

**CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE**

COMMISSIONE DI STUDIO PER LA PREDISPOSIZIONE E L'ANALISI  
DI NORME TECNICHE RELATIVE ALLE COSTRUZIONI

**Studi preliminari finalizzati alla redazione di**

**Istruzioni per l'impiego di  
calcestruzzi ad alte prestazioni**



**CNR-DT 209/2012**

**Proprietà letteraria riservata  
del  
Consiglio Nazionale delle Ricerche**

**CNR-DT 209/2012**

## INDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUZIONE .....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>L'EVOLUZIONE DEI CALCESTRUZZI AD ALTE PRESTAZIONI.....</b>	<b>9</b>
2.1	GLI STUDI DI POWERS.....	9
2.2	GLI ADDITIVI SUPERFLUIDIFICANTI .....	9
2.3	INTRODUZIONE DELLE PRIME AGGIUNTE MINERALI .....	9
2.4	CALCESTRUZZI RPC .....	10
2.5	CALCESTRUZZI FIBRORINFORZATI .....	10
2.6	CALCESTRUZZI AUTOCOMPATTANTI .....	10
2.7	CALCESTRUZZI AUTOCOMPATTANTI FIBRORINFORZATI.....	11
2.8	DAI CALCESTRUZZI AD ALTA RESISTENZA AI CALCESTRUZZI AD ALTE PRESTAZIONI.....	12
2.9	NOTAZIONI MAGGIORMENTE DIFFUSE PER CALCESTRUZZI AD ALTE PRESTAZIONI.....	12
<b>3</b>	<b>COMPONENTI.....</b>	<b>15</b>
3.1	CEMENTO .....	15
3.2	AGGREGATI .....	16
3.3	ADDITIVI .....	18
3.4	AGGIUNTE MINERALI .....	20
3.5	FIBRE .....	21
3.6	ELEMENTI DI PROGETTAZIONE DELLE MISCELE (MIX-DESIGN) .....	22
<b>4</b>	<b>COMPORAMENTO MECCANICO .....</b>	<b>25</b>
4.1	COMPORAMENTO A COMPRESSIONE.....	25
4.2	COMPORAMENTO A TRAZIONE .....	25
4.3	MODULO DI YOUNG E MODULO DI POISSON .....	26
4.4	PROPRIETÀ TERMICHE .....	26
4.5	RITIRO .....	27
4.6	FENOMENI VISCOSI .....	27
4.7	SVILUPPO DELLA RESISTENZA NEL TEMPO .....	28
4.8	INGRANAMENTO DEGLI AGGREGATI .....	29
4.9	ADERENZA ACCIAIO-CALCESTRUZZO.....	29
<b>5</b>	<b>CRITERI PER LA DEFINIZIONE DELLE PRESTAZIONI .....</b>	<b>30</b>
5.1	DEFINIZIONE DELLE PRESTAZIONI.....	30
5.2	DURABILITÀ E CLASSI DI ESPOSIZIONE .....	32
5.3	COMPORAMENTO AL FUOCO .....	32
5.4	COMPORAMENTO ALLE ALTE VELOCITÀ DI DEFORMAZIONE .....	33
5.5	SELF HEALING .....	34
5.6	COMPATIBILITÀ MUTUA DELLE PRESTAZIONI.....	35
5.7	ESEMPI DI DEFINIZIONE DELLE PRESTAZIONI .....	36
<b>6</b>	<b>PRODUZIONE, MESSA IN OPERA E CONTROLLO DI CALCESTRUZZI AD ALTE PRESTAZIONI .....</b>	<b>39</b>
6.1	QUALIFICA DI CALCESTRUZZI AD ALTE PRESTAZIONI.....	39
6.2	PRODUZIONE DI CALCESTRUZZI AD ALTE PRESTAZIONI.....	39

---

6.3 CONSEGNA ED ACCETTAZIONE IN SITO .....	41
6.4 MESSA IN OPERA DI CALCESTRUZZI AD ALTE PRESTAZIONI.....	42
<b>7 INQUADRAMENTO NORMATIVO .....</b>	<b>45</b>
7.1 NORMATIVA ITALIANA .....	45
7.2 CNR-DT 204.....	45
7.3 ACI 363 R-92, ACI 441 R-96 ED ACI 237 R-07 .....	46
7.4 EUROCODICE 2.....	47
7.5 <i>FIB</i> MODEL CODE 2010 .....	47
<b>8 CALCESTRUZZI AD ALTE PRESTAZIONI E SOSTENIBILITÀ.....</b>	<b>49</b>
8.1 EMISSIONI DI CO <sub>2</sub> ED ALTRE EMISSIONI.....	50
8.2 DURABILITÀ DELLE STRUTTURE .....	50
8.3 FUNZIONALITÀ DELLE STRUTTURE .....	51
8.4 SICUREZZA DEGLI OCCUPANTI.....	52
8.5 RIUSO E RICICLO .....	52
8.6 COSTI ECONOMICI .....	53
8.7 I CALCESTRUZZI HPC NELLE PROCEDURE DI VALUTAZIONE DEL PROTOCOLLO ITACA.....	53
<b>RIFERIMENTI.....</b>	<b>55</b>

