

Applicazioni di calcestruzzi innovativi (SCC, HPC, RPC) nell'ingegneria edile, civile ed ambientale

Applications of innovative concretes (SCC, HPC, RPC) in the building, civil and environmental engineering

1. Introduzione

Rispetto ai calcestruzzi tradizionali, i nuovi conglomerati cementizi [1] grazie alla disponibilità di nuove materie prime, consentono di raggiungere prestazioni enormemente maggiori in termini di applicazioni sul cantiere e di vita utile in servizio, oltre che di resistenza meccanica. Queste nuove materie prime includono:

- nuovi polimeri di sintesi (poli-acrilati) che, rispetto ai poli-nafalensolfonati o ai polimeri melamminici, consentono di ridurre ancor più efficacemente l'acqua di impasto e quindi di ridurre il rapporto acqua/cemento con tutti i conseguenti benefici [1];
- agenti viscosizzanti VMA (*Viscosity Modifying Agents*) a base di *Welan Gum* per conferire caratteristiche tixotropiche necessarie a rendere coesivi gli impasti molto fluidi [1];
- fibre polimeriche ed in acciaio per aumentare la duttilità e l'energia di frattura dei calcestruzzi, materiali tipicamente fragili [1];
- aggiunte minerali ad alto tenore di silice amorfa come il fumo di silice (scoria della lavorazione delle leghe ferro-silicee) di dimensione micro-metrica, o della *UFACS* (*Ultra-Fine Amorphous Colloidal Silica*) silice amorfa di sintesi di dimensione nano-metrica [1].

2. Parte sperimentale e discussione

Il termine calcestruzzo autocompattante, SCC in inglese, [2] si riferisce ad un tipo speciale di calcestruzzo, caratterizzato da un'alta resistenza alla segregazione, che può essere gettato senza essere compattato o vibrato. Con l'avvento degli additivi superfluidificanti, calcestruzzi fluidi con livelli di slump fino a 250 mm sono stati prodotti senza alcun problema per il bleeding, purchè si adoperi un adeguato dosaggio di cemento, cioè almeno 350 kg/m³ [2]. Il più importante principio alla base dei calcestruzzi fluidi e privi di segregazione, inclusi gli SCC, è l'uso di superfluidificanti combinato con un contenuto relativamente elevato di materiali fini in termini di cemento Portland, aggiunte minerali, filler macinati e/o sabbia molto fine. Una parziale sostituzione del cemento Portland con cenere volante è apparsa subito come il miglior compromesso in termini di prestazioni reologiche, resistenza alla segregazione, resistenza meccanica, ed assenza di fessure, particolarmente in calcestruzzi massivi esposti alle sollecitazioni indotte dal ritiro termico impedito provocato dal calore di idratazione. Altre aggiunte minerali, alternative alla cenere volante, sono state prese in considerazione per tre lavori illustrati nel seguito dell'articolo: esse sono il fumo di silice ed il calcare finemente macinato. Tuttavia, quando per ragioni architettoniche, si richiedono SCC bianchi, allora solo il calcare macinato può essere impiegato.

Il termine calcestruzzo ad alte prestazioni, HPC in inglese, [3] si riferisce a miscele cementizie con un rapporto acqua-legante molto

1. Introduction

With respect to the traditional concretes, the new cementitious materials [1], thanks to the availability of new raw materials, allow to reach much higher performances in terms of execution on job sites, useful service life, and mechanical strength. These new raw materials include:

- new synthetic polymers (poly-acrylates) which, with respect to naphthalene- or melamine-sulphonated polymers, are able to reduce even more effectively the amount of mixing water and then the water-cement ratio with all the consequent benefits [1];
- Viscosity Modifying Agents (VMA) based on *Welan Gum* to produce thixotropic mixes and then to obtain cohesive fresh concretes even when very fluid [1];
- polymeric metallic fibers to increase the ductility and the fracture energy of concretes which usually are brittle materials [1];
- mineral additions characterized by amorphous silica such as silica fume (waste from silicium-iron alloys) in form of very fine particles (size of some μm) or *UFACS* (*Ultra-Fine Amorphous Colloidal Silica*) synthetically produced in form of particles (size of some nm)

