

CALCESTRUZZO A POLVERE REATTIVA MODIFICATO

*Silvia COLLEPARDI**, *Luigi COPPOLA**, *Roberto TROLI**, *Pasquale ZAFFARONI***
*Mario COLLEPARDI****

*ENCO, Spresiano, (TV)

**MAPEI, Milano, (MI)

*** Dip. di Scienza dei Materiali e della Terra - Facoltà di Ingegneria
Università di Ancona

1. INTRODUZIONE

I calcestruzzi ad alta resistenza meccanica - più noti come *HPC* (*High Performance Concretes*) - sono caratterizzati da una resistenza meccanica a compressione compresa nell'intervallo di 60-100 N/mm², ma i più recenti sviluppi di questi materiali, in forma di *RPC* (*Reactive Powder Concrete*), prevedono una resistenza meccanica a compressione che può superare 200 N/mm² (*RPC 200*) e con tecniche produttive più sofisticate può arrivare fino a 800 N/mm² (*RPC 800*). Il *Reactive Powder Concrete* (*RPC*) è un conglomerato cementizio privo di aggregati grossi e contenente sabbie finissime caratterizzato dalla presenza di: additivi superfluidificanti per diminuire il rapporto acqua/cemento a valori molto bassi (0.15-0.25) e ridurre, quindi, la porosità capillare della matrice cementizia; fumo di silice, materiale pozzolanico di dimensione sub-micronica capace di allocarsi tra gli interstizi dei granuli di cemento e di ridurre, quindi, ulteriormente la porosità capillare; micro-fibre in acciaio (diametro 0.18 mm, lunghezza 13 mm) per rinforzare la matrice cementizia e migliorare in particolare la tenacità. Grazie a questa particolare composizione la matrice cementizia presenta una microstruttura pressochè priva di pori capillari, e quindi la resistenza meccanica a compressione (200 MPa) si avvicina al limite massimo di 250 MPa previsto dalla teoria di Powers per un materiale a porosità nulla [1, 2].

In effetti è improprio definire questo materiale un calcestruzzo poiché non contiene aggregato grosso nella miscela cementizia. L'assenza di aggregato grosso veniva considerata dagli inventori dell'*RPC* un elemento essenziale per la microstruttura e le prestazioni del materiale al fine di ridurre l'eterogeneità tra la matrice cementizia e l'aggregato. Tuttavia, a causa dell'impiego di sabbia finissima al posto dell'aggregato ordinario, la quantità di cemento dell'*RPC* arriva sino a 900 - 1000 kg/m³. Questo inusuale contenuto di cemento potrebbe incrementare il ritiro da essiccamento e la deformazione viscosa dell'*RPC* rispetto a quello di un calcestruzzo ordinario con un contenuto di cemento generalmente attorno a 300 - 500 kg/m³.

Il principale obiettivo della presente ricerca è stato quello di modificare l'*RPC* introducendo nella miscela degli aggregati grossi e quindi di studiare la loro influenza sulle proprietà del conglomerato in termini di richiesta d'acqua d'impasto, di resistenza meccanica a compressione e a flessione, di ritiro, di assorbimento e di deformazione viscosa.

2. SPERIMENTAZIONE

2.1 Materiali

E' stato utilizzato, come legante cementizio, un cemento portland privo di C₃A con finezza Blaine 340 m²/kg combinato con fumo di silice non addensato di color grigio. I dettagli relativi

alla composizione chimica e alle proprietà di questi materiali sono stati già discussi in precedenti lavori [2,3].