# 1 INTRODUZIONE

Il presente documento intende fornire un quadro sistematico delle diverse possibilità offerte dalla attuale tecnologia del calcestruzzo e dei compositi a matrice cementizia con riferimento ad un complesso di prestazioni chimico-fisico-meccaniche che ne caratterizzano il comportamento, tanto allo stato fresco, durante le fasi di getto, quanto allo stato indurito in opera, e che possono determinare le scelte dei progettisti e dei diversi operatori del settore in funzione delle previste applicazioni costruttive e strutturali.

Da un punto di vista storico, la richiesta di elevate prestazioni si è inizialmente concentrata principalmente sulla resistenza a compressione, tale essendo la richiesta dettata dalle due principali categorie di strutture in cui i calcestruzzi trovano le loro principali applicazioni: gli edifici alti ed i ponti di grande luce. Per entrambe le suddette applicazioni, infatti, un elevato rapporto resistenza/peso gioca un ruolo decisivo. Negli edifici alti l'impiego di calcestruzzi caratterizzati da resistenza a compressione elevata è giustificato dalla necessità di contenere le dimensioni degli elementi portanti verticali, sollecitati da carichi elevati, in modo da non limitare in maniera eccessiva la fruibilità degli spazi. Similmente, nei ponti di grande luce, attese le elevate sollecitazioni, l'impiego di calcestruzzi caratterizzati da alte resistenze consente di contenere le dimensioni degli elementi strutturali. Ciò contribuisce, anche nel caso di luci non elevate, ad un più armonico inserimento dell'opera nel contesto ambientale. Con riferimento agli edifici alti, uno dei primi esempi in ordine temporale, il grattacielo Two Union Square, di 226 m in altezza, realizzato a Washington (USA) negli anni 1987/1989, realizzato con un calcestruzzo dalla resistenza a compressione di 119 MPa a 28 giorni e 145 MPa a 91 giorni (Figura 1-1).

La varietà dei possibili impieghi, sia con riferimento alle suddette categorie di opere strutturali ed infrastrutturali, ma anche con riferimento ad applicazioni non esclusivamente ovvero non prevalentemente strutturali, ha ampliato la gamma delle prestazioni richieste al materiale "calcestruzzo" ed ha promosso lo sviluppo di un vasto insieme di compositi a matrice cementizia caratterizzati dalla capacità di fornire, al livello richiesto, una o più fra le prestazioni di seguito indicate, che superano il mero concetto di resistenza a compressione. Per le stesse categorie sopra citate degli edifici alti e dei ponti di grande luce, la richiesta di una elevata resistenza a compressione, eventualmente specificata anche a scadenze diverse dai 28 giorni e legate alla tempistica delle diverse fasi esecutive, si associa solitamente a prescrizioni differenti relative alle caratteristiche fisiche e meccaniche.

In ambito italiano si può citare l'esempio recente della Torre Intesa San Paolo a Torino, iniziata nel 2010 ed ancora in costruzione, che raggiungerà una altezza di 218 m con l'uso di calcestruzzi autocompattanti ed autolivellanti di classe C70/85 (Figura 1-2). In questo caso i tempi di presa sono stati modulati al fine di ottenere, per l'intera massa di calcestruzzo, tempi di indurimento sincroni evitando così il rischio di tensioni conseguenti a dilatazioni termiche differenziali. Parallelamente la resistenza richiesta è definita a 60 e non a 28 giorni. Tale progetto è stato improntato anche a criteri di sostenibilità socio-economica, in cui l'uso di un calcestruzzo, singolarmente più costoso, ha però ridotto i tempi di realizzazione e l'uso delle armature, conducendo ad un risparmio economico globale. In ultimo si ricorda la struttura attualmente più alta al mondo, il Burj Khalifa Tower, a Dubai, negli Emirati Arabi Uniti, iniziata nel 2004 e completata nel 2010. Questo grattacielo, con una altezza totale di 829 m, è stato realizzato con calcestruzzi autocompattanti ed autolivellanti caratterizzati da una resistenza a compressione di 60 MPa (Figura 1-3) e pompati fino a 600 m di altezza. Anche in questo caso, le prestazioni richieste al calcestruzzo non si limitavano alla resistenza, ma includevano particolari prescrizioni in termini di pompabilità e lavorabilità anche a quote così elevate dalla base del cantiere.



