MPa. Tuttavia, anche con un rapporto d'aspetto più favorevole, la resistenza meccanica a compressione dei provini stagionati a temperatura ambiente è stata al massimo di 170-180 MPa e pertanto minore del valore di 200 Mpa come sostenuto da Richard e Cheyrezy (1).

## 8. RINGRAZIAMENTI

Hanno collaborato alla stesura del testo ed alla preparazione delle figure Alessandra Galletti e Mara Meneghel.

## 9. BIBLIOGRAFIA

1. Richard, P. and Cheyrezy, M., *Atti del V.M. Malhotra Symposium "Concrete Technology. Past, Present and Future"*, ACI SP 144-24, P.K. Metha, S. Francisco (1994) , pp. 507-518.
2. Richard, P., *Atti del 4th International Symposium on Utilization of High-Strength/High Performance Concrete*, Paris (1996) , pp. 1343-1349. Editors: F. de Larrard and R. Lacroix, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Vol. 3.
3. Adeline, R. and Behloul, M., *Atti del 4th International Symposium on Utilization of High-Strength/High Performance Concrete*, Paris (1996) , pp. 1383-1390. Editors: F. de Larrard and R. Lacroix, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Vol. 3.
4. Dowd, W.M. and O'Neil, E.F., *Atti del 4th International Symposium on Utilization of High-Strength/High Performance Concrete*, Paris (1996), pp. 1383-1390. Editors: F. de Larrard and R. Lacroix, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Vol. 3.
5. Torrenti, J.M., Matte, V., Maret, V. and Richet, C., *Atti del 4th International Symposium on Utilization of High-Strength/High Performance Concrete*, Paris (1996), pp. 1407-1413. Editors: F. de Larrard and R. Lacroix, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Vol. 3.
6. Coppola, L., Troli, R., Cerulli, T. and Collepardi, M., *Atti del 4th International Congress on High-Performance Concrete, and Performance and Quality of Concrete Structures*, Florianopolis (1996) , pp. 502-513.
7. Coppola, L., Troli, R., Collepardi, S., Borsoi, A., Cerulli, T. and Collepardi M., *L'Industria Italiana del Cemento*, 707, (1996) , pp. 112-125.
8. Collepardi, M., Coppola, L., Cerulli, T., Ferrari, G., Pistolesi, C., Zaffaroni, P. and Quek, F., *Atti del 18th Conference on "Our World in Concrete and Structures"*, Singapore (1993) , pp. 73-79. Editor: C.T. Tam.
9. Collepardi, M., *Atti del Engineering Foundation Conference "Advances in Cement and Concrete"*, Durham, New Hampshire (1994), pp. 257-291. Editors: M.W. Grutzeck and S.L. Sarkar.
10. Collepardi, M. and Ramachandran, V.S., *Atti del 9th International Congress on the Chemistry of Cement*, Vol. I, Theme IIID, New Delhi, India (1992).