In accordo con la composizione originale fornita da Richard e Cheyrezy [1], per confezionare la miscela di *RPC* è stata utilizzata della sabbia quarzosa macinata fine (0.15 - 0.40 mm) con peso specifico di 2.75 g/cm³. Per la miscela di *RPC* modificato, invece, è stato impiegato un aggregato naturale ben assortito (diametro massimo: 8 mm e peso specifico 2.75 g/m³) in sostituzione di parte o di tutto il volume di sabbia fine e/o di parte del legante cementizio (cemento + fumo di silice). La Fig. 1 mostra la distribuzione granulometrica della sabbia macinata fine, in accordo con l'*RPC* originale, e quella dell'aggregato naturale calcareo utilizzato nella presente ricerca in sostituzione della sabbia fine e/o del legante. Sono state introdotte fibre d'acciaio lunghe 13 mm, con diametro di 0.18 mm e rapporto di aspetto (l/d) pari a 72. Come superfluidificante è stato impiegato un polimero acrilico (AP), in forma di soluzione acquosa al 30%. Le prestazioni di questo additivo, rispetto agli altri superfluidificanti, sono state già discusse in precedenti pubblicazioni [4, 5].

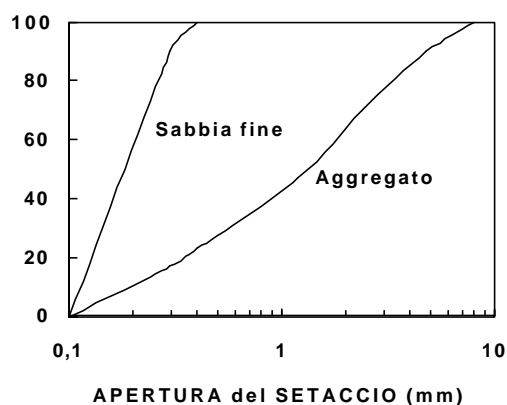


Fig. 1 - Distribuzione granulometrica della sabbia fine usata nell'*RPC* originale e dell'aggregato utilizzato in sua sostituzione.

2.2 Miscela di calcestruzzo

Sono state realizzate tre serie di miscele di calcestruzzo modificate rispetto alla composizione originale dell'*RPC* privo di aggregati grossi: *i*) una serie in cui la quantità di sabbia quarzosa macinata fine (0.15 - 0.40 mm) dell'originale composizione dell'*RPC* è stata parzialmente o totalmente sostituita con l'aggregato naturale assortito (0 - 8 mm) senza modificare il contenuto di cemento (Tab. 1); *ii*) una serie in cui parte del legante cementizio (cemento + fumo di silice) è stato sostituito dall'aggregato assortito (0 - 8 mm) senza modificare il contenuto di sabbia fine (Tab. 2); *iii*) una serie in cui parte del legante cementizio e tutta la sabbia fine sono stati sostituiti dall'aggregato assortito (Tab. 3).

Per ogni miscela di calcestruzzo, è stata introdotta una opportuna quantità di acqua - compresa quella della soluzione acquosa del superfluidificante - al fine di ottenere lo stesso livello di lavorabilità, corrispondente ad una consistenza fluido-plastica: 150 -155 mm in accordo con il test sul tavolo vibrante modificato già descritto in precedenti lavori [2, 3]. Tutti i provini di calcestruzzo sono stati costipati mediante vibrazione.

I provini di calcestruzzo sono stati stagionati in tre differenti condizioni: a) *temperatura ambiente* (sempre a 20°C); b) *maturazione a vapore*: a 90°C per 24 ore dopo una prestagionatura di 20°C per 6 ore e successivamente a 20°C; c) *maturazione a vapore ad alta pressione* (autoclavaggio): a 160°C per 24 ore dopo una prestagionatura a 20°C per 24 ore e successivamente a 20°C.

