

MATERIALI CEMENTIZI INNOVATIVI: DAGLI HPC VERSO GLI RPC

Parte I. I calcestruzzi ad alte prestazioni

L. COPPOLA*, M. COLLEPARDI*, R. TROLI*

1. INTRODUZIONE

La produzione di calcestruzzo ad alte prestazioni, noto in inglese come *HPC* (*High Performance Concrete*) o in francese *BHP* (*Béton ad Haute Performance*), è ormai diventata una pratica corrente, ancorché non usuale, in Giappone, USA, Francia, Norvegia ed in molti altri Paesi.

In Italia, l'impiego di calcestruzzi ad alte prestazioni è ancora in una fase primordiale sebbene su questo argomento si siano già tenuti tre congressi internazionali a Stavanger (1987), Berkeley (1990) ed a Lillehammer (1993).

In sintesi, il calcestruzzo ad alte prestazioni è caratterizzato da una resistenza meccanica a compressione generalmente compresa nell'intervallo di 60-100 N/mm² grazie a:

- a) ridotto rapporto acqua/cemento (0,40-0,30) per l'impiego di additivi super-riduttori di acqua;
- b) impiego di aggiunte minerali, da sole o in combinazione tra loro, ad alta attività pozzolanica e/o elevata area superficiale specifica (fumo di silice, cenere di pula di riso, loppa microfine, ecc.);
- c) aggregati di frantumazione di alta qualità (basalto, granito, ecc.) capaci di assicurare un'elevata resistenza meccanica intrinseca della roccia ed un'ottima adesione all'interfaccia tra elemento lapideo e matrice cementizia.

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 del 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 prove 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 mecca-

nica 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-ceramiche, con i metalli strutturali sia 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 nella città di Tokio, per i quali non solo i tradizionali calcestruzzi ma anche quelli *HPC* risultano inadeguati.

Lo scopo primario del presente articolo (che ci si prefigge di raggiungere in questa Parte I) è quello di tracciare lo stato dell'arte su questi nuovi materiali cementizi limitatamente a quelli impiegabili nelle costruzioni civili con le tecniche usualmente utilizzate nella produzione del calcestruzzo tradizionale in impasti di prefabbricazione (miscelazione in betoniera, trasporto, getto in casseforme, vibrazione, maturazione a vapore). Sono invece esclusi dal presente lavoro per ragioni di brevità, ma anche di interesse specifico per i lettori di questa rivista, i nuovi materiali cementizi producibili con tecnologie più sofisticate, inusuali per il settore dell'ingegneria civile, quali pressatura di polveri, miscelazione con alto sforzo di taglio, laminazione, calandratrice, ecc.

Un secondo scopo del lavoro (che verrà più approfonditamente perseguito nella Parte II di successiva pubblicazione) è quello di presentare i primi risultati sperimentali ottenuti nel nostro laboratorio nello specifico settore dei materiali cementizi *RPC* che rappresenta solo uno dei materiali cementizi innovativi possibilmente impiegabili nel prossimo secolo con le summenzionate tecniche produttive tradizionalmente adottate nel settore dell'ingegneria civile.

2. DEFINIZIONE DEI NUOVI MATERIALI CEMENTIZI INNOVATIVI: CBC, DSP, MDF, DSP, HPC, RPC

Sulla base delle ricerche intraprese negli ultimi venti anni si va configurando una vasta categoria di nuovi materiali cementizi identificati con sigle quali *CBC*, *DSP*, *MDF*, *RPC*, ecc..

Sebbene ciascuno di questi materiali sia stato sviluppato autonomamente dai vari ricercatori seguendo criteri innovativi diversi, esiste tuttavia un principio generale che li accomuna tutti: innanzitutto il tentativo di ridurre la presenza di cavità, pori o difetti nella microstruttura del materiale. In secondo luogo, tutti questi nuovi materiali sono basati sull'utilizzazione della reazione chimica dell'acqua con il cemento, con la formazione di prodotti di idratazione quali i silicati o gli alluminati di calcio presenti sia nel cemento Portland che in quello alluminoso.

In realtà, sia per la consistente presenza di aggiunte speciali, utilizzate solo in minima parte nei calcestruzzi ordinari (fibre,

* Enco, Engineering Concrete, Spresiano (TV).

polimeri, polveri ultra-fini, ecc.), sia per il particolare processo produttivo spesso basato su metodi mutuati da altre tecnologie (dalla ceramica, dalla gomma, ecc.), questi materiali compositi dal punto di vista microstrutturale e prestazionale hanno in realtà ben poco in comune con i tradizionali calcestruzzi salvo, come si è detto, la presenza di acqua e cemento tra i loro ingredienti.

Il termine più generale coniato da Roy [1] per definire questa nuova classe di materiali cementizi è "Chemically Bonded Ceramics" (CBC) attraverso il quale si vuole evidenziare, da una parte, il carattere prevalentemente ceramico del materiale (cioè inorganico non metallico) e, dall'altra, l'aspetto prevalentemente chimico del legame che si sviluppa a seguito della reazione tra acqua e silicati o alluminati come avviene nei materiali cementizi tradizionali. Tuttavia, rispetto a quest'ultimi, un ruolo essenziale è giocato dal componente polimerico che, pur minoritario rispetto all'ingrediente inorganico, è presente in quantità considerevole.