2. Experimental and discussion of results

The term *Self-Compacting Concrete* (SCC) refers to a special type of concrete mixture, characterized by high resistance to segregation, that can be cast without compaction or vibration. With the advent of superplasticizers, flowing concretes with slump level up to 250 mm were manufactured with no or negligible bleeding, provided that an adequate cement factor was used, that is at least 350 kg/m³. The most important basic principle for flowing and unsegregable concretes including SCCs is the use of superplasticizer combined with a relatively high content of powder materials in terms of portland cement, mineral additions, ground filler and/or very fine sand. A partial replacement of Portland cement by fly ash was soon realized to be the best compromise in terms of rheological properties, resistance to segregation, strength level, and crack-freedom, particularly in mass concrete structures exposed to restrained thermal stresses produced by cement heat hydration. Some other mineral additions, alternative to fly ash, have been taken into account for the three works presented in this paper: they are silica fume or ground limestone. However, when for architectural reason, white SCCs are needed, then fly ash and silica fume, both black coloured, cannot be used and only ground limestone is available.

The term *High Performance Concrete* (HPC), refers to cement mixtures with a water-binder ratio as low as 0.30-0.40, so that 28-day compressive strength as high as 70-100 MPa or even 1-day compressive strength as high as 45-55 MPa can be obtained. Due to these mechanical properties, the structural design of the modern reinforced concrete constructions, as well as the executing techniques, can be significantly changed.

Reactive Powder Concrete (RPC) are even stronger than HPC since

basso (per esempio 0,30-0,40), cosicchè la resistenza a compressione a 28 giorni può raggiungere valori di 70-100 MPa o anche la resistenza meccanica a 1 giorno può diventare 45-55 MPa. Per effetto di queste straordinarie proprietà meccaniche, il calcolo strutturale delle moderne costruzioni in c.a., come anche le tecniche esecutive, possono essere stravolte.

In questo articolo vengono illustrati tre specifici conglomerati appartenenti alla categoria di SCC, HPC ed RPC rispettivamente per un calcestruzzo a vista destinato alla Chiesa S. Pietro Apostolo di Pescara, al World Trade Center di S. Marino, e ad un deposito di rifiuti nucleari radioattivi. Per il mix-design dei tre calcestruzzi, si sono eseguite sia prove di laboratorio che prove di campo. Nei paragrafi che seguono sono presentati i risultati ottenuti nei tre specifici settori.

2.1 Conglomerato SCC

I requisiti richiesti dai progettisti dell'opera possono essere così riassunti:

- 1) elevata fluidità in termini di slump flow: ≥ 650 mm dopo 1 ora a 30°C;
- 2) resistenza caratteristica: $R_{ck} \geq 35$ MPa;
- 3) impermeabilità in termini di penetrazione di acqua secondo ISO DIS 7031: ≤ 20 mm;
- 4) effetto "marmorizzato" del facciavista del calcestruzzo messo in opera in assenza di vibrazione.

TABELLA/TABLE 1

Composizione del materiale SCC Composition of SCC

Componente Ingredient	kg/m ³
CEM II/B-L 32.5R bianco White Portland Cement CEM/II B-L 32.5R	400
Chiaia 2-16 Gravel (2-16 mm)	875
Sabbia 0-2 Sand (0-2 mm)	440
Sabbia fine Fine sand	430
Filler calcareo Ground limestone	100
Acqua Water	180
Superfluidificante acrilico Acrylic superplasticizer	9.6
Agente viscosizzante Viscosity modifying agent	0.12
Rapporto a/c W-C ratio	0.45

compressive strength can be as high as 200 MPa. However, due to the presence of metallic fibers embedded in a very dense cement matrix and substantially pore-free for the very low water-binder ratio (about 0.20), RPC is an extra-ordinary cementitious material for its ductility with respect to the brittleness of normal performance concrete (NPC). Moreover, RPCs are particularly adequate for special applications when ultra-durability requirements are needed for safety reasons as for instance, in dump of nuclear wastes.

In this paper three specific concretes are shown belonging to the SCC, HPC and RPC types: for an architectural concrete of the church of S. Peter Apostle in Pescara, the World Trade Center of San Marino, a dumping placement of radioactive nuclear wastes, respectively. For the mix-design of the three concretes, laboratory and field tests have been carried out. In the following sections the results for each of the three concretes are shown and discussed.