Miscela N.	1 (RPC Originale)	2 (RPC Modificato)	3 (RPC Modificato)
Cemento portland (<i>c</i>)	934 kg/m ³	933 kg/m ³	937 kg/m ³
Fumo di silice (<i>fs</i>)	234 kg/m ³	234 kg/m ³	235 kg/m ³
Sabbia fine (<i>sf</i>)	1030 kg/m ³	539 kg/m ³	--
Aggregato assortito (<i>ag</i>)	--	489 kg/m ³	1031 kg/m ³
Superfluidificante (secco)	12.7 kg/m ³	12.7 kg/m ³	12.7 kg/m ³
Fibre di acciaio	187 kg/m ³	187 kg/m ³	187 kg/m ³
acqua (<i>a</i>)	215 kg/m ³	205 kg/m ³	200 kg/m ³
<i>a/c</i>	0.23	0.22	0.21
<i>a/(c + fs)</i>	0.18	0.17	0.17
<i>sf/(sf + a)</i>	1.00	0.52	0.00
<i>i*/c</i>	1.10	1.10	1.10
Spandimento (mm)	150	150	155

**i* = aggregato totale = *sf* + *ag*

Tabella 1 - Composizione della miscela di RPC con aggregato assortito (diametro max = 8 mm) in sostituzione della sabbia fine (0.15-0.40 mm).

Miscela N.	4 (RPC Originale)	5 (RPC Modificato)	6 (RPC Modificato)
Cemento portland (<i>c</i>)	934 kg/m ³	843 kg/m ³	754 kg/m ³
Fumo di silice (<i>fs</i>)	234 kg/m ³	211 kg/m ³	189 kg/m ³
Sabbia fine (<i>sf</i>)	1030 kg/m ³	1029 kg/m ³	1035 kg/m ³
Aggregato assortito (<i>ag</i>)	--	109 kg/m ³	217 kg/m ³
Superfluidificante (secco)	12.7 kg/m ³	12.7 kg/m ³	12.8 kg/m ³
Fibre di acciaio	187 kg/m ³	187 kg/m ³	188 kg/m ³
acqua (<i>a</i>)	215 kg/m ³	202 kg/m ³	204 kg/m ³
<i>a/c</i>	0.23	0.24	0.27
<i>a/(c + fs)</i>	0.18	0.19	0.22
<i>sf/(sf + a)</i>	1.00	0.90	0.82
<i>i*/c</i>	1.10	1.47	1.66
Spandimento (mm)	150	150	155

**i* = aggregato totale = *sf* + *ag*

Tabella 2 - Composizione della miscela di RPC con aggregato assortito in sostituzione di parte del legante cementizio (cemento + fumo di silice).

Miscela N.	7 (RPC Modificato)	8 (RPC Modificato)	9 (RPC Modificato)
Cemento portland (<i>c</i>)	847 kg/m ³	758 kg/m ³	665 kg/m ³
Fumo di silice (<i>fs</i>)	212 kg/m ³	190 kg/m ³	166 kg/m ³
Aggregato assortito (<i>ag</i>)	1146 kg/m ³	1259 kg/m ³	1383 kg/m ³
Superfluidificante (secco)	188 kg/m ³	189 kg/m ³	189 kg/m ³
Fibre di acciaio	12.8 kg/m ³	12.9 kg/m ³	12.9 kg/m ³
acqua (<i>a</i>)	195 kg/m ³	192 kg/m ³	193 kg/m ³
<i>a/c</i>	0.23	0.25	0.29
<i>a/(c + fs)</i>	0.18	0.20	0.23
<i>i*/c</i>	1.35	1.66	2.08
Spandimento (mm)	150	150	150

**i* = aggregato totale = *ag*

Tabella 3 - Composizione della miscela di RPC con aggregato assortito in sostituzione di tutta la sabbia fine e di parte del materiale cementizio.

3. RISULTATI

3.1 Resistenza meccanica a compressione

La Fig. 2 mostra la resistenza meccanica a compressione dell'*RPC* "originale" con sola sabbia quarzosa macinata fine (Miscela n° 1 nella Tab. 2) rispetto a quella dell'*RPC* modificato nella quale la sabbia fine è stata sostituita parzialmente o totalmente dall'aggregato assortito con diametro massimo di 8 mm (Miscela n° 2 e 3 rispettivamente). Come si può notare è stato registrato un modesto incremento di resistenza quando la sabbia fine quarzosa (Miscela n°1 in Fig. 2) è stata sostituita con l'aggregato naturale assortito più grosso (Miscela n°2 e 3 in Fig. 2) in seguito alla leggera diminuzione del rapporto *a/c* (Tab. 1). La resistenza a compressione a 28 giorni è stata di circa 160 - 180 MPa per i provini maturati in autoclave a 160°C.