**Figura 1-1** –Two Union Square, Washington, USA, (1987/1989). Altezza: 226 m; resistenza a compressione: 131 MPa



**Figura 1-2** –Torre Intesa San Paolo, Torino, Italia, (2010/in costruzione). Altezza: 218 m; classe di resistenza: C70/85



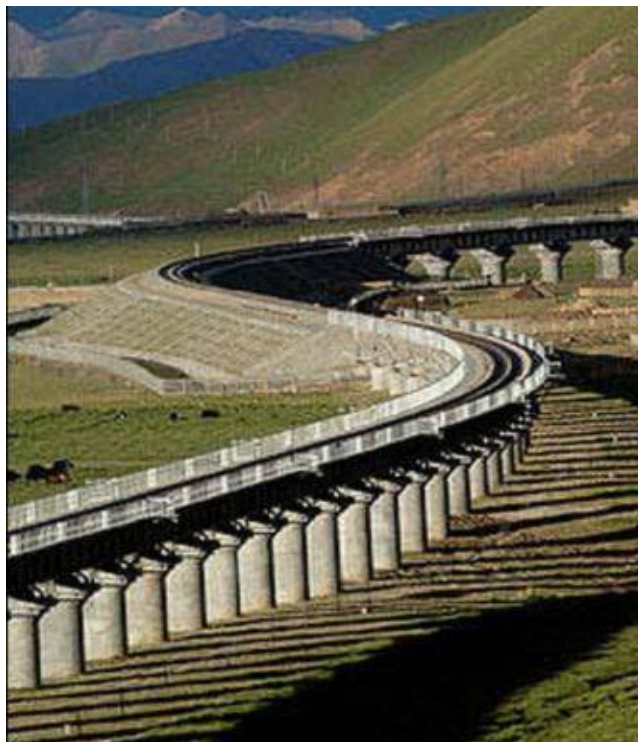
**Figura 1-3** –Burj Khalifa Tower, Dubai, United Arab Emirates, (2004/2010). Altezza: 829 m; resistenza a compressione: 60 MPa; pompato fino a 600 m di altezza

Similmente, nel campo dei ponti, gli esempi più significativi sono dati dallo Sherbrook Footbridge, una passerella pedonale realizzata in Canada nel 1997 con un calcestruzzo dalla resistenza a compressione di 200 MPa (Figura 1-4), seguito a breve distanza temporale dal Qinghai – Tibet Railway Bridge, un viadotto ferroviario realizzato in Cina, a circa 5000 m s.l.m., tra il 2001 ed il 2006 con un calcestruzzo avente resistenza a compressione pari a 150 MPa (Figura 1-5).



**Figura 1-4** –Sherbrook Footbridge, Canada (1997). Luce: 60 m, resistenza a compressione: 200 MPa





**Figura 1-5** –Qinghai – Tibet Railway Bridge, Cina (2001/2006). Resistenza a compressione: 150 MPa

Negli anni più recenti, calcestruzzi ad elevate prestazioni sono stati applicati in piastre di ancoraggio prefabbricate per la stabilizzazione attiva di pendii (Figura 1-6; di Prisco et al., 2010), solette da ponte, elementi di copertura in parete sottile, pilastri con acciaio ad alta resistenza.



**Figura 1-6** – Caslino d’Erba (CO), Italia, (2008) Graticci e piastre di ancoraggio realizzate in calcestruzzo autocompattante fibrorinforzato per la stabilizzazione attiva di pendii. Calcestruzzo C60–S5–12–XC4–F4–DH1–DS1 (UNI11039).

Accanto alla realizzazione di nuove strutture, diviene sempre più attuale ed urgente la necessità di procedere al ripristino di strutture ammalorate o danneggiate da eventi eccezionali ovvero di adeguare a rinnovati contesti normativi strutture esistenti progettate secondo normative obsolete. In tal



caso può emergere l'esigenza di contenere le dimensioni del rinforzo stesso sia per ragioni esecutive, funzionali ed estetiche, sia per motivazioni strettamente strutturali, legate alla volontà di non alterare i rapporti e le distribuzioni di rigidezza esistenti. Ciò ha portato allo sviluppo ed alla diffusione di diverse categorie di compositi cementizi ad elevate prestazioni, grazie all'aggiunta di fibre (metalliche o plastiche), nonché ad una "progettazione della composizione" (mix-design) basata su considerazioni di tipo micromeccanico. Questi materiali manifestano una elevata resistenza residua a in trazione, fino ad elevati valori di deformazione, che consente al materiale di fungere esso stesso da rinforzo, senza la necessità di disporre di apposite armature.

