



Prof. Mario Collepari - Ancona
Calcestruzzi ad altissima resistenza: HPC, DSP e RPC

CALCESTRUZZI AD ALTISSIMA RESISTENZA: HPC, DSP ED RPC

Mario Collepari

Enco. Engineering Concrete, Spresiano (TV)

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*). Inoltre, con i materiali *RPC* viene radicalmente modificato il comportamento da fragile a duttile del calcestruzzo: l'energia di frattura aumenta da qualche centinaio a qualche decina di migliaia di J/m² passando da un normale calcestruzzo ad un materiale *RPC*.

Questi calcestruzzi sono stati sviluppati negli anni '80 (*HPC*) e '90 (*RPC*), ma le premesse tecniche e tecnologiche risalgono ad alcuni decenni precedenti. Le principali "pietre miliari", che hanno creato le premesse per i calcestruzzi *HPC* ed *RPC*, sono:

- **anni '50, teoria di Powers:** se si riduce il rapporto acqua/cemento, diminuisce la porosità capillare ed aumenta la resistenza meccanica a compressione, teoricamente fino ad un massimo di 250 N/mm² se si potesse annullare la porosità;
- **anni '70, invenzione degli additivi superfluidificanti:** è possibile ridurre efficacemente il rapporto acqua/cemento (senza penalizzare la lavorabilità) per arrivare con facilità a resistenze meccaniche a compressione di 60-80 N/mm²;
- **anni '80, utilizzazione del fumo di silice:** è possibile ridurre ulteriormente la porosità della matrice cementizia e della zona di transizione tra matrice ed aggregati lapidei per arrivare a resistenze meccaniche a compressione di 100-150 N/mm².

Nei paragrafi che seguono vengono discussi brevemente i contributi di questi tre eventi fondamentali per lo sviluppo dei calcestruzzi HPC ed RPC.

LA TEORIA (UTOPIA) DI POWERS

Per quanto all'epoca di Powers si fosse ben lontani dal raggiungere resistenze meccaniche dell'ordine dei 250 N/mm², Powers predisse che in futuro si sarebbe potuto raggiungere questo obiettivo semmai fosse stato possibile annullare la tipica porosità presente nella microstruttura di una pasta cementizia (Fig. 1).

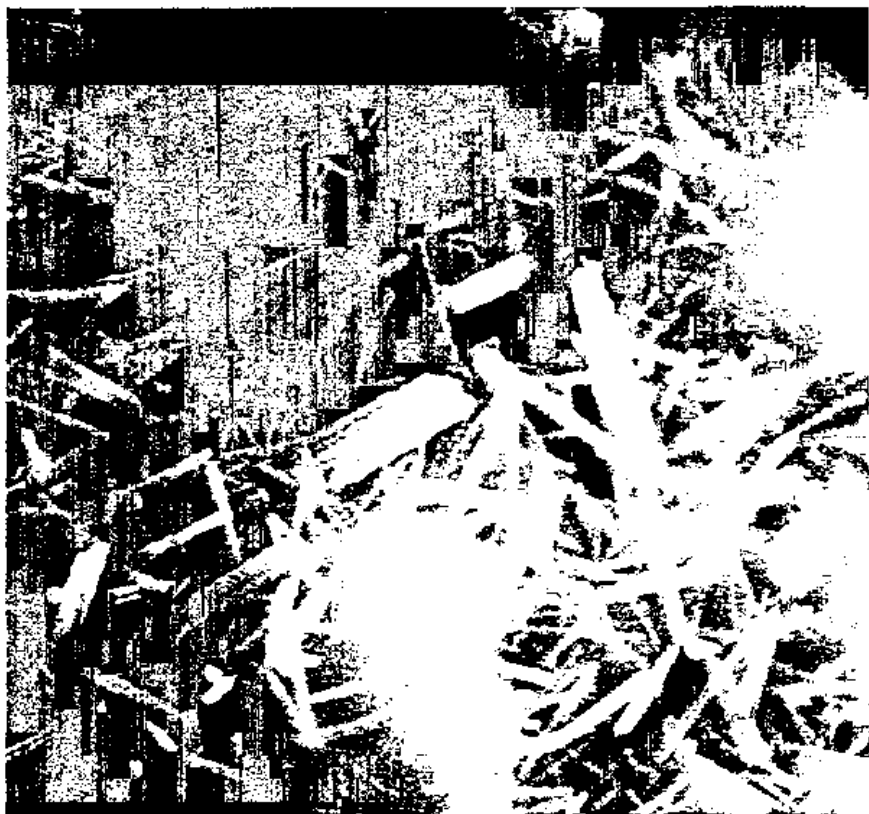


Figura 1 - Micrografia al microscopio elettronico di una normale pasta cementizia.

Powers elaborò un modello fisico (1) per quantificare l'influenza dei vuoti (pori capillari) sulla resistenza meccanica a compressione di una pasta di cemento priva di aggregati lapidei. Il suo modello può essere così sintetizzato:

$$R_c = k [V_s / (V_s + V_p)]^3 = kx^3 \quad [1]$$

dove R_c è la resistenza meccanica a compressione, V_s è il volume solido del cemento idratato, V_p è il volume dei pori capillari dispersi nella matrice cementizia, k è una costante che vale 250 se R_c è espresso in N/mm², ed x è il rapporto tra il volume occupato dai prodotti solidi (V_s) e quello totale ($V_s + V_p$) dei solidi e dei vuoti.

Se la porosità fosse annullata ($V_p = 0$ oppure $x = 1$) R_c coinciderebbe con k ed arriverebbe al valore di 250 N/mm². All'epoca di Powers, un valore così elevato per R_c appariva soltanto un'utopia di riferimento cui si poteva tendere, senza poter mai arrivarvi realmente, avvicinandosi alla situazione di porosità nulla.

Una forma diversa, ma equivalente all'equazione [1], fu elaborata da Powers per evidenziare l'influenza del rapporto acqua/cemento (a/c) e del grado di idratazione (α) - cioè della stagionatura - sulla resistenza meccanica:

$$R_c = k [0.6790 \alpha / (0.3175 \alpha + a/c)]^3 \quad [2]$$

Diagrammando la R_c in funzione del rapporto a/c , a parità di grado di idratazione α (Fig. 2), si evidenzia come R_c potrebbe arrivare a valori molto prossimi a 250 N/mm² purchè si adotti un rapporto a/c molto basso, e comunque inferiore a 0.36, e si assicuri un elevato grado di idratazione del cemento. Per esempio, si potrebbe arrivare ad una R_c di 250 N/mm² con un rapporto a/c di 0.36 se si assicura la completa idratazione del cemento ($\alpha = 1$), oppure con un rapporto a/c di 0.27 se si idratano i tre quarti del cemento ($\alpha = 0.75$), oppure anche con un rapporto a/c di 0.18 se si idratasse almeno la metà del cemento ($\alpha = 0.5$).