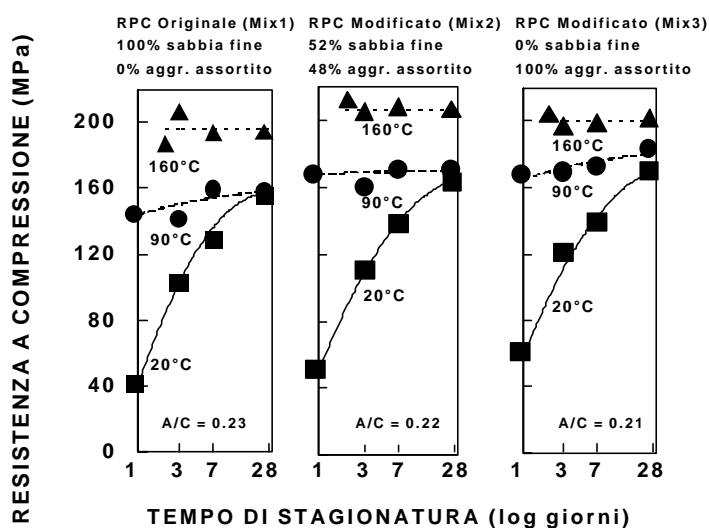


Fig. 2 - Resistenza a compressione in funzione del tempo di maturazione per le Miscele n° 1, 2 e 3 (Tab. 1): influenza della sostituzione di sabbia fine con l'aggregato grosso assortito (0-8 mm).

I risultati della resistenza a compressione della presente ricerca non confermano, quindi, il ruolo benefico giocato dalla sabbia finissima rispetto all'aggregato più grosso, come sostenuto, invece, da Richard e Cheyrezy [1,2].

La Fig. 3 mostra l'influenza sulla resistenza a compressione dell'aggregato grosso assortito sostituito a parte del cemento portland e del fumo di silice: in seguito alla riduzione del materiale cementizio, il valore di *a/c* e di *a/(c+fs)* è cresciuto leggermente utilizzando l'aggregato assortito (Tab. 2) e, conseguentemente, la resistenza a compressione dell'*RPC* modificato (Miscela n° 5 e 6 in Figura 3) è stata leggermente inferiore rispetto a quella dell'*RPC* originale (Miscela n°4 in Fig. 3).

La Fig. 4 mostra la resistenza a compressione delle miscele di *RPC* modificato, tutte senza sabbia macinata finissima e con una quantità ridotta di cemento e di fumo di silice (Miscela n° 7, 8 e 9 della Tab. 3) rispetto a quella dell'*RPC* originale (Miscela n° 1 della Tab. 1). In seguito all'incremento del rapporto acqua-cemento e del rapporto acqua-legante (Tab. 1 e 3), la resistenza a compressione decresce incrementando il rapporto aggregato-cemento da 1.10 (*RPC* originale) a 1.35-2.08 (*RPC* modificato). Tuttavia, la riduzione della resistenza a compressione dei provini autoclavati a 160°C è stata trascurabile rispetto a quella registrata per i provini maturati alle basse temperature (20°C o 90°C).

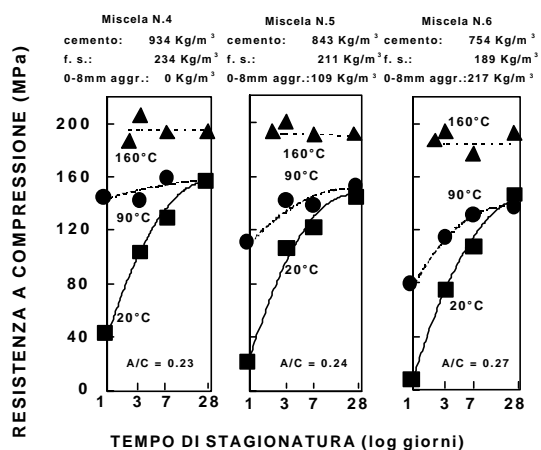


Fig. 3 - Resistenza a compressione in funzione del tempo per le Miscele n° 4, 5 e 6 (Tab. 2): influenza della sostituzione di cemento, fumo di silice e sabbia fine con l'aggregato grosso assortito (0-8 mm).