2.1 SCC material

The properties required by the structural engineers of the construction may be summarized by the following data:

- 1) high fluidity in terms of slump flow: ≥ 650 mm after 1 hr at 30°C;
- 2) characteristic strength: $R_{ck} \geq 35$ MPa;
- 3) impermeability in terms of water penetration according to the ISO DIS 7031 test: ≤ 20 mm;
- 4) marble-like effect of the skin of the concrete placed in the absence of vibration.

In order to reach all these requirements, the composition adopted for the concrete mixture was that shown in Table 1.

TABELLA/TABLE 2

Prestazioni ottenute sull'SCC Performances of SCC

Massa volumica a fresco Specific Mass (fresh mix) (kg/m ³)	2417	
Aspetto del calcestruzzo Concrete Aspect	Coesivo/Cohesive	
Slump Flow (mm) nel tempo a 30°C dopo: Slump Flow (mm) at 30°C after:	0 min.	700
	30 min.	680
	60 min.	650
Resistenza meccanica a compressione (MPa) a 20°C in funzione del tempo (giorni) Compressive Strength (MPa) at 20°C as a function of time (days)	1	17.2
	7	35.3
	14	39.4
	28	43.0
Penetrazione d'acqua Water penetration (ISO-DIS 7031)	6 mm	

Per soddisfare tutti questi requisiti è stata adottata la composizione riportata in Tabella 1.

Le prestazioni realmente ottenute sono mostrate nella Tabella 2 e sono tutte in grado di soddisfare i primi tre requisiti prestazionali richiesti dai progettisti dell'opera.

Sono stati inoltre valutati gli effetti sul faccia vista – di notevole importanza per l'opera di particolare valore architettonico – impiegando un calcestruzzo bianco tradizionale a consistenza superfluida S5 ed un corrispondente SCC entrambi messi in opera senza vibrazione. La Fig. 1 illustra esemplificativamente l'effetto "marmorizzato" ottenuto con l'SCC in confronto ad un calcestruzzo tradizionale a consistenza superfluida entrambi messi in opera in assenza di vibrazione. Grazie alle particolari caratteristiche reologiche dell'SCC allo stato fresco, è quindi possibile soddisfare anche il quarto requisito richiesto dai progettisti.

2.2 Conglomerato HPC

Per il World Trade Center di S. Marino è stato richiesto un calcestruzzo che, accanto a quelle tipiche di un SCC illustrato nel precedente paragrafo, presentasse un'elevata resistenza meccanica a compressione. Questi sono i requisiti richiesti per l'opera:

- 1) elevata fluidità in termini di *slump flow*: ≥ 600 mm dopo 1 ora;
- 2) resistenza meccanica: ≥ 65 MPa a 21 giorni e ≥ 80 MPa a 28 gg.;
- 3) modulo elastico: ≥ 40.000 MPa;
- 4) ritiro igrometrico: ≤ 500 $\mu\text{m/m}$ a due mesi dal getto;
- 5) uniformità in termini di massa volumica, modulo elastico e resistenza meccanica da valutare su "carote" estratte da un getto di campo.

La Tabella 3 mostra la composizione adottata e le prestazioni ottenute. Queste sono tutte in linea ai primi quattro requisiti richiesti.

Su una "carota" estratta da un getto di calcestruzzo spesso 1500 mm e messo in opera senza vibrazione sono state misurate la massa volumica M_v ed il modulo elastico dinamico (E_d), determinato con la misura della velocità delle onde ultrasoniche (Fig. 2), oltre che la resistenza meccanica (Fig. 3).

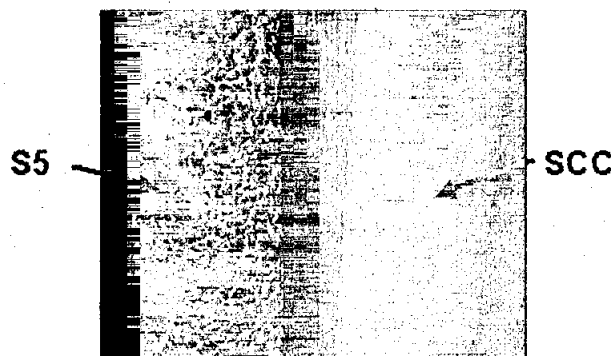
I valori ottenuti su vari spezzoni della carota hanno indicato la eccellente riproducibilità dei risultati ottenuti sul calcestruzzo della struttura, in accordo con quelli determinati in laboratorio sui provini del materiale. Quindi, anche il quinto requisito (sulla uniformità) è soddisfatto.