L'associazione dei materiali CBC alla famiglia dei ceramici è giustificato anche dai particolari processi produttivi molto più simili a quelli dei neoceramici tradizionali che non a quelli dei consueti materiali cementizi. Infatti, i processi per produrre i materiali CBC includono:

- a) miscelazione ad alto sforzo di taglio delle materie prime;
- b) formatura prevalentemente per pressione, estrusione e calandratura anche se recentemente è stata proposta la tecnica del *soft casting*;
- c) consolidamento a freddo attraverso reazioni chimiche. Infatti, anche se i trattamenti termici (*hot pressing* o *drying-curing*) non sono necessariamente esclusi, essi avvengono comunque a temperature molto più basse di quelle che si registrano nella produzione dei ceramici veri e propri.

I materiali CBC (Fig. 1) includono varie tipologie di prodotti (tutti finalizzati all'obiettivo delle super-prestazioni meccaniche correlate all'assenza o alla bassissima presenza di difetti o pori nella microstruttura della matrice cementizia) che possono essere sostanzialmente raggruppati in due grandi categorie [2]:

- materiali MDF (*Macro-Defect Free*);
- materiali DSP (*Densified with Small Particles*).

La principale differenza tra i materiali MDF e quelli DSP consiste soprattutto nel ruolo giocato dal componente polimerico nel processo produttivo: nei materiali MDF [3] è presente un polimero completamente idrosolubile (polivinilalcol, poliacrilammide, idrossimetilcellulosa) che ha il ruolo di modificare significativamente la reologia dell'impasto cementizio in una

sorta di materiale gommoso, in modo da consentirne la formatura per estrusione o calandratura tra rulli; nei materiali DSP, invece, sono presenti polimeri solfonati o acrilici che rendono possibile la formatura sia per pressione di polveri umide sia per colatura e vibrazione di miscele a consistenza plastica entro stampi (*soft casting*).

Per questo motivo solo i materiali cementizi DSP prodotti con la tecnica del *soft casting* (cioè in sostanza del getto entro casseforme) sono potenzialmente utilizzabili nel settore dell'ingegneria civile per produrre manufatti anche di grandi dimensioni e di forma complicata. Sono, invece, da riservare ad altri impieghi più sofisticati, quali produzione di manufatti di minore dimensione e di forma geometrica regolare, sia i materiali DSP ottenuti per pressatura delle polveri entro stampi, sia i materiali MDF ottenuti per estrusione o calandratura (Fig. 1).

I materiali cementizi DSP comprendono, a loro volta, due sottotipi: gli ormai attuali HPC con resistenza meccanica a compressione fino a circa 100 N/mm² ed ai quali si è già accennato nel paragrafo introduttivo, e gli RPC [4] che rappresentano in prospettiva un ulteriore progresso tecnologico rispetto agli HPC: la resistenza meccanica degli RPC può arrivare a circa 200 N/mm² se prodotti con la tecnica del *soft casting* e fino a 800 N/mm² se prodotti per pressatura (Fig. 1); in realtà, come sarà mostrato più avanti, la distinzione tra i processi produttivi dei due materiali, indicati con RPC 200 e RPC 800, consiste anche in altri aspetti tecnologici [4].

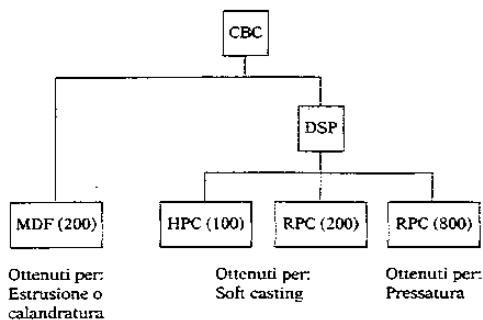


Fig. 1 - Schematizzazione dei materiali cementizi innovativi e dei processi produttivi; i numeri tra parentesi indicano la resistenza meccanica (in N/mm²) a compressione per HPC o RPC, ed a flessione per MDF.

Un elenco non esaustivo delle principali applicazioni prevedibili per questa nuova categoria di materiali comprende i seguenti settori:

- ingegneria civile: costruzioni di mega-strutture e mega-edifici che per loro dimensioni richiedono superprestazioni non solo in termini di resistenza meccanica, ma anche di duttilità, di tenacità, ecc.;
- ingegneria chimica ed ambientale: contenitori di alta affidabilità per lo stoccaggio di fluidi o solidi pericolosi per tossicità, infiammabilità, ecc.;
- ingegneria meccanica: produzione di manufatti con alta resistenza all'urto (anticoppio ed anti proiettile) o alta resistenza all'abrasione per produrre stampi destinati alla formatura di pezzi meccanici metallici o polimerici (lamiere per auto).

2.1. I materiali cementizi innovativi DSP di tipo HPC

Il primo ed originale contributo allo sviluppo dei materiali DSP è dovuto a Baache [5] che nel 1981 pubblicò gli straordinari risultati conseguibili attraverso l'impiego di additivi superfluidificanti e di particelle ultra fini sub-microniche (fumo di silice). Questa tecnologia, il cui principio è già ampiamente sfruttato nella produzione degli attuali manufatti HPC, consiste fondamentalmente nel ridurre significativamente l'acqua d'impasto attraverso l'impiego dei superfluidificanti e nel riempire i vuoti interstiziali dei granuli di cemento (dimensioni 1-50 µm) con particelle di fumo di silice (0,01-0,1 µm) in modo da ottenere una matrice cementizia più densa e meno porosa (Fig. 2). In sostanza, gli additivi superfluidificanti ed il fumo di silice consentono di ridurre la distanza tra i granuli di cemento (da A verso B in Fig. 2) così drasticamente che la matrice legante diviene estremamente densa e compatta da superare, nelle prestazioni meccaniche, la qualità dei comuni elementi lapidei impiegati correntemente nel calcestruzzo.