3.2 Analisi della microstruttura

Al fine di comprendere il ruolo giocato dal processo di maturazione nel determinare le prestazioni del materiale, è stata studiata la microstruttura dell'*RPC* attraverso l'analisi al microscopio ottico a scansione (SEM). Per facilitare l'osservazione della pasta di cemento, sono stati confezionati provini senza fibre di acciaio. La Fig. 5 mostra le tipiche superfici di frattura di un *RPC* maturato a 20°C, maturato a vapore a 90°C o autoclavato a 160°C. Tutti i provini sono stati analizzati dopo 7 giorni dal confezionamento.



Fig. 5 - Scansione al microscopio elettronico di provini stagionati a 7 giorni in assenza di fibre di acciaio. A: stagionatura a 20°C; B: stagionatura a vapore a 90°C; C: stagionatura in autoclave a 160°C.

La microstruttura dei provini autoclavati (Fig. 5C) è molto più densa rispetto a quella dell'*RPC* maturato a vapore a 90°C (Fig. 5B) e questa, a sua volta, appare un po' meno porosa rispetto al materiale maturato a 20°C (Fig. 5A).

3.3 Resistenza meccanica a flessione, curve carico-deflessione e aderenza

La Tab. 4 mostra l'influenza dell'aggregato grosso sulla resistenza meccanica a flessione rispetto all'*RPC* originario (Miscela n°1); quando la sabbia macinata fine è stata sostituita con l'aggregato più grosso (Miscela n°3), si registra una riduzione nella resistenza. Questo effetto è stato particolarmente significativo quando parte del legante cementizio e tutta la sabbia fine sono stati sostituiti dall'aggregato grosso assortito (Miscela n°8).

La resistenza a flessione misurata su travetti di dimensioni maggiori (150x150x600mm), sottoposti ad un doppio carico simmetrico, è stata significativamente più bassa di quella valutata su provini più piccoli (40x40x160mm) sottoposti ad un carico centrale. Questo risultato è in accordo con quelli pubblicati in letteratura [6]. I risultati di resistenza a flessione (25-60 MPa) sull'*RPC* messo a punto da

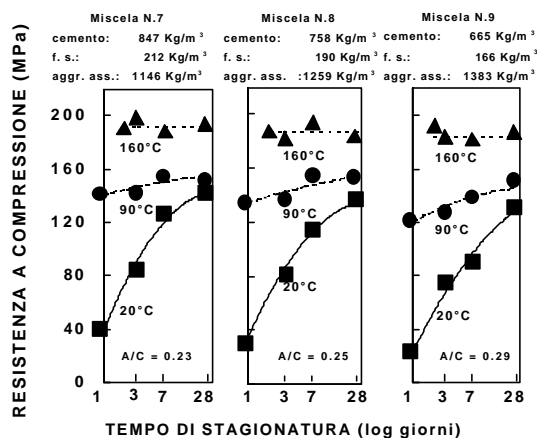


Fig. 4 - Resistenza a compressione in funzione del tempo di stagionatura per le Miscele n° 7, 8 e 9 (Tab. 3): sostituzione del legante cementizio con l'aggregato grosso assortito in assenza di sabbia macinata fine.