2.3 Conglomerato RPC

Il conglomerato, studiato per una ricerca destinata ad individuare un

The performances really obtained are shown in Table 2 and they are all capable to meet the above first three performances required by the structural designer.

As far as the marble-like effect of the skin is concerned – which was very important for the work from an architectural point of view – it was visually assessed by comparison of two white concretes, both placed without any vibration: the former at a fluid consistency S5, and the later in form of SCC. Figure 1 shows, for instance, the marble-like effect of the skin obtained only in the case of the SCC. Then, thanks to the special rheological properties of the SCC in the fresh state, even the fourth requirement needed by the architect was met.



• Fig. 1 - Facciavista "marmorizzato" per l'SCC in confronto a quello del calcestruzzo tradizionale con classe di consistenza S5 (entrambi non compattati).
• Fig. 1 - Skin effect marble-like of SCC with respect to a traditional concrete at a superfluid consistency (S5), both placed without compaction.

2.2 HPC material

For the World Trade Center in San Marino, a special concrete was required with the typical properties of SCC as shown in the previous section and, additionally, with a high compressive strength. These are the requirements needed for the work:

- 1) high fluidity in terms of slump flow: ≥ 600 mm after 1 hr;
- 2) compressive strength ≥ 65 MPa at 21 days and ≥ 80 MPa at 28 days;
- 3) dynamic elastic modulus: ≥ 40.000 MPa;
- 4) drying shrinkage: ≤ 500 $\mu\text{m/m}$ at two months;
- 5) uniformity in terms of specific mass, elastic modulus, and compressive strength measured on cored specimens through field tests.

Table 3 shows both the adopted composition and the performances of the concrete. These agree with the first four requirements.

One cylinder specimen was cored from the un-vibrated concrete placement 1500 mm thick, and then the following measurements were

TABELLA/TABLE 3

Composizione dell'HPC
Composition of HPC

Cemento CEM I 42.5 R	
Portland Cement (CEM I 42.5 R)	465 kg/m ³
Fumo di silice	
Silica fume	65 kg/m ³
Acqua	
Water	175 kg/m ³
Ghiaia 15-22	
Gravel (15-22 mm)	195 kg/m ³
Ghiaia 6-15	
Gravel (6-15 mm)	720 kg/m ³
Sabbia 0-6	
Sand (0-6 mm)	710 kg/m ³
Superfluidificante acrilico	
Acrylic superplasticizer	4.6 kg/m ³
acqua/(cemento+fumo di silice)	
water/(cement+silica fume)	0.33 kg/m ³
Slump flow da 5 a 60 min.	
Slump flow at 5 and 60 min.	73-60 mm
R _{cm} (MPa) a:	1g/d
	50
R _{cm} (MPa) at:	28gg/d
	95
Ritiro igrometrico a 60gg	
Drying shrinkage at 60 days	380 µm/m
Modulo elastico dinamico a 28 gg	
Dynamic elastic modulus at 28 days	≥ 45.000 MPa

materiale ultradurabile per ospitare affidabilmente le scorie radioattive di impianti nucleari dismessi, prevedeva i seguenti requisiti prestazionali particolarmente impegnativi soprattutto in termini di resistenza meccanica e duttilità:

carried out: specific mass (M_v) and dynamic elastic modulus (E_d) shown in Fig. 2, and compressive strength shown in Fig. 3. The data obtained on different parts of the cored material indicated that the results obtained for the concrete of the structure are reproducible and agree very well with those obtained for the specimens cast in laboratory. Then, even the fifth requirement (about uniformity) is met.