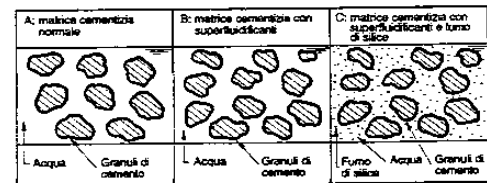


Fig. 2 - Schematizzazione della matrice cementizia nei calcestruzzi tradizionali (A e B) e nei materiali DSP secondo Baache (C). La situazione rappresentata è quella che si configura al momento dell'impasto: successivamente i prodotti dell'idratazione del cemento riempiono gli spazi interstiziali tra le varie particelle solide.

La densificazione conseguibile con l'impiego di particelle ultra-fine, come il fumo di silice, giustifica il nome di "Densified with Small Particles", DSP, suggerito da Baache.

Nella Fig. 3 sono mostrati, a titolo esemplificativo, i risultati conseguibili con l'impiego congiunto di superfluidificante (12 kg/m³) e fumo di silice (45 kg/m³) in presenza di normali aggregati calcarei (diametro massimo 25 mm): con l'impiego di 300 kg/m³ di cemento CEM I 52.5 (ex Portland 525) ed un rapporto acqua/cemento di circa 0,40 è possibile produrre calcestruzzi fluidi con classe di consistenza S4-S5 e raggiungere una resistenza meccanica di 90 N/mm² a 28 giorni [6]. Val la pena di osservare che con il solo fumo di silice - senza impiegare, quindi, l'additivo superfluidificante - la richiesta d'acqua è così forte, per l'elevata finezza di questo materiale, che il conseguente rapporto *alc* diventa molto elevato (0,69) e vanifica il benefico effetto fillerizzante e pozzolanico del fumo di silice [3].

D'altra parte, sostituendo il cemento CEM 52.5 con il più comune cemento CEM I 42.5 (ex Portland 425) a parità di tutte le altre caratteristiche composizionali, la resistenza meccanica a compressione supera i 70 N/mm² a 28 giorni [6] com'è mostrato in Fig. 4.

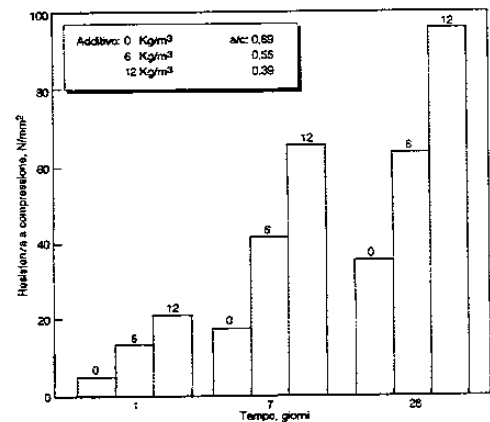


Fig. 3 - Sviluppo della resistenza meccanica a compressione di calcestruzzi con fumo di silice (45 kg/m³), con CEM I 52.5 (300 kg/m³) e con superfluidificante: il numero sugli istogrammi indica il dosaggio di additivo in kg/m³ di calcestruzzo [6].

L'utilizzazione congiunta di fumo di silice e superfluidificante ad alto dosaggio (2-4% sul cemento) consente di ottenere prestazioni ancora superiori se si sostituisce il comune aggregato calcareo con rocce di migliori prestazioni meccaniche e soprattutto con caratteristiche superficiali tali da migliorare il legame all'interfaccia aggregato-matrice cementizia. In sostanza, la matrice cementizia che avvolge gli elementi lapidei - e che nei calcestruzzi ordinari rappresenta l'anello debole della catena per la sua maggiore porosità - diventa meccanicamente più resistente dei comuni aggregati per la maggiore compattezza della sua microstruttura grazie all'impiego congiunto di fumo di silice e riduttori di acqua (Fig. 2). In queste condizioni, l'anello debole della catena diventa l'aggregato e più esattamente quella sottilissima area del materiale (pochi decine di μm) situata all'interfaccia tra aggregato e matrice cementizia (Fig. 5), nota con il nome di "zona di transizione" [7] o "areola".

Se si vuole, quindi, sfruttare al massimo nel materiale composito (calcestruzzo) il beneficio derivante da una matrice (pasta cementizia) più densa e compatta è necessario disporre di aggregati naturali particolari (basalto, granito, diabase, ecc.),

altrettanto densi e compatti e capaci soprattutto di stabilire un migliore legame adesivo nella "zona di transizione" con la matrice cementizia.

2.2. Influenza della zona di transizione sulla resistenza meccanica

La zona di transizione, che è in genere più porosa e meccanicamente più debole degli altri due componenti (aggregato lapideo e matrice cementizia), esercita un'influenza sulle proprietà del materiale composito significativamente maggiore di quella che ci si potrebbe attendere dalle sue dimensioni relativamente ridotte (Fig. 5).