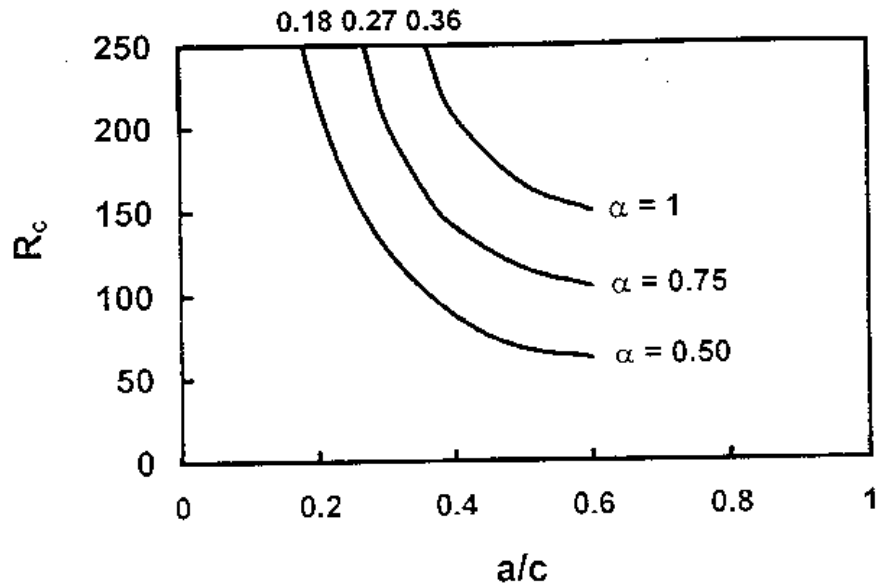


Figura 2 - Influenza del rapporto a/c sulla resistenza meccanica a compressione (R_c) secondo Powers.

In realtà, la teoria sviluppata rimase un'utopia - per quanto attiene la massima resistenza meccanica del calcestruzzo - per effetto di due ostacoli insormontabili all'epoca di Powers:

- era impossibile confezionare calcestruzzi con rapporti a/c così bassi ($< 0,36$) per la scarsa lavorabilità del conglomerato e la conseguente difficoltà nel getto e nella compattazione;

- era impossibile evitare la raccolta d'acqua nell'interfaccia corrispondente al giunto adesivo tra matrice ed aggregato lapideo (Fig. 3); non va dimenticato che la teoria di Powers era stata elaborata per una pura pasta di cemento e che l'introduzione degli aggregati comportava la nascita di una zona interstiziale (2) più porosa e quindi più debole (Fig. 3).

Per quanto utopico apparisse il raggiungimento di una resistenza meccanica di 250 N/mm^2 , la teoria di Powers, ebbe il merito di tracciare le linee di ricerca per il progressivo avvicinamento a questo obiettivo. Nei paragrafi che seguono vengono appunto illustrati i risultati di queste ricerche conseguiti alcuni decenni dopo la teoria di Powers.

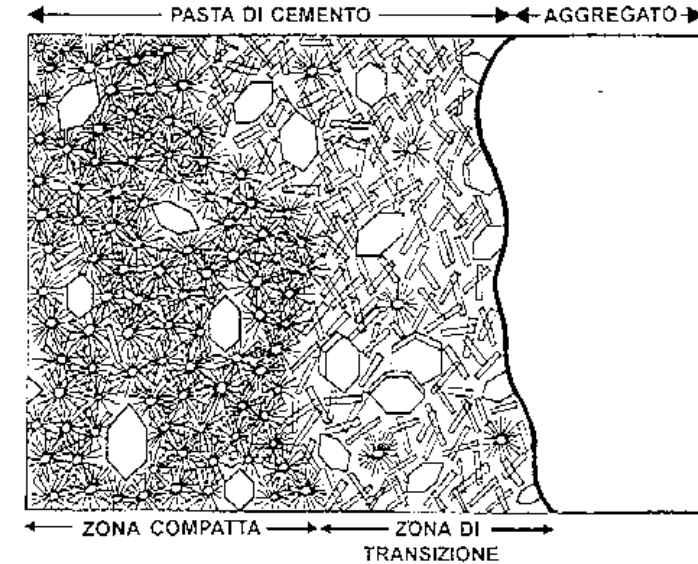


Figura 3 - Rappresentazione schematica di un calcestruzzo nella zona di transizione tra aggregato lapideo e matrice cementizia (2).

GLI ADDITIVI SUPERFLUIDIFICANTI

Gli additivi superfluidificanti furono inventati all'inizio degli anni '70 ma i loro precursori - gli additivi fluidificanti - risalgono a molti anni prima (3). La differenza tra le due categorie di additivo è più quantitativa che qualitativa. Entrambi modificano la reologia del calcestruzzo fresco rendendolo più lavorabile, ma i superfluidificanti sono molto più efficaci (4). Con l'avvento di questi additivi diventa praticabile l'adozione di rapporti a/c molto bassi senza dover rinunciare alla lavorabilità del conglomerato, e diventa quindi meno utopica la teoria di Powers nell'avvicinamento alla massima resistenza meccanica.

Gli additivi superfluidificanti sono costituiti da polimeri idrosolubili capaci di essere adsorbiti sulla superficie dei granuli di cemento. Questi ultimi, in assenza di additivo superfluidificante, tendono ad agglomerarsi in grossi flocculi per la presenza di cariche elettrostatiche (Fig. 4A).

In presenza di additivo superfluidificante (Fig. 4B) i granuli di cemento sono dispersi per la presenza di additivo sulla superficie del cemento. La

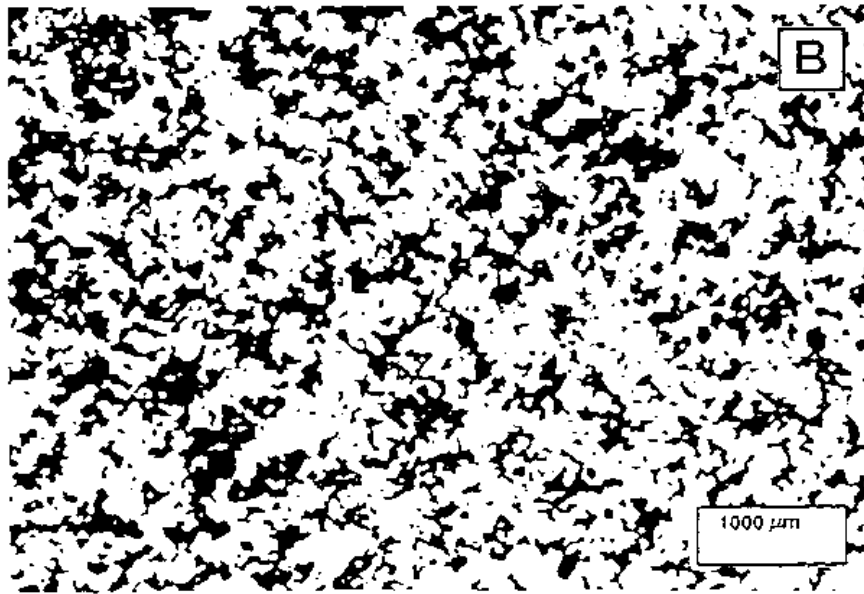
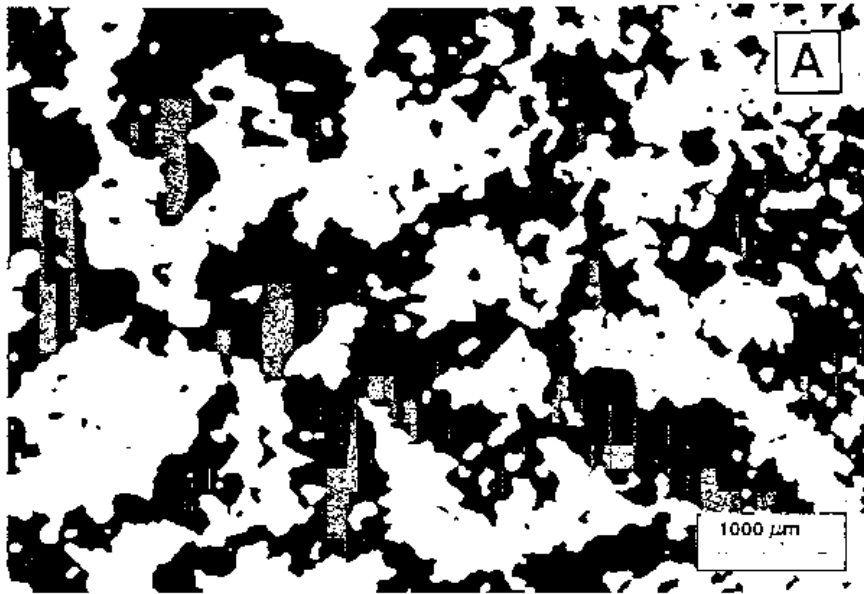