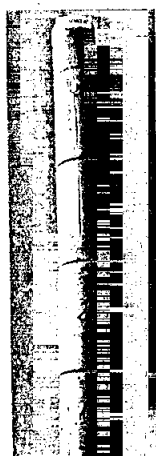
2.3 RPC material

This material was studied for a research devoted to obtain a very durable concrete structure as reliable container for radioactive wastes from disused nuclear plants. These are the properties required particularly challenging mainly for strength and ductility:

- 1) compressive strength (R_c): ≥ 200 MPa;
- 2) flexural strength (R_f): ≥ 50 MPa;
- 3) compressive elastic modulus: ≥ 60 GPa;
- 4) fracture energy determined by the stress-strain curve: ≥ 40 kJ/m²;
- 5) long terms durability of the concrete structure in contact with a sulphatic soil.

The adopted composition to reach all these objectives is shown in Table 4. A low-C_sA Portland cement was adopted because it is by itself sulphate-resistant. This cement, combined with a very low water (cement+silica fume) ratio of 0.20 is capable of meeting the required durability.

The obtained mechanical data can be summarized in terms of 205 MPa for the compressive strength, 60 MPa for the flexural strength, 65 GPa for the static elastic modulus, and 45 kJ/m² for the fracture energy. These data fully meet all the required performances.

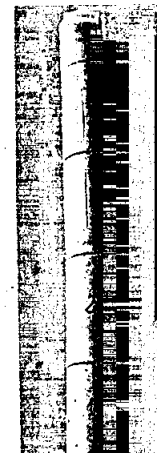
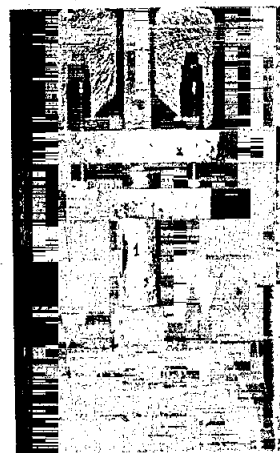


$M_v=2383 \text{ kg/m}^3$
 $E_d=43619 \text{ MPa}$

$M_v=2382 \text{ kg/m}^3$
 $E_d=43755 \text{ MPa}$

$M_v=2385 \text{ kg/m}^3$
 $E_d=44570 \text{ MPa}$

$M_v=2381 \text{ kg/m}^3$
 $E_d=43887 \text{ MPa}$



$R_{cil 21gg}=80 \text{ MPa}$

$R_{cil 21gg}=76 \text{ MPa}$

$R_{cil 21gg}=83 \text{ MPa}$

$R_{cil 21gg}=78 \text{ MPa}$

• Fig. 2 - Misura di massa volumica (M_v) e di modulo elastico dinamico (E_d) su spezzoni di carota estratta dalla struttura.
• Fig. 2 - Specific mass (M_v) and dynamic elastic modulus (E_d) on cored concrete.

• Fig. 3 - Misura di resistenza meccanica a compressione su cilindri ($R_{cil 21gg}$) ricavati da spezzoni di carota estratta dalla struttura.
• Fig. 3 - Compressive strength on cylinder specimens ($R_{cil 21gg}$) from cored concrete.

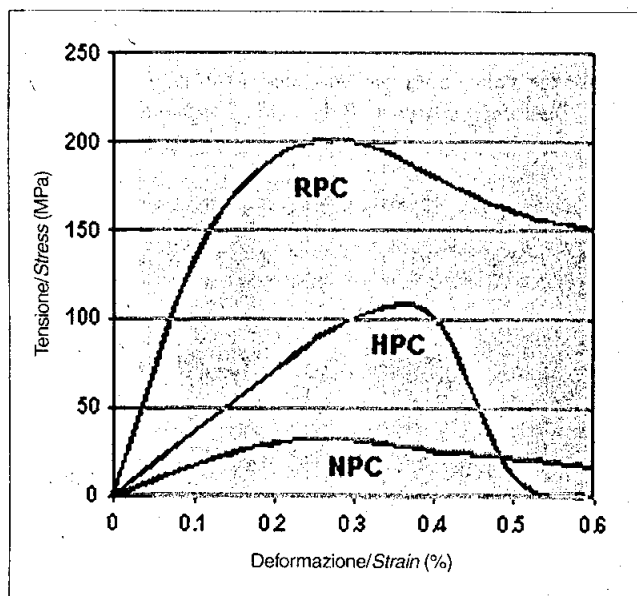
- 1) resistenza meccanica a compressione (R_c): ≥ 200 MPa;
- 2) resistenza meccanica a flessione (R_f): ≥ 50 MPa;
- 3) modulo elastico statico a compressione (E_s): ≥ 60 GPa;
- 4) energia di frattura determinata dalla curva $\sigma-\epsilon$: ≥ 40 kJ/m²;
- 5) durabilità a lungo termine della struttura a contatto di terreno solfatico.