Tuttavia, il ruolo giocato dalla zona di transizione può diventare più o meno influente a seconda delle interferenze di questo parametro con gli altri schematicamente illustrati in Fig. 6. Innanzitutto, il tipo di sollecitazione fa diventare la zona di transizione un parametro più o meno decisivo nell'influenzare il comportamento alla rottura del calcestruzzo: infatti, la zona di transizione, mentre penalizza significativamente la resistenza a trazione (che dipende fortemente dai legami che si stabiliscono

all'interfaccia aggregato/matrice) non influenza altrettanto pesantemente quella a compressione. Tuttavia, l'influenza della stessa zona di transizione sulla resistenza a compressione diventa più significativa se si aumenta la dimensione dell'aggregato soprattutto per i calcestruzzi HPC ad alta resistenza a compressione (60-100 N/mm²).

Per interpretare meglio il meccanismo dell'influenza piuttosto complessa esercitata dalla zona di transizione sulle proprietà meccaniche (ma anche su quelle elastiche e su quelle riguardanti la durabilità) del materiale è opportuno approfondire la descrizione di questa zona-chiave del calcestruzzo.

Nel calcestruzzo fresco sottoposto a compattazione, intorno alle zone inferiori dei granuli grossi dell'aggregato vengono a formarsi dei film di acqua (qualche decina di μm) al di sotto dei quali si raccoglie prevalentemente l'acqua di *bleeding* (Fig. 7). Già questa situazione determina un rapporto acqua/cemento più elevato (e quindi una maggiore porosità) nella zona di transizione rispetto alla matrice cementizia. La formazione dei primi germi-cristallini di $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e di ettringite, che avviene in tutta la matrice cementizia per effetto dell'idratazione dei silicati e degli alluminati del legante, è seguita da un maggior accrescimento dei cristalli di questi prodotti nella zona di transizione più porosa per il maggior rapporto acqua/solido localmente esistente [9]. La maggiore porosità di questa zona consente anche lo sviluppo di cristalli di calce pluristratificati, orientati più o meno parallelamente alla superficie dell'aggregato, ma anche facilmente sfaldabili e quindi meccanicamente più deboli. In tempi successivi, negli interstizi disponibili tra i cristalli di calce e di ettringite, vengono a depositarsi il C-S-H (prodotto per idratazione dei silicati del cemento) in forma di fibre più o meno reticolate e nuovi cristalli più piccoli di calce e di ettringite: questo secondo processo, molto più lento rispetto alla formazione iniziale dei primi grossi cristalli di calce e di ettringite, comporta un progressivo riempimento dei pori esistenti nella zona di transizione, cosicché nel giro di diversi mesi la porosità della zona di transizione tenderebbe ad eguagliare quella della matrice cementizia (Fig. 8). La microstruttura schematizzata nella Fig. 5 si riferisce ad una situazione intermedia (circa 1 mese) quando ancora la zona di transizione è più porosa e quindi meccanicamente più debole della matrice cementizia.

In condizioni particolarmente favorevoli, a tempi molto lunghi, e con accurata stagionatura umida per favorire il grado di idratazione del cemento, la zona di transizione potrebbe anche diventare un po' meno porosa della matrice (Fig. 8) con formazione di veri e propri legami chimici tra i prodotti di idratazione del cemento e la superficie dell'aggregato: con formazione di carboalluminati se quest'ultimo è di tipo calcareo, o di C-S-H se l'aggregato è siliceo. Tuttavia, è difficile che questa situazione, che potenzialmente determinerebbe addirittura una maggiore resistenza meccanica della zona di transizione, possa realmente verificarsi nelle usuali stagionature all'aria dei conglomerati cementizi, cioè in assenza di un'accurata stagionatura umida.

Inoltre, un'altra caratteristica della zona di transizione, in aggiunta ad una maggiore porosità che si protrae per diversi mesi, consiste nell'innescare e nella propagazione di microfessure che danneggiano irreversibilmente il materiale. Le microfes-

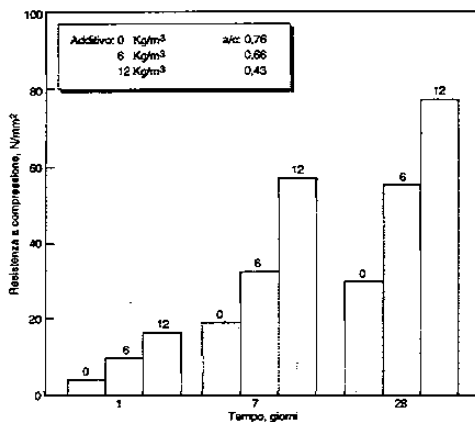


Fig. 4 - Sviluppo della resistenza meccanica a compressione di calcestruzzi con fumo di silice (45 kg/m³), con CEM I 42,5 e con diversi dosaggi di superfluidificante: il numero sugli istogrammi indica il dosaggio in kg/m³ di calcestruzzo [6].

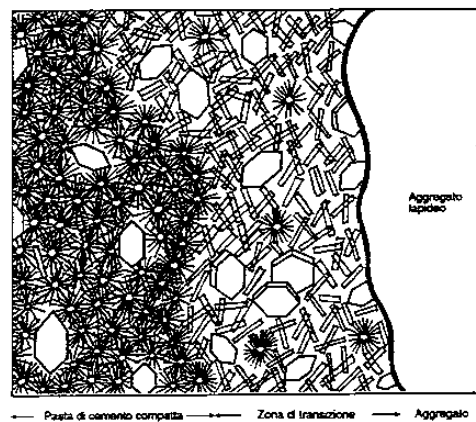


Fig. 5 - Rappresentazione schematica di un calcestruzzo nella zona di transizione tra l'aggregato lapideo e la matrice cementizia [7].