Figura 4 - Osservazione al microscopio ottico di una pasta di cemento flocculata (A) e dispersa (B) per la presenza di additivo superfluidificante.

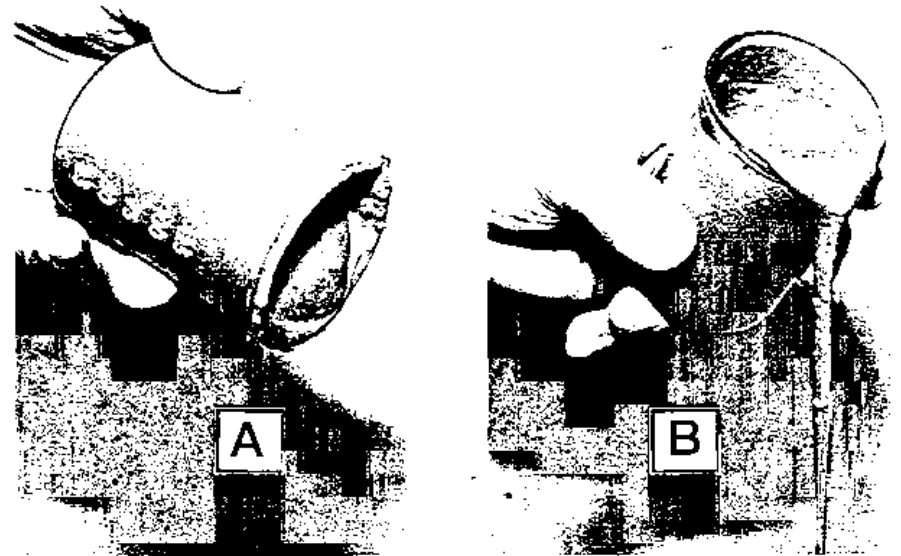


Figura 5 - Pasta di cemento con rapporto $a/c = 0.35$ in assenza (A) ed in presenza (B) di additivo superfluidificante.

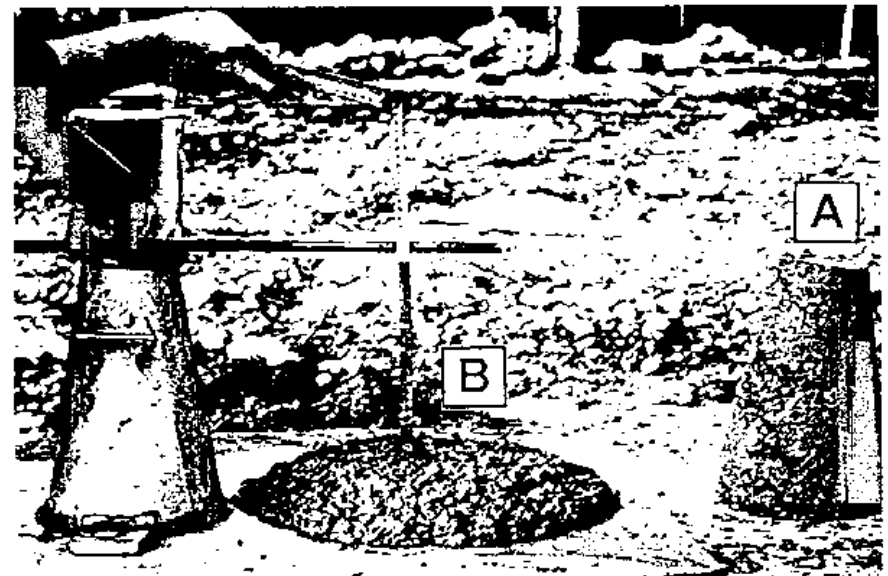


Figura 6 - Calcestruzzo con rapporto $a/c = 0.35$ in assenza (A) e in presenza (B) di additivo superfluidificante.

mancata flocculazione del cemento rende il sistema più fluido.

La trasformazione di un sistema flocculato (Fig. 4A) in uno disperso (Fig. 4B) provoca un aumento significativo nella fluidità della pasta cementizia (Fig. 5). Conseguentemente, il calcestruzzo con additivo superfluidificante diventa molto più lavorabile ancorchè confezionato con basso rapporto a/c (Fig. 6)

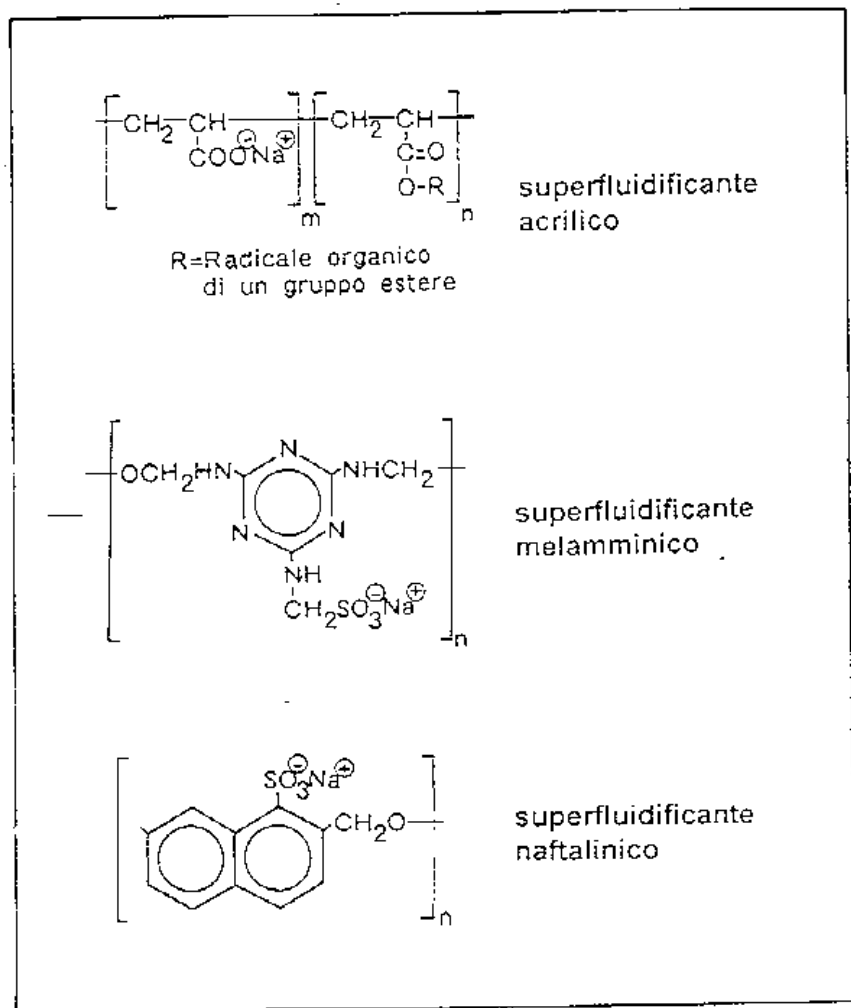


Figura 7 - Composizione chimica dei più importanti superfluidificanti.