La composizione adottata per il raggiungimento di questi obiettivi è mostrata in Tabella 4. Il cemento di tipo ferrico, a basso tenore di C_3A , è stato prescelto per la sua intrinseca resistenza all'attacco dei solfati dell'ambiente. Questo cemento unitamente al bassissimo rapporto acqua/(cemento+fumo di silice) di 0,20 è in grado di soddisfare il requisito della durabilità.

I requisiti meccanici ottenuti sono così riassumibili: $R_c = 205$ MPa; $R_f = 60$ MPa; $E_s = 65$ GPa; energia di frattura: 45 kJ/m² tutti in linea con i requisiti richiesti.

La Fig. 4 mostra il comportamento deformatore sotto tensione di compressione dell'RPC studiato, in confronto ad un calcestruzzo con prestazioni normali (NPC), con un conglomerato HPC tipo quello esaminato nel precedente paragrafo.

La maggiore duttilità dell'RPC rispetto all'HPC e all'NPC è dovuta principalmente alla presenza di fibre in acciaio con rapporto d'aspetto (Lunghezza/diametro = L/d) molto elevato (72) disperse in una matrice cementizia con microstruttura priva sostanzialmente di microporosità capillare (Fig. 5).



• Fig. 4 - Comportamento tensione-deformazione di un calcestruzzo normale (NPC), ad alte prestazioni (HPC) e RPC.

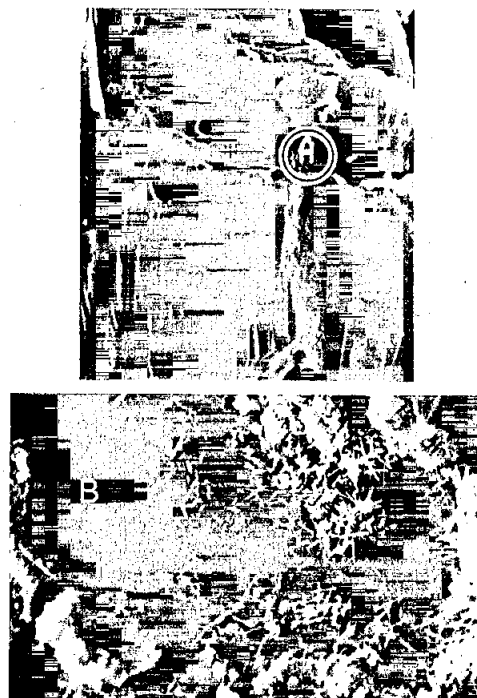
• Fig. 4 - Stress-strain behaviour of RPC with respect to normal (NPC) and high performance concrete (HPC).

TABELLA/TABLE 4

Composizione dell'RPC
Composition of RPC

Cemento (CEM I 42.5R) ferrico Cement ferric type (CEM I 42.5R)	830 kg/m ³
Fumo di silice Silica fume	220 kg/m ³
Sabbia 0-0.6mm Sand (0-0.6 mm)	970 kg/m ³
Fibre acciaio (L/d = 72) Steel Fibers (L/d=72)	130 kg/m ³
Acqua Water	220 kg/m ³
Superfluidificante acrilico (polvere) Dry acrylic superplasticizer (powder)	12 kg/m ³
acqua/(cemento+fumo di silice) water/(cement+silica fume)	0.20

Figure 4 shows the strain-stress curve of the adopted RPC in comparison with those of a normal performance concrete (NPC) and of the high performance concrete (HPC) studied in the previous section. The greater ductility of the RPC with respect to that of HPC and NPC is mainly due to the presence of steel fibers with an aspect ratio (length/diameter= L/d in Table 4) of 72 embedded in a cement matrix substantially pore-free (Fig. 5).