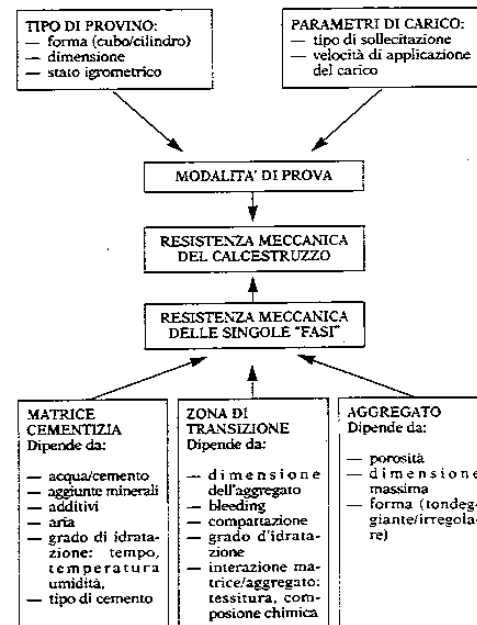


Fig. 6 - Fattori che influenzano la resistenza meccanica del calcestruzzo idealmente segmentato in tre "fasi": matrice cementizia, aggregato lapideo e zona di transizione.

sure si possono formare nella zona di transizione per una qualsiasi causa di sollecitazione che provochi un movimento differenziale tra la matrice cementizia e l'aggregato dotati di modulo elastico significativamente diversi tra loro: un gradiente termico originato dal calore di idratazione del cemento; un ritiro igrometrico che coinvolge la matrice ma non l'aggregato; un carico applicato per un tempo più o meno lungo ancorchè inferiore a quello di rottura. In tutte queste circostanze la zona di transizione (se viene a mancare una stagionatura umida prolungata per qualche mese e ciò si verifica correntemente) diventa il luogo dove si accumulano le varie microfessure tra la superficie dell'aggregato e la circostante matrice cementizia.

Quando il materiale è sollecitato fino a rottura, durante la prova per la determinazione della resistenza meccanica, le microfessure già esistenti aumentano per spessore e lunghezza, propagandosi preferibilmente nella zona di transizione e successivamente nella matrice cementizia. In genere, a partire da una sollecitazione pari a circa il 40% di quella che provoca la rottura (cioè della resistenza meccanica), le deformazioni del calcestruzzo aumentano molto più rapidamente con il progressivo incremento della sollecitazione proprio per il propagarsi delle microfessure già esistenti nella zona di transizione. Ciò spiega perchè il calcestruzzo mostri una deformazione plastica

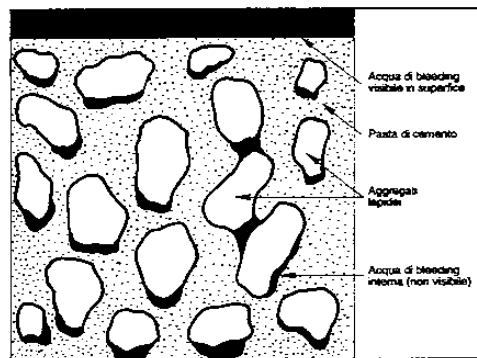


Fig. 7 - Rappresentazione schematica dell'acqua di bleeding intrappolata al di sotto delle particelle più grosse di aggregato durante la risalita nel calcestruzzo fresco subito dopo la compattazione [9].

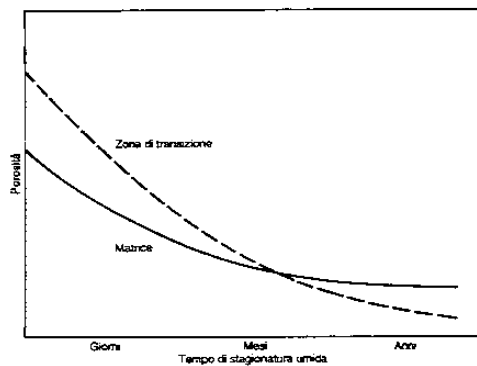


Fig. 8 - Andamento schematico nel tempo della porosità nella matrice cementizia e della zona di transizione del calcestruzzo [9].

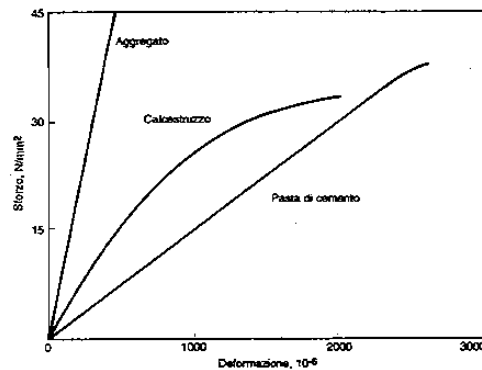


Fig. 9 - Tipico comportamento sforzo-deformazione del calcestruzzo e dei suoi componenti (aggregati e pasta cementizia).

laddove i suoi componenti singoli (aggregato e pasta di cemento) si comportano fragilmente alla rottura dopo una deformazione elastica pressoché lineare (Fig. 9).