In sostanza, con l'avvento degli additivi superfluidificanti diventa possibile praticare l'adozione dei rapporti a/c così bassi (0.35-0.45) da poter facilmente raggiungere resistenze meccaniche comprese nell'intervallo di 60-80 N/mm², cioè nella zona medio-bassa dei calcestruzzi HPC.

Nel settore degli additivi superfluidificanti sono stati compiuti progressi considerevoli e nuovi polimeri acrilici (5-7) sono stati inventati accanto a quelli ormai "tradizionali" - a base di naftalina o melammina - messi a punto agli inizi degli anni '70 (Fig. 7).

L'efficacia degli additivi superfluidificanti - in termini di riduzione d'acqua e quindi di incremento della resistenza meccanica - aumenta con il loro dosaggio (Fig. 8). Tuttavia, oltre un certo limite (2-3% sul cemento) non si registrano ulteriori benefici nella riduzione del rapporto a/c e si comincia ad avvertire una lieve caduta nella resistenza meccanica provocata dalla raccolta d'acqua (*bleeding*) nella zona di transizione tra la matrice cementizia e gli aggregati lapidei (Fig. 9).

L'inconveniente sopra lamentato limita la massima resistenza meccanica ottenibile con i superfluidificanti a valori dell'ordine di 80-90 MPa. Un superamento di questo limite diventò possibile con l'avvento di una particolare aggiunta minerale del quale si tratterà nel paragrafo che segue.

L'AVVENTO DEL FUMO DI SILICE: IL CALCESTRUZZO DSP

Il fumo di silice è un sottoprodotto dell'industria del silicio e delle leghe metalliche ferro-silicio. Questo materiale ha conosciuto un successo strepitoso nel settore delle malte e del calcestruzzo solo dopo l'invenzione dei superfluidificanti negli anni '70. Prima di allora il fumo di silice - che pure era già disponibile - non trovò che sporadiche applicazioni nel settore del calcestruzzo senza apprezzabili vantaggi prestazionali.

Per comprendere le straordinarie prestazioni conseguibili con il binomio superfluidificante-fumo di silice è necessario tener presente che quest'ultimo si presenta in forma di sferette con dimensioni comprese tra 0.01 e 1 µm (Fig. 10), cioè 50-100 volte più piccole di quelle del cemento.

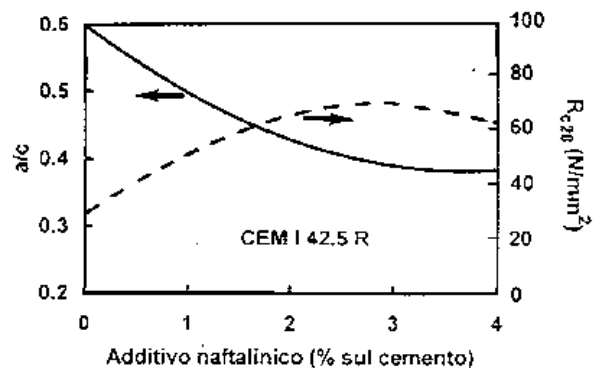


Figura 8 - Influenza del dosaggio di superfluidificante sul rapporto a/c e sulla resistenza meccanica a compressione (R_{c28}) a 28 giorni a pari slump (18 cm) e pari dosaggio di cemento (380 kg/m^3) di calcestruzzi confezionati con cemento CEM I 42.5 R.

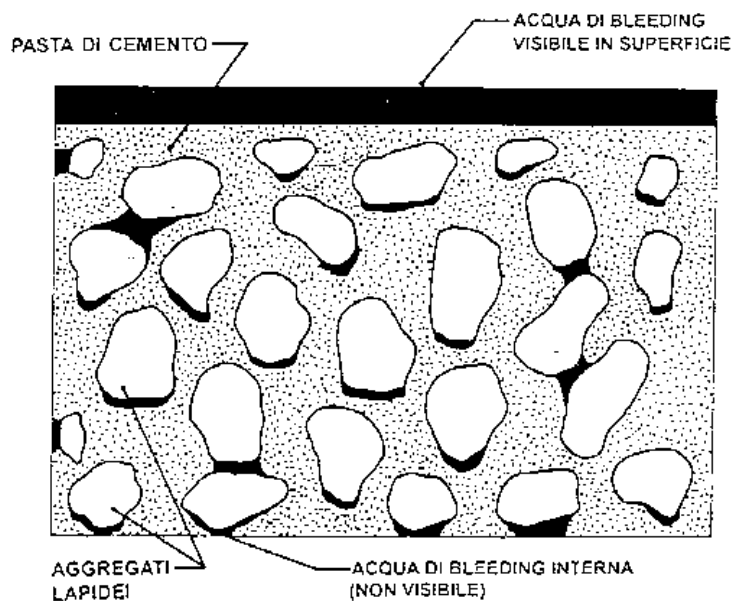


Figura 9 - Rappresentazione schematica dell'acqua di bleeding intrappolata sotto le particelle più grosse di aggregato durante la risalita nel calcestruzzo fresco a seguito della compattazione.

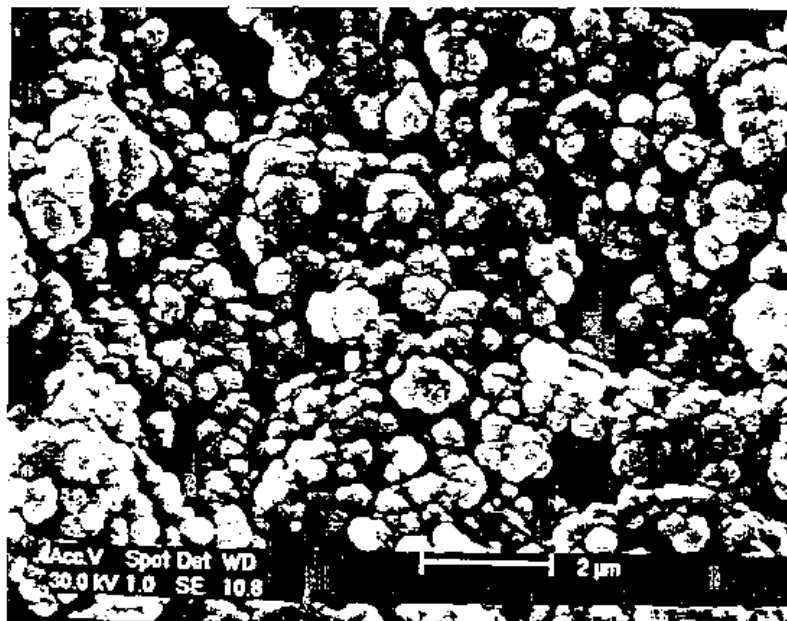


Figura 10 - Microfotografia al microscopio elettronico delle sferette di fumo di silice.