Richard e Cheyrezy [1] - ottenuti con una prova sotto carico centrale con provini relativamente piccoli (40-70mm) - sono in buon accordo con quelli della presente ricerca ottenuti su provini di dimensioni simili (40 mm). La sostituzione della sabbia fine dell'*RPC* originale (Miscela n°1) con l'aggregato assortito (Miscela n°3) determina una modesta variazione della curva di carico-deflessione (per brevità qui non riportate). Un'ulteriore diminuzione del materiale cementizio (Miscela n°8) riduce l'area al di sotto della curva carico-deflessione e quindi la tenacità del materiale.

Miscela N.	1			3			8		
Cemento portland (kg/m ³)	930			937			758		
Fumo di silice (kg/m ³)	232			235			190		
Sabbia fina (kg/m ³)	1024			-			-		
Aggregato assortito (kg/m ³)	-			1031			1259		
a/c	0.22			0.21			0.25		
Stagionatura (temperatura max)	20°C	90°C	160°C	20°C	90°C	160°C	20°C	90°C	160°C
Resistenza a flessione (MPa) a:	Prove con due punti di carico su travetti 150x150x600 mm								
- 3 giorni	16.7	23.9	22.5	17.8	16.6	20.6	10.9	18.2	18.4
- 7 giorni	19.6	18.5	19.1	21.9	18.1	19.0	13.8	18.1	18.6
- 28 giorni	20.5	20.2	20.1	20.1	21.0	21.6	16.1	18.0	17.9
Resistenza a flessione (MPa) a:	Prove con carico centrale su provini 40x40x160 mm								
- 3 giorni	39.6	42.4	59.7	30.7	37.4	40.1	30.2	35.6	38.5
- 7 giorni	43.8	43.1	57.7	34.9	38.9	41.1	36.8	36.7	38.6
- 28 giorni	45.7	48.3	60.1	35.5	40.6	40.7	38.7	38.3	39.6
Aderenza all'acciaio (MPa)	28.4			37.9*			32.2*		

* rottura della barra di acciaio sottoposta a trazione

Tabella 4 - Resistenza a flessione e aderenza all'acciaio: influenza della sostituzione del legante cementizio (cemento + fumo di silice) e della sabbia fine con l'aggregato grosso assortito (0-8 mm).

La Tab. 4 mostra che l'aderenza acciaio-calcestruzzo, misurata a 28 giorni su provini maturati a 20°C, è molto più alta nell'*RPC* modificato con gli aggregati grossi che in quello originale. Ciò potrebbe essere ascrivito all'effetto di ingranamento tra gli aggregati grossi e le armature di acciaio, grazie al quale aumenta lo sforzo richiesto per estrarre la barra del calcestruzzo.

3.4 Ritiro igrometrico-rigonfiamento

Le miscele di *RPC* originale e modificato, dopo una stagionatura di 7 giorni, sono state esposte per 30 giorni all'aria con una U.R. del 65% e quindi immerse in acqua (Fig. 6). In contrasto con quanto accade per i calcestruzzi ordinari, non vi è alcun cambiamento significativo nel comportamento di ritiro-rigonfiamento in funzione del rapporto aggregato-cemento degli *RPC* esaminati. Questo può essere attribuito alla microstruttura molto densa della matrice cementizia di questi materiali. Inoltre, sia il ritiro che il rigonfiamento, indipendentemente dalla composizione della miscela, sono risultati più bassi con la stagionatura a vapore e specialmente nei provini autoclavati rispetto a quelli maturati alla temperatura ambiente. Il ritiro dell'*RPC* originale e modificato, stagionati per 7 giorni alla temperatura ambiente, è stato di circa $600 \cdot 10^{-6}$ dopo un mese di esposizione all'aria (65% U.R.). La variazione dimensionale per le miscele autoclavate è stata significativamente più bassa - circa 10 volte minore - di quella del corrispondente materiale maturato alla temperatura ambiente. Questo risultato è in accordo sia con la densificazione microstrutturale prodotta dalla maturazione in autoclave a 160°C (Fig. 5) sia con i dati disponibili in letteratura [6].