Inoltre, quando si raggiunge una sollecitazione pari a circa il 70% di quella che provoca la rottura, ha inizio la fessurazione della matrice a causa della concentrazione degli sforzi intorno ai vuoti (macro-cavità, pori, difetti) esistenti nella matrice stessa. Con sollecitazioni progressivamente maggiori, le fessure si diffondono attraverso la matrice e vanno a ricongiungersi con quelle pre-esistenti sviluppatesi nella zona di transizione, creando così uno stato fessurativo pressoché continuo e provocando, quindi, la rottura del materiale. In assenza di aggregati, invece, la propagazione delle fessure nella pasta cementizia, fino allo stato fessurativo continuo, e quindi alla rottura, richiede una maggiore sollecitazione. Ciò spiega perchè il calcestruzzo presenta una minore resistenza meccanica rispetto non solo all'aggregato, ma anche alla matrice cementizia (Fig. 9).

Infine, poiché la propagazione delle fessure richiede più forza ma anche più energia nelle sollecitazioni di compressione che in quelle di trazione, si può spiegare perchè la resistenza meccanica a compressione sia maggiore di quella a trazione, e perchè il calcestruzzo presenti il caratteristico comportamento di un materiale fragile, anche se in realtà esso subisce, prima della rottura, una leggera deformazione plastica.

Sulla base del meccanismo, sopra illustrato, ed in particolare del ruolo giocato dalla zona di transizione, si può anche spiegare l'influenza del fuoco sulle proprietà elastiche e meccaniche del calcestruzzo: a causa delle tensioni termiche, infatti, le microfessure pre-esistenti nella zona di transizione si allargano e si estendono riducendo ulteriormente il contatto tra matrice cementizia ed aggregato e la conseguente possibilità di trasferire gli sforzi. Pertanto, dopo un incendio si registra, in genere, una diminuzione di modulo elastico del calcestruzzo molto maggiore del corrispondente calo nella resistenza meccanica a compressione.

Poiché la zona di transizione gioca un ruolo molto più determinante con gli aggregati grossi, dove è più facile che si verifichino le condizioni di acqua intrappolata per effetto del bleeding interno (Fig. 7), ne consegue che, a parità di rapporto acqua/cemento, la resistenza meccanica a compressione risulterà minore nel calcestruzzo che non nella malta.

La presenza di microfessure nella zona di transizione, oltre ad influenzare le proprietà meccaniche ed elastiche del calcestruzzo condiziona anche la permeabilità all'acqua e ad altri potenziali agenti aggressivi: in corrispondenza della zona di transizione, intrinsecamente più porosa e più microfessurata, diventa più facile l'ingresso di acqua e di aria con conseguenze

negative sulla durabilità del calcestruzzo e sulla protezione dei ferri dalla cortosione.

2.3. Materiali DSP con aggregati speciali

In teoria, la combinazione di fumo di silice e di superfluidificante potrebbe essere spinta a dosaggi ben maggiori di quelli utilizzati per esempio nel materiale HPC esaminato nella Fig. 3 (rispettivamente 45 e 12 kg/m³) arrivando ad una microstruttura della matrice cementizia più densificata e meccanicamente più resistente.

Tuttavia, per le ragioni esposte precedentemente, è praticamente inutile adottare questi accorgimenti finalizzati ad una maggiore densificazione della matrice cementizia, se non si dispone di aggregati altrettanto densi e compatti come la matrice stessa e se non si elimina, soprattutto, l'inconveniente di una porosa zona di transizione tra la matrice e gli elementi lapidei esaminati nella sezione precedente di questo articolo.

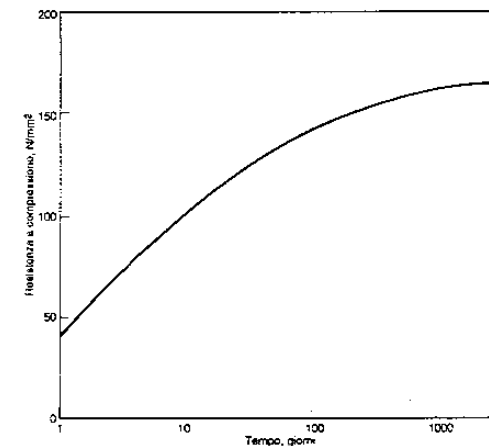


Fig. 10 - Resistenza meccanica a compressione nel tempo del materiale DSP riportato in Tabella 1.

Pertanto, solo disponendo di aggregati densi e compatti (basalti, graniti, ecc.), con tessitura superficiale ruvida per favorire la massima adesione della matrice agli aggregati in corrispondenza della zona di transizione, diventa possibile sfruttare al massimo l'ulteriore densificazione conseguibile nella matrice con un maggior contenuto di particelle ultra-fini. Ovviamente il maggior contenuto di queste particelle finissime deve essere accompagnato da un maggior dosaggio di superfluidificante per compensare l'enorme richiesta d'acqua provocata dalla polvere del finissimo.

Un'applicazione di questo principio è mostrata esemplificamente in Tabella 1 dov'è mostrata la composizione di un'impasto DSP con resistenze meccaniche a compressione che a tempi lunghi (3 anni) superano i 150 N/mm² e che a 28 giorni superano facilmente i 120 N/mm² (Fig. 10).