Ciò consente l'allocazione delle sferette di fumo di silice nei vuoti interstiziali presenti tra i granuli di cemento (così come la sabbia si alloca tra i granuli di ghiaia) con il risultato di ottenere un sistema meno poroso, più densificato e quindi meccanicamente più resistente oltreché impenetrabile da qualsiasi agente aggressivo.

Il termine *DSP* (*Densified with Small Particles*) è stato coniato da Bache (8), per il calcestruzzo con fumo di silice, proprio per sottolineare l'addensamento microstrutturale derivante dall'allocazione delle piccole sferette silicee tra i granuli di cemento (Fig. 11).

Esiste però un'altra faccia della medaglia nella piccola dimensione delle particelle di fumo di silice: l'elevata area superficiale specifica di questo materiale (fino a $20\text{-}30 \text{ m}^2/\text{g}$) fa aumentare enormemente la richiesta d'acqua per confezionare il calcestruzzo (Fig. 12) e conseguentemente il maggiore rapporto acqua/cemento annulla il vantaggio derivante dalla densificazione della microstruttura della matrice cementizia.

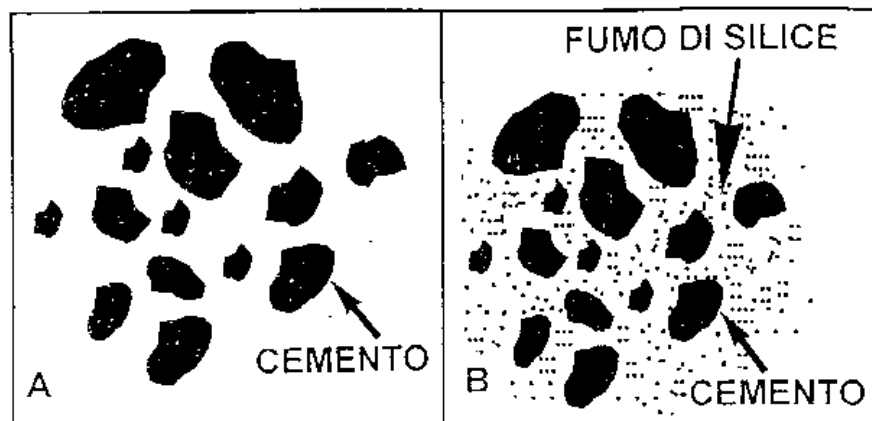


Figura 11 - L'allocazione delle particelle di fumo di silice tra i granuli di cemento.

Con l'avvento dei superfluidificanti cominciarono i primi esperimenti sull'uso combinato di additivo superfluidificante con fumo di silice per eliminare l'inconveniente della maggiore richiesta d'acqua (Fig. 12) e trarre così pieno vantaggio dall'addensamento microstrutturale (Fig. 11).

La combinazione superfluidificante-fumo di silice si rivelò presto molto felice e già verso la fine degli anni '70 apparvero i primi brevetti su questa sinergica combinazione (9): infatti, non solo il superfluidificante eliminava l'inconveniente della maggiore richiesta d'acqua in presenza di fumo di silice (Fig. 12), ma anche il fumo di silice eliminava l'inconveniente di una zona di transizione più porosa (Fig. 3) in conseguenza dell'acqua di bleeding che si raccoglie all'interfaccia tra l'aggregato lapideo e la matrice cementizia (Fig. 9).

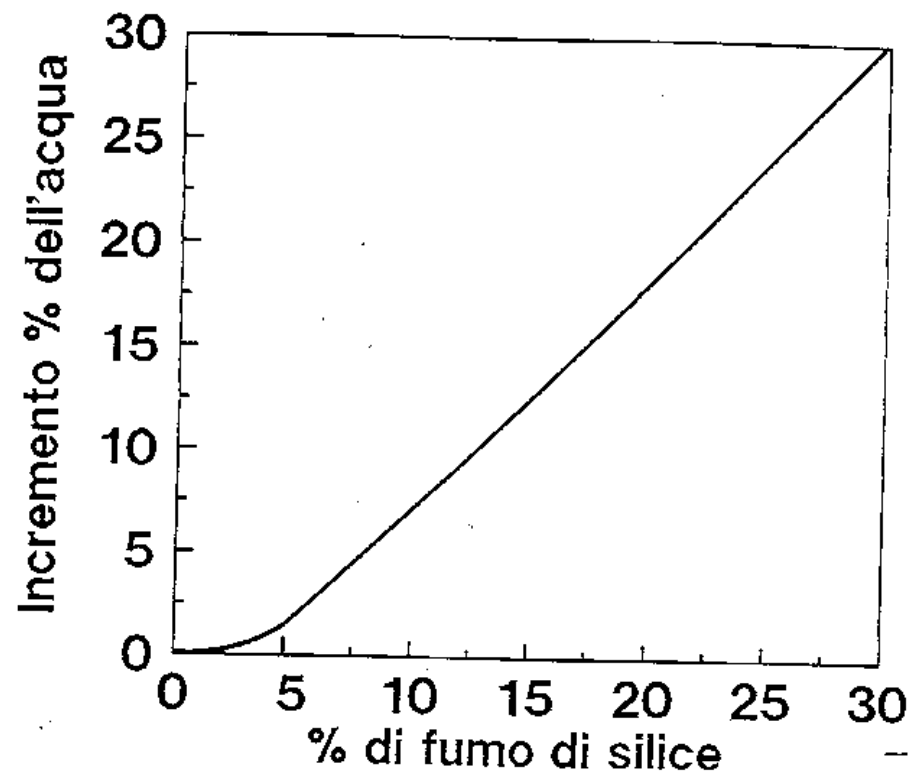


Figura 12 - Influenza del fumo di silice sulla richiesta d'acqua (a pari slump) del calcestruzzo in assenza di superfluidificante.

Diventò così possibile impiegare fumo di silice in calcestruzzi con rapporto a/c ancora più bassi (0.25-0.35) grazie ad un surdosaggio di additivo superfluidificante (4-9% sul cemento) senza alcun inconveniente sulla resistenza meccanica. La Tabella 1 (10) mostra una tipica composizione di calcestruzzo *DSP* ($a/c = 0.25$) basato sull'impiego combinato di fumo di silice (130 kg/m^3) e di superfluidificante (8.5% sul cemento), mentre la Fig. 13 rappresenta lo sviluppo nel tempo della resistenza meccanica a compressione (11). Si può osservare come sia possibile raggiungere una resistenza meccanica a compressione di oltre 100 N/mm^2 a 28 giorni ed arrivare anche a 150 N/mm^2 sia pure in tempi molto più lunghi (circa 3 anni).