D'altra parte, la riduzione del ritiro dell'*RPC* maturato a vapore (90°C) rispetto al corrispondente materiale maturato alla temperatura ambiente è suffragato dall'osservazione SEM riportata nel seguente lavoro (Fig. 5), ma non è confermata da altri dati pubblicati [6]. Inoltre, alcune misure di assorbimento preliminari - non illustrate nel seguente lavoro - indicano che gli *RPC* maturati a vapore a 90°C sono meno porosi dei corrispondenti materiali maturati alla temperatura ambiente. Questa caratteristica potrebbe giustificare le differenze di ritiro e di assorbimento fra l'*RPC* maturato alla temperatura ambiente e quello stagionato a vapore a 90°C.

3.5 Modulo di elasticità e deformazione viscosa

La Fig. 7 mostra la deformazione viscosa sotto una tensione di compressione costante di 13.3 o 53 MPa dell'*RPC* originale (Miscela n°1) e dell'*RPC* modificato con l'aggregato assortito in sostituzione di tutta la sabbia fine (Miscela n°3) o in sostituzione di parte del legante cementizio e di tutta la sabbia fine (Miscela n°8). Tutti i provini sono stati stagionati a vapore a 90°C e sottoposti al carico di compressione a 7 giorni in un ambiente con U.R. del 65%. Al momento dell'applicazione del carico la resistenza a compressione era compresa tra 150 e 160 MPa.

Per tutte e tre le miscele, è stato calcolato un modulo di elasticità di circa 40 GPa, valore più basso di quello registrato da Richard e Cheyrezy (56 - 60 GPa) per un *RPC* con una resistenza a compressione di 200 MPa [1].

La deformazione viscosa dei provini di *RPC* maturati a vapore e sottoposti ad una tensione costante di 13.3 MPa (e quindi con un rapporto tensione-resistenza di circa 0.09) è molto più bassa di quella di un calcestruzzo ordinario con una resistenza a compressione di 30-40 MPa [6]. La deformazione viscosa dei provini di *RPC* sotto la tensione di 53 MPa (e quindi con un rapporto tensione-resistenza di 1/3 al momento del carico) risulta, ovviamente, più alta. Tuttavia, indipendentemente dal rapporto tensione-resistenza e dal rapporto aggregato-cemento dell' *RPC* originale e modificato, la deformazione totale specifica (deformazione viscosa ultima + deformazione elastica) è stata di $35 \cdot 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$, quindi, pari a circa 1/3 della deformazione totale specifica di un calcestruzzo ordinario [6].

4. CONCLUSIONI

La sostituzione della sabbia quarzosa (0.15 - 0.40 mm) con un uguale volume di aggregato grosso naturale ben assortito (diametro massimo: 8 mm) non modifica la resistenza a compressione dell'*RPC* a parità di rapporto acqua-cemento. Questi risultati non sono in accordo con i modelli proposti da Richard e Cheyrezy poiché essi attribuiscono gli elevati valori di resistenza a compressione dell'*RPC* ad una migliore omogeneità della miscela determinata dall'assenza di aggregato grosso.

Quando l'aggregato grosso sostituisce tutta la sabbia fine e parte del legante cementizio (cemento e fumo di silice), a pari lavorabilità, vi è un incremento del rapporto acqua-cemento a causa della riduzione del contenuto di cemento e conseguentemente, una corrispondente diminuzione nella resistenza meccanica a compressione.

La resistenza meccanica a flessione è più bassa quando l'aggregato grosso assortito sostituisce tutta la sabbia finissima. Questo effetto potrebbe essere ascritto ad una migliore omogeneità quando è presente solo la sabbia finissima, e quindi ad un legame più efficace tra matrice cementizia e aggregato sotto gli sforzi di taglio prodotti nella prova a flessione.

In presenza di aggregato grosso l'aderenza acciaio-calcestruzzo aumenta rispetto all'*RPC* originale. Questo effetto può essere ascritto all'ingranamento che si sviluppa tra gli aggregati grossi e le barre di armatura ad aderenza migliorata.