Come si può vedere in Tabella 1, il dosaggio di fumo di silice arriva a 130 kg/m³ (oltre il 30% del cemento), mentre l'altissimo dosaggio di additivo (oltre il 6% sul cemento e fumo di silice) consente di ridurre il rapporto acqua/cemento a 0,25 e quello acqua/(cemento + fumo di silice) a meno di 0,20. Proprio per utilizzare al massimo il principio della estrema densificazione si è rinunciato ad ottenere un impasto fluido limitando la consistenza a quella di terra umida (S1: slump 30mm) per ridurre ogni possibilità di bleeding in fase di compattazione e favorire quindi la formazione di un legame adesivo nella zona di transizione tra matrice ed aggregato.

TABELLA 1

Composizione di un calcestruzzo DSP [6].	
Cemento CEM I 42.5	400 kg/m ³
Fumo di silice	130 kg/m ³
Additivo superfluidificante naftalinico (40% in acqua)	34 kg/m ³
Quarzite (0-1 mm)	140 kg/m ³
Quarzite (1-4 mm)	570 kg/m ³
Granito di frantumazione (4-15 mm)	1155 kg/m ³
Acqua	100 kg/m ³
Rapporto acqua/cemento	0,25
Rapporto acqua/(cemento + fumo di silice)	0,19
Slump	30 mm

Tuttavia, tutti questi accorgimenti sarebbero stati in gran parte vanificati se non fosse stato selezionato un aggregato di frantumazione (quarzite e granito), di per sé molto resistente meccanicamente, ma anche con caratteristiche superficiali che favoriscono l'adesione all'interfaccia tra matrice ed aggregato.

Incidentalmente si può notare che, nonostante lo slump molto basso (30 mm), il materiale risulta facilmente compatto per il particolare comportamento reologico del sistema (tixotropico) che deriva dall'impiego combinato del fumo di silice e del superfluidificante.

Un aspetto pratico molto significativo per la produzione di questi tipi di materiali riguarda l'efficacia ed il tempo di mescolamento: solo con l'impiego di premiscelatori che favoriscono uno sforzo di taglio sull'impasto è possibile, con gli usuali tempi di miscelazione, disperdere efficacemente le particelle di fumo di silice in granuli individuali (che normalmente tenderebbero ad agglomerarsi in "ammassi" particellari più ingombranti) ed a favorire l'inserimento delle particelle finissime (< 0,1 µm) negli interstizi tra i granuli di cemento (Fig. 2). Con la miscelazione correntemente impiegata nella produzione di calcestruzzo preconfezionato, invece, è necessario prolungare il tempo di miscelazione fino a 10-20 minuti o a disperdere preliminarmente la sospensione di fumo di silice in acqua con trattamenti ad onde ultrasoniche [10].

Inoltre, in alcune applicazioni pratiche, dove si è tentato di ridurre al minimo la lavorabilità dell'impasto, per favorire il minor rapporto acqua/cemento possibile, si è trovato che l'applicazione di un sistema di disareazione sotto vuoto favorisce l'espulsione dell'aria in fase di compattazione dell'impasto e consente di raggiungere più facilmente il massimo stato di densificazione con conseguente positiva influenza sulla resistenza meccanica [10].

3. LIMITI PRESTAZIONALI DEI MATERIALI DSP

Accanto alle straordinarie prestazioni in termini di resistenza meccanica a compressione illustrate nella precedente sezione, ed a parte l'altrettanto straordinario comportamento nei confronti delle aggressioni ambientali qui non esaminate per ragioni di brevità, i materiali DSP presentano, tuttavia, alcuni limiti nel comportamento deformazionale sotto sforzo: viene accentuato, in sostanza, il carattere fragile del materiale che presenta un'energia di frattura relativamente modesta.

Questi limiti prestazionali, che verranno completamente su-

perati con i materiali RPC dei quali si discuterà nella Parte II di questo articolo in una successiva pubblicazione, sono strettamente connessi con la microstruttura densa del materiale DSP e non già con la composizione chimica del composito ed in particolare con la presenza di fumo di silice e superfluidificante.

Nella Fig. 11 sono mostrate comparativamente le curve di sforzo (a compressione) in funzione della deformazione su provini cubici dei seguenti materiali caratterizzati da diversi valori di resistenza a compressione (R_c):

- a) calcestruzzo ordinario senza fumo di silice e senza superfluidificante ($R_c = 27$ N/mm²);
- b) calcestruzzo ordinario con fumo di silice (15%) senza superfluidificante ($R_c = 35$ N/mm²);
- c) calcestruzzo ad alta resistenza meccanica con superfluidificante (2%) senza fumo di silice ($R_c = 52$ N/mm²);
- d) materiale HPC con 15% di silice (15%) e 3% di superfluidificante ($R_c = 91$ N/mm²);
- e) materiale HPC come in d) nel cui provino cubico è stata inserita una spirale metallica in acciaio ($R_c = 95$ N/mm²).

Le brusche cadute delle curve dopo il massimo (rottura) evidenziano il carattere fragile sia del calcestruzzo ad alta resistenza meccanica ($R_c = 52$ N/mm²) senza fumo di silice sia del materiale HPC ($R_c = 91$ N/mm²). D'altra parte il carattere fragile diminuisce al diminuire della resistenza meccanica passando al calcestruzzo con $R_c = 35$ N/mm² (con fumo di silice) ed ancor più a quello con $R_c = 27$ N/mm² (senza fumo di silice). La presenza di acciaio annegato nel materiale HPC ($R_c = 95$ N/mm²) elimina completamente il carattere fragile.