Tabella 1 - Tipica composizione di un calcestruzzo DSP (10)

Cemento CEM I 42.5	400 kg/m ³
Fumo di silice	130 kg/m ³
Additivo superfluidificante naftalinico	34 kg/m ³
Quarzite (0-1 mm)	140 kg/m ³
Quarzite (1-4 mm)	570 kg/m ³
Granito di frantumazione	1155 kg/m ³
Acqua	100 kg/m ³
Rapporto a/c	0.25

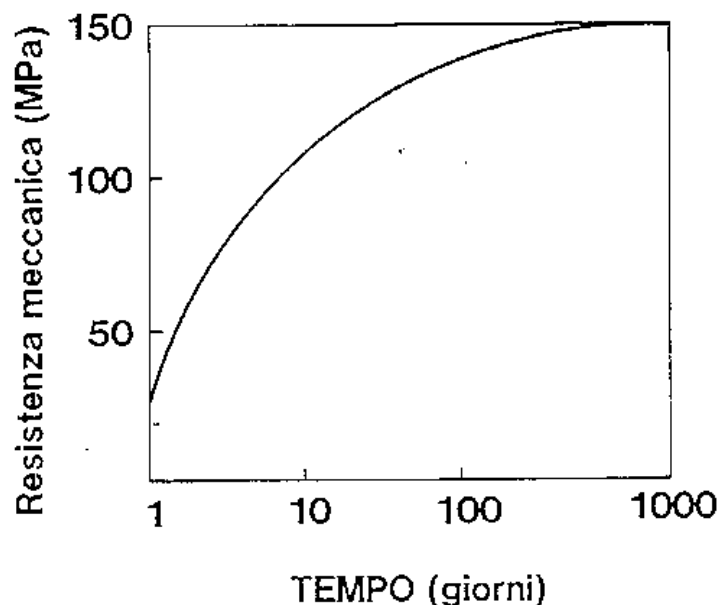


Figura 13 - Resistenza meccanica a compressione del calcestruzzo DSP riportato in Tabella 1 (11).

DAL CALCESTRUZZO DSP ALL'RPC

Più recentemente, verso gli inizi degli anni '90 un ulteriore progresso è stato conseguito da Richard e Cheyrezy (12) i quali hanno esasperato alcuni aspetti già insiti nel calcestruzzo DSP, ed hanno apportato altre innovazioni tecnologiche, per arrivare ai materiali RPC con i quali è possibile, anche in tempi molto brevi, raggiungere il traguardo dei 200

N/mm² per la resistenza meccanica a compressione e migliorare radicalmente la resistenza a flessione e soprattutto la duttilità del materiale.

Nella Tabella 2 sono sinteticamente riassunte le principali modifiche dell'RPC rispetto al calcestruzzo DSP in termini di ingredienti, di composizione e di prestazioni.

Per quanto concerne gli ingredienti le principali modifiche riguardano:

- cemento a basso tenore di C₃A;
- additivi superfluidificanti acrilici più efficaci di quelli tradizionali (Fig. 7);
- fumo di silice privo di incombusti;
- presenza di micro-fibre metalliche (rapporto di aspetto L/D > 70);
- assenza di aggregato grosso e presenza solo di polvere reattiva.

Tabella 2 - Confronto composizionale e prestazionale dei calcestruzzi DSP ed RPC 200.

DSP	RPC 200
• superfluidificante tradizionale	• superfluidificante acrilico
• fumo di silice	• cemento a basso tenore di C ₃ A
	• fumo di silice selezionato (senza incombusti)
	• micro-fibre metalliche
	• assenza di aggregati grossi (polveri reattive)
• stagionatura normale (20°C)	• stagionatura normale (20°C) e/o accelerata (90-160°C)
• alta resistenza a compressione (150 MPa)	• alta resistenza a compressione (200 MPa)
• fragile	• alta resistenza a flessione (50 MPa)
• energia di frattura 100-300 J/m ²	• duttile
	• energia di frattura 10.000-30.000 J/m ²

Una tipica composizione di materiale RPC 200 che ricalca, con qualche modifica, quella originale proposta da Richard e Cheyrezy (12) è mostrata in Tabella 3.

Tabella 3 - Composizione tipica del materiale RPC 200

• cemento tipo V ASTM	955 kg/m ³
• fumo di silice (18 m ² /g)	230 kg/m ³
• silice precipitata (35 m ² /g)	10 kg/m ³
• sabbia fine (0.15-0.40 mm)	1050 kg/m ³
• superfluidificante acrilico (30% in acqua)	43 kg/m ³
• micro-fibre in acciaio (L=13 mm; D=0.18 mm)	190 kg/m ³
• acqua	142 kg/m ³
• acqua totale inclusa quella dell'additivo	172 kg/m ³
• rapporto <i>a/c</i>	0.18
• rapporto <i>a/(c + f.s.)</i>	0.14

I cicli di maturazione che sono stati adottati per la stagionatura della miscela sono illustrati in Figura 14.

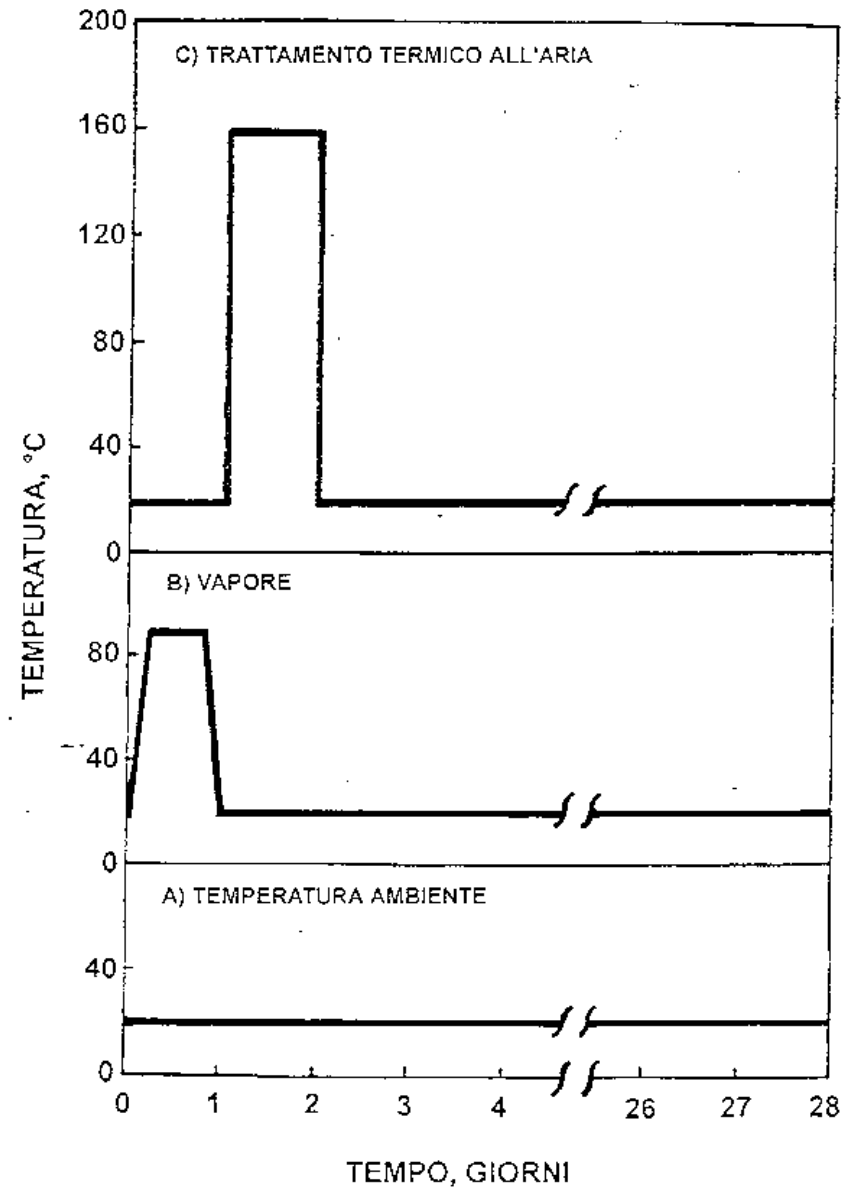


Figura 14 - Stagionatura a temperatura ambiente (a), a vapore (b) e ad alta temperatura (c) del materiale RPC mostrato in Tabella 3.