La maturazione a vapore a 90°C, e specialmente quella ad alta pressione a 160°C, garantiscono una migliore prestazione dell'RPC - in termini di maggiore resistenza meccanica, minor ritiro da essiccamento e deformazione viscosa - rispetto alla maturazione a temperatura ambiente. Quest'incremento nelle prestazioni è attribuibile alla microstruttura più densa della matrice cementizia.

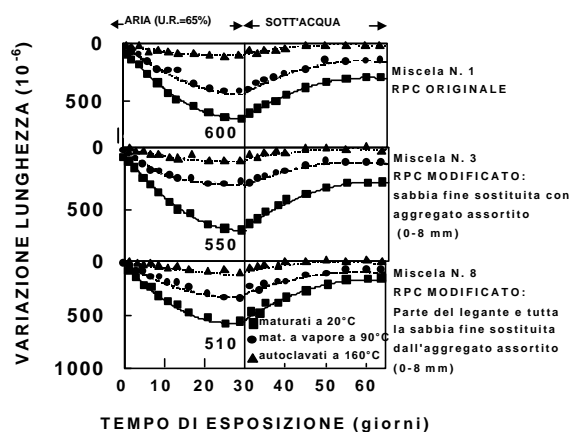


Fig. 6 - Variazione di lunghezza di provini esposti all'aria e quindi immersi in acqua dopo 7 giorni di stagionatura.

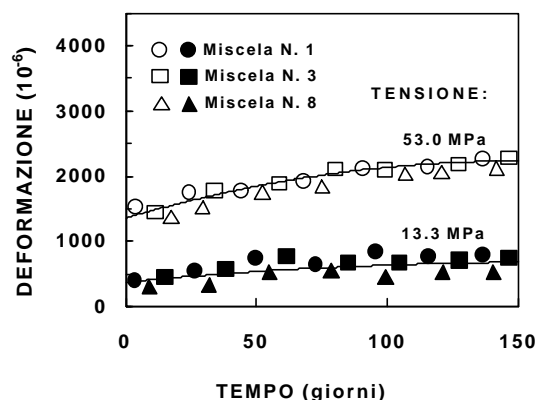


Fig. 7 - Deformazione viscosa di provini in calcestruzzo maturati a vapore a 90°C e sottoposti ad uno sforzo di compressione dopo 7 giorni di stagionatura.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Richard, P. and Cheyrezy, M.H., 1994, "Reactive Powder Concretes with High Ductility and 200-800 MPa Compressive Strength", Concrete Technology: Past, Present, and Future, Proceedings of the V. Mohan Malhotra Symposium, ACI SP-144, San Francisco, Editor: P.K. Mehta, pp. 507-518.
- [2] Coppola, L., Troli, R., Collepardi, S., Borsoi, A., Cerulli, T., and Collepardi, M., 1996, "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", L'Industria Italiana del Cemento, 707, pp. 112-115.
- [3] Coppola, L., Cerulli, T., Troli, R., and Collepardi, M., 1996, "The Influence of Raw Materials on Performance of Reactive Powder Concrete", International Conference on High-Performance Concrete, and Performance and Quality of Concrete Structures, Florianopolis, pp. 502-513.
- [4] Cerulli, T., Collepardi, M., Coppola, L., Ferrari, G., Pistolesi, C., Queck, F. and Zaffaroni, P., 1993, "Zero Slump-Loss Superplasticized Concrete", 18th Conference on Our World in Concrete & Structures, Singapore, pp. 73-79.
- [5] Collepardi, M., 1994, "Superplasticizers and Air Entraining Agents: State of the Art and Future Needs", Concrete Technology: Past, Present, and Future, Proceedings of the V. Mohan Malhotra Symposium, ACI SP-144, San Francisco, Editor: P.K. Mehta, pp. 399-416.
- [6] Neville, A.M., 1995, "Properties of Concrete", Fourth Edition, Editor: Longman Group Limited, Essex, England, p. 844.