La minore duttilità dei materiali HPC, che è legata alla microstruttura più densa che favorisce la tipica rottura fragile dei materiali ceramici densi, deve essere tenuta in conto nel calcolo strutturale e compensato attraverso un'adeguata distribuzione delle armature metalliche.

4. CONCLUSIONI

È stata presentata una classificazione generale che comprende una vasta famiglia di materiali cementizi innovativi, tutti appartenenti alla categoria CBC (Chemically Bonded Ceramics).

Questa può essere suddivisa in due tipi: MDF (Macro Defect Free) e DSP (Densified with Small Particles). I materiali DSP includono i materiali HPC (High Performances Concretes) con re-

sistenza meccanica fino a 100 N/mm² e gli RPC (Reactive Powder Concrete) distinguibili in due sottoclassi RPC 200 ed RPC 800 a seconda della massima resistenza meccanica a compressione conseguibile (rispettivamente 200 e 800 N/mm²).

Tenuto conto delle tecniche produttive di questi materiali - alcune delle quali molto sofisticate e mutate da altri processi industriali - sono stati presi in considerazione solo i materiali HPC e RPC 200 producibili con una tecnica (soft casting) uguale o simile a quella correntemente impiegata per la costruzione delle opere in c.a..

Nella presente parte del lavoro sono stati presentati alcuni dati composizionali e prestazionali dei materiali HPC riservando una particolare attenzione alla zona di transizione tra matrice cementizia ed aggregati lapidei.

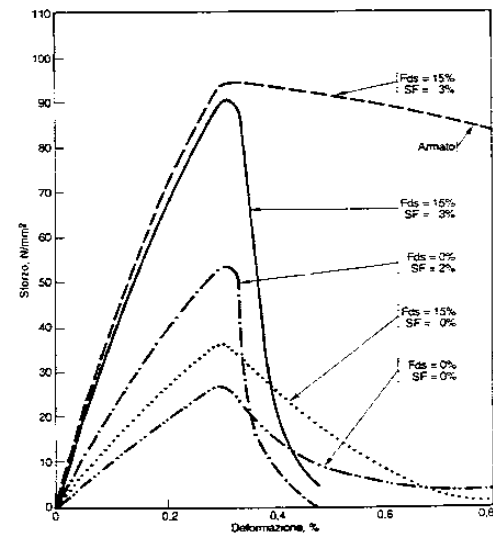


Fig. 11 - Curva sforzo-deformazione di provini cubici (150 mm) sottoposti a compressione confezionati con e senza fumo di silice (Fds) e superfluidificante (SF). Il provino armato conteneva una spirale d'acciaio [6].

I materiali HPC sono attualmente impiegati in molti Paesi - ma non ancora in Italia - per opere di ingegneria infrastrutturale di grande impegno (piattaforme marine per estrazione del petrolio, ponti di grande luce, ecc.).

Nella Parte II del presente lavoro, di successiva pubblicazione,

verranno esaminati e discussi i primi risultati di laboratorio ottenuti sui materiali RPC 200 per i quali si prevede, a partire dal prossimo secolo, una vasta ed articolata applicazione grazie alle peculiari caratteristiche di resistenza meccanica e di tenacità che li contraddistinguono.

BIBLIOGRAFIA

- [1] D.M. Roy, "New Stronger Cement Materials: Chemically Bonded Ceramics", *Science*, 6, pag 651-658 (1987).
- [2] D.M. Roy, "Advanced Cement Systems Including CBC, DSP, MDF", 9th International Congress on the Chemistry of Cement, Vol. 1, pag 357-380, New Delhi (1992).
- [3] J. D. Birchall, A. J. Howard, K. Kendall, "Flexural Strength and Porosity of Cements", *Nature*, 289, pag. 388-390, 1981.
- [4] D. Richard e M.H. Cherezy, "Reactive Powder Concrete with High Ductility and 200-300 MPa Compressive Strength", Atti del Congresso "Concrete Technology: Past, Present and Future", Ed. P.K. Mehta, ACI SP-144, S. Francisco (1994).
- [5] H. H. Bache, "Densified Cement/Ultra-Fine Particle Based Materials", presentato a: Second International Conference on Superplasticizers in Concrete, 35 pagine, Ottawa (1981).
- [6] M. Collepariti, L. Coppola, "Il fumo di silice", Cap. III in "Materiali Innovativi per Malte e Calcestruzzi Speciali", Ed. Enco (1990).
- [7] F. Maso, "The bond between aggregate and hydrated cement paste", Atti del Seventh International Congress on the Chemistry of Cements, Vol. 1, pag. VII-1/3, VII-1/15, Editions Septima, Parigi (1980).
- [8] G. Tognon, "Durabilità del calcestruzzo: criteri generali. Il calcestruzzo nelle gallerie in presenza di acque solfatiche", Atti del Congresso "L'evoluzione della tecnologia del calcestruzzo in galleria", pag. 22-55, Milano (1992).
- [9] P.K. Mehta, "Concrete. Structures, Properties and Materials", Prentice-Hall, Englewood Cliffs (1986).
- [10] J.F. Young e H.M. Jennings, "Advanced cement-based materials", in *Cement and Concrete Science & Technology*, Vol 1, Part 1, pag 346-372, Ed. S.N. Ghosh (1993).