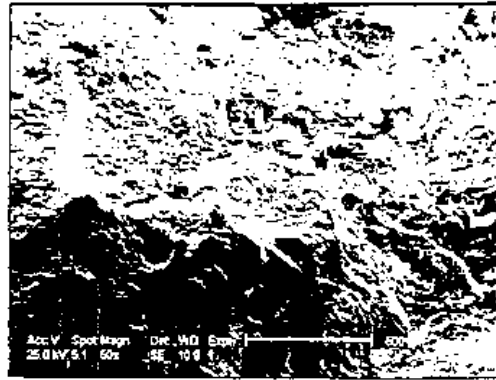


Figura 15 - Microfotografia al microscopio elettronico a scansione della matrice cementizia dell'RPC 200 (priva di microfibre).

La microstruttura della matrice cementizia che avvolge i granuli di sabbia fine è mostrata in Figura 15. Rispetto alla microstruttura tipicamente porosa di una comune pasta di cemento (Fig. 1), la matrice cementizia del materiale *RPC 200* si presenta molto più densa e quasi completamente priva di porosità capillare.

Un tipico comportamento del materiale *RPC 200* per quanto attiene la resistenza meccanica a compressione è mostrata in Figura 16 (13). A temperatura ambiente (20°C) la resistenza meccanica raggiunge il valore di 50 N/mm^2 a 1 giorno e di circa 190 N/mm^2 a 28 giorni. D'altra parte, con la stagionatura a 90°C e 160°C illustrati in Figura 14, il materiale si porta immediatamente al valore di circa 200 N/mm^2 alla fine del trattamento termico senza subire ulteriori e significative variazioni alle stagionature successive.

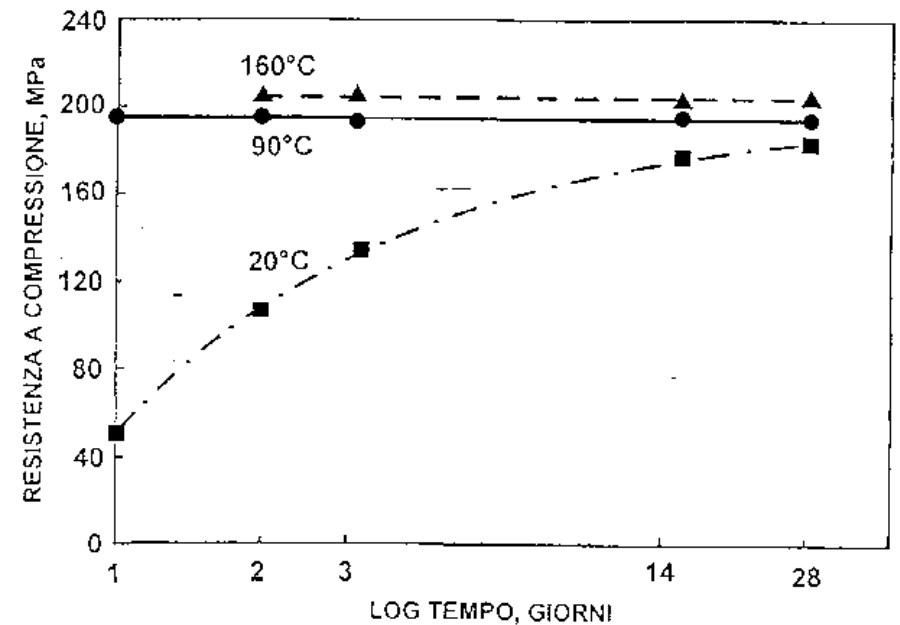


Figura 16 - Sviluppo della resistenza meccanica a compressione.

Ma l'aspetto più caratterizzante dell'*RPC* rispetto ad un generico calcestruzzo *DSP*, non è tanto la maggiore resistenza meccanica a compressione (200 contro 120 N/mm²), e neppure la rapidità per il conseguimento di questa prestazione (pochi giorni contro qualche mese), quanto invece la maggiore duttilità del materiale sollecitato a trazione o flessione.

Nella Figura 17 è mostrato l'andamento del carico flessionale in funzione della freccia per travi (15 x 15 x 60 cm) confezionate con un normale calcestruzzo ($R_{ck} = 30$ N/mm²), un calcestruzzo *DSP* ($R_{ck} = 120$ N/mm²), ed un materiale *RPC 200* ($R_{ck} = 200$ N/mm²). L'area sottesa dalla curva rappresenta l'energia di frattura che aumenta enormemente passando dal calcestruzzo ordinario al *DSP* e soprattutto all'*RPC 200*.

L'enorme tenacità della trave in *RPC 200* è testimoniata dalla foto della Figura 18 che mostra una trave in *RPC 200* sollecitata a flessione che presenta ancora capacità portanti, nonostante al lembo teso si sia aperta una fessura di circa 10 mm.

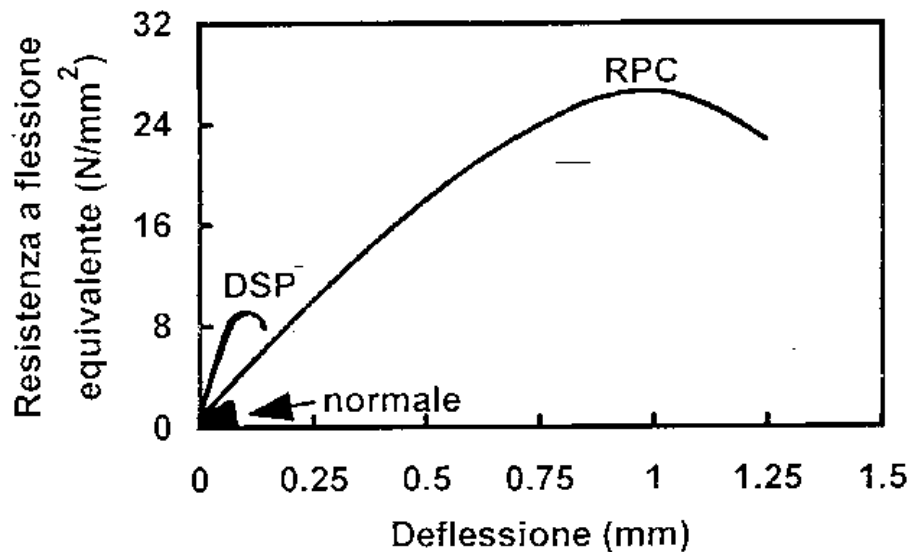


Figura 17 - Andamento dello sforzo (espresso in resistenza a flessione equivalente) in funzione della deflessione per il calcestruzzo ordinario ($R_{ck} = 30$ N/mm²), per il DSP (120 N/mm²) e l'*RPC 200*.