• Fig. 5 - Microstruttura rilevata con il SEM di matrice cementizia porosa tradizionale (B) confrontata con quella compatta di RPC (A) [7].

• Fig. 5 - SEM microstructure of a traditional and porous cement matrix (B) and a very dense cement paste of RPC (A) [7].



3. Conclusioni

I risultati ottenuti in questo articolo mostrano le straordinarie prestazioni conseguibili con i calcestruzzi innovativi sviluppati in questi recenti anni.

In particolare l'SCC, per la facilità di messa in opera indipendentemente dalla qualità della manodopera oggi disponibile in cantiere, si sta affermando in diverse applicazioni pratiche. L'SCC qui presentato rappresenta un caso particolare per la richiesta di una superficie molto pregiata dal punto di vista estetico (bianca e liscia come il marmo).

Il calcestruzzo HPC e soprattutto quello RPC rappresentano, invece, dei materiali da costruzione di "nicchia" per il settore dell'ingegneria civile, mentre potrebbero avere – soprattutto l'RPC – interessanti applicazioni come materiale per l'ingegneria meccanica, chimica e dell'ambiente.

L'RPC studiato in questo lavoro è appunto destinato al settore dell'ingegneria ambientale per la protezione delle scorie radioattive provenienti da impianti nucleari dismessi e da allocare in siti sicuri ed affidabili, ancorchè potenzialmente aggressivi per l'elevato tenore in solfato.

3. Conclusions

The results obtained in the present paper show the extra-ordinary properties which can be obtained by using the innovative concretes recently developed.

In particular, SCC appears to be very successful because it is easy to place the concrete in a safe way independently of the quality and reliability of the workmanship today available on the jobsites. The SCC presented in this paper is a very special concrete even for the excellent surface (white and with marble-like aspect) required for architectural reasons.

On the other hand, the HPC and specially the RPC can be considered as market niches in the field of Civil Engineering. Moreover the RPC could find interesting applications in the field of Mechanical, Chemical and Environmental Engineering; that studied in the present work is devoted to the area of environmental engineering in order to produce a container for radioactive wastes, coming from disused nuclear plants, which should be placed in safe and reliable concrete structures even if in contact with potentially aggressive soils for their high sulphate content.

Bibliografia/References

- [1] M. COLLEPARDI, *Il Nuovo Calcestruzzo*, Edizioni Tintoretto II Ed., pp. 1-354, 2000.
- [2] M. COLLEPARDI, *A Very Close Precursor of Self-Compacting Concrete (SCC)*, Symposium on Sustainable Development and Concrete Technology, S. Francisco (USA), pp. 431-450, Suppl. Vol., 2001.

- [3] S. COLLEPARDI, L. COPPOLA, R. TROLI, M. COLLEPARDI, *Mechanism of Actions of Different Superplasticizers for High-Performance Concrete*, Proceedings of the Second CANMET/ACI Conference on "High-Performance Concrete. Performance and Quality of Concrete Structures", Gramato (Brazil), pp. 503-523, 1999.
- [4] S. COLLEPARDI, L. COPPOLA, R. TROLI, M. COLLEPARDI, *Mechanical Properties of Modified Reactive Powder Concrete*,

Proceedings of the Fifth Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, ACI Publication SP-173, Rome (Italy), pp. 1-21, 1997.

- [5] S. COLLEPARDI, L. COPPOLA, R. TROLI, P. ZAFFARONI, M. COLLEPARDI, *Influenza del tipo di superfluidificante sulla resistenza a compressione delle malte a polvere reattiva*, Atti del IV Congresso AIMAT, Cagliari, pp. 454-463, 1998.
- [6] S. MONOSI, G. PIGNOLONI, S. COLLEPARDI, R. TROLI, M. COLLEPARDI, *Modified Reactive Powder Concrete with Artificial Aggregate*, Proceedings of the Sixth CANMET/ACI Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures, Nice (France), pp. 447-459, 2000.
- [7] S. COLLEPARDI, *Calcestruzzi fibro-rinforzati a polvere reattiva con caratterizzazioni chimico-fisiche e strutturali*, Tesi di Laurea, Relatori: Prof. Dina Festa e Prof. Antonio Bernardini, Università di Padova, 1996.