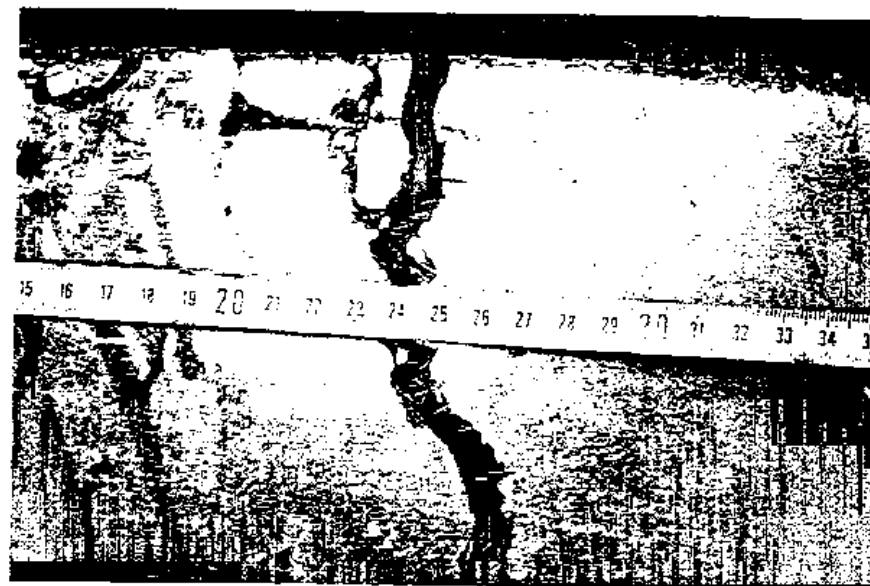


Figura 18 - Particolare della fessura al lembo teso della trave.

APPLICAZIONI

Le maggiori applicazioni di questo materiale sono state inizialmente destinate a opere di ingegneria infrastrutturale particolarmente sollecitate da carichi statici e dinamici in servizio o da azioni aggressive da parte di un ambiente particolarmente ostile (piattaforme marine per estrazione di petrolio, ponti di grande luce, tunnel sottomarini, grattacieli in zone sismiche, ecc.). Si sta, tuttavia, prospettando la tendenza ad impiegare il calcestruzzo *HPC* anche in opere di architettura o di ingegneria civile meno sollecitate per sfruttare le caratteristiche meccaniche attraverso una diversa progettazione, per produrre calcestruzzi più durevoli in conseguenza del basso rapporto acqua/cemento, ed infine, per sfruttare la rapidità produttiva sia in fase di getto per l'elevata lavorabilità degli impasti sia in fase esecutiva per un velocissimo sviluppo della resistenza meccanica.

Nel frattempo è in fase di ricerca avanzata - per il momento quasi esclusivamente a livello di laboratorio o provè di campo - la messa a punto di materiali cementizi ancora più innovativi chiamati *RPC* (*Reactive Powder Concrete*) con prestazioni straordinarie molto superiori a quelle del calcestruzzo *HPC*. La produzione di materiali cementizi *RPC* con resistenza a compressione ben oltre 200 N/mm² e talvolta fino a 800 N/mm², e soprattutto con caratteristiche di duttilità, di resistenza meccanica a flessione, di energia per la frattura molto superiori a quelle dei calcestruzzi *HPC*, apre nuovi orizzonti all'impiego dei materiali cementizi. Appare sempre più probabile che per il XXI secolo questi nuovi materiali potranno entrare in concorrenza con i neo-ceramici e con i metalli strutturali non solo nel campo dell'ingegneria meccanica ed ambientale, ma anche nel settore dell'ingegneria edile e civile.

Si pensi, a questo proposito, ai progetti per il XXI secolo di mega-infrastrutture o di mega-edifici (alti oltre 1000 m), in fase di studio a Tokio, per i quali non solo i tradizionali calcestruzzi ma anche quelli *HPC* risultano inadeguati.

Inoltre, in aggiunta alle applicazioni nel settore dell'ingegneria civile, il materiale *RPC* potrebbe trovare applicazioni nella produzione di stampi per lavorazioni meccaniche, nella formazione *in situ* di basamenti per macchine sollecitate a fatica, nella fabbricazione di serbatoi per liquidi chimici, nella costruzione di contenitori per rifiuti altamente tossici e pericolosi.

BIBLIOGRAFIA

- (1) T.C. Powers, "The Physical Structure of Portland Cement Paste", in "The Chemistry of Cements", ed H.F.W. Taylor, Vol. I, pag. 407, Academic Press, London, U.K. (1964).
- (2) F. Maso, "The Bond Between Aggregate and Hydrated Cement Paste", Seventh International Congress on the Chemistry of Cements, Vol. 1, pag. VII-1/3, VII-1/5, Editions Septima, Paris, France (1980).
- (3) M. Collepardi, "Water Reducers/Retarders", in "Concrete Admixtures Handbook", Ed. V.S. Ramachandran, pag. 286-409, 2nd Edition, Noyes Publication, New Jersey, USA (1995).
- (4) M. Collepardi, V.S. Ramachandran, "Effect of Admixtures", 9th International Congress on the Chemistry of Cement, Vol. 1, pag. 527-570, New Delhi, India (1992).
- (5) T. Cerulli, M. Collepardi, L. Coppola, G. Ferrari, C. Pistolesi, F. Quek, P. Zaffaroni, "Zero-slump Loss Superplasticized Concrete", 18th Conference on Our World in Concrete and Structures, pag. 73-79, Singapore (1993).
- (6) M. Collepardi, "Superplasticizers and Air Entraining Agents: State-of-the-Art and Future Needs", ACI Spring Convention. Concrete Technology: Past, Present and Future, pag. 399-416, San Francisco, USA (1994).
- (7) M. Collepardi, "Advances in Chemical Admixtures for Concrete", Advances in Cement and Concrete, pag. 257-291, Durham, New England, USA (1994).
- (8) H.H. Bache, "Densified Cement/Ultra-Fine Particle Based Materials", lavoro presentato alla 2nd International Conference on Superplasticizers in Concrete, 35 pagine, Ottawa, Canada (1981).
- (9) M. Collepardi, "Method of Producing Expansive and High Strength Cementitious Pastes, Mortars and Concretes", U. S. Patent, No 4, 046, 583, 1977.
- (10) M. Collepardi, L. Coppola, "Il fumo di silice", Cap. III in "Materiali Innovativi per Malte e Calcestruzzi Speciali", Ed. Enco (1990).
- (11) L. Coppola, R. Troli, M. Collepardi, "Materiali Cementizi Innovativi: dagli HPC verso gli RPC. Parte I. I calcestruzzi ad alte prestazioni", L'Industria Italiana del Cemento N. 695, pag. 197-188, (1995).

- (12) D. Richard e M.H. Cherezy, "Reactive Powder Concrete with High Ductility and 200-800 MPa Compressive Strength", Concrete Technology: Past, Present and Future, Ed. P.K. Mehta, ACI SP-144, S. Francisco, USA (1994).
- (13) L. Coppola, R. Troli, S. Collepardi, A. Borsoi, T. Cerulli, M. Collepardi, "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", L'Industria Italiana del Cemento N. 105, febbraio, (1995).