Un elenco puramente esemplificativo e certamente non esaustivo delle diverse prestazioni che possono essere richieste può comprendere:

- *la tenacità alla frattura*, includendo la capacità di preservare l'integrità del materiale a fronte di sollecitazioni indotte da eventi di tipo eccezionale (ad es. spalling esplosivo nel caso di incendio) o di velocità di deformazione molto elevate (in caso di esplosione);
- *la duttilità*;
- *le proprietà termiche e di resistenza al fuoco*, che vanno dalla diffusività e conducibilità termiche, al calore specifico, alla evoluzione delle caratteristiche fisiche e meccaniche, a caldo e residuali, dopo esposizione alle alte temperature, fino alla possibilità di mantenere la integrità evitando i fenomeni di spalling esplosivo;
- *la durabilità, nei suoi molteplici aspetti*, a fronte di condizioni di esposizione ambientale usuali o estreme, fino alla capacità di autoriparare le fessure (self healing) tanto per cause endogene (idratazione ritardata di materiale non idratato ovvero di materiali sostitutivi del cemento caratterizzati da attività pozzolanica o cementizia), quanto per cause esogene (batteri capaci di produrre idrosilicati di calcio);
- *il complesso delle prestazioni allo stato fresco*: esso può spaziare dalla semplice prescrizione di una buona lavorabilità, legata ad una facilità di posa in opera, alla richiesta di proprietà reologiche fondamentali comprese entro prefissati intervalli per poter, ad esempio, garantire la pompabilità fino a distanze e/o altezze elevate, contenendo e governando le perdite lungo il condotto di pompaggio (nel Burj Khalifa Tower di Dubai il calcestruzzo è stato pompato fino a 600 m di altezza) fino alla capacità, nel caso di compositi cementizi fibrorinforzati ad elevata fluidità, di orientare le fibre lungo la direzione del flusso di getto;
- *la sostenibilità*, che spazia dall'utilizzo di materiali riciclati all'interno del calcestruzzo alla possibilità di riciclare il materiale stesso al termine della sua vita utile fino all'unico concetto del calcestruzzo fotocatalitico ossia contenente, quale costituente della miscela, opportuni compositi (biossido di titanio) che, attraverso un processo fotocatalitico, sono in grado di assorbire l'anidride carbonica dell'ambiente circostante (Figura 1-7);
- *le qualità estetiche*;
- *le prestazioni energetiche*, sulle quali può agirsi in maniera significativa ed efficace inserendo fra i costituenti della miscela i cosiddetti materiali a cambiamento di fase (Phase Changing Materials, PCM; Meshgin and Xi, 2012).



**Figura 1-7** –Chiesa “Dives in Misericordia”, Roma, Italia, (1996/2003). Calcestruzzo bianco con biossido di titanio; resistenza a compressione: 40 MPa

Una estremizzazione del concetto di elevate prestazioni, disgiunto da quello di resistenza, è costituito dalla categoria, recentemente proposta da diversi ricercatori, dei cosiddetti “frangible concretes” (O’Neil et al., 2012) o “collapsible concretes” (Caverzan e Ferrara, 2012). Trattasi di materiali caratterizzati da bassissimi livelli di resistenza a compressione (talora anche inferiori ad  $1 \text{ N/mm}^2$ ), ma che, attraverso una opportuna progettazione dello scheletro granulare e della composizione della fase legante, sono in grado, a fronte di urti, impatti ed esplosioni, di dissipare una significativa quantità di energia attraverso la rottura dei legami intragranulari ed il riarrangiamento della mesostruttura, liberando inoltre detriti di piccolissime dimensioni e dunque di ridotta pericolosità.

A fronte della ampia gamma di prestazioni sopra citate, legate ad una altrettanto estesa varietà di possibili applicazioni, è necessario, per aumentare la consapevolezza delle diverse figure di operatori coinvolti nell’intero processo di progettazione e di costruzione, non solo specificare adeguatamente le diverse prestazioni e quantificarne in maniera inequivocabile il livello richiesto, ma anche disporre di prove che consentano di misurare e dunque garantire tale livello prestazionale.

Con riferimento alle diverse categorie di calcestruzzi attualmente disponibili, ed alle prestazioni che ciascuno di essi è in grado di fornire, si illustrerà lo stato delle conoscenze attuali ed il contesto normativo vigente nell’ambito del quale operare. Con specifico riferimento, quindi, alla progettazione strutturale si illustreranno i legami costitutivi ed i modelli meccanici da adoperare proposti in linee guida disponibili.

Per quanto riguarda i calcestruzzi fibrorinforzati si può fare riferimento al Documento Tecnico CNR DT 204 (2006); il presente documento, invece, si limita a richiamare sommariamente i principali concetti ivi introdotti.

## **2 L'EVOLUZIONE DEI CALCESTRUZZI AD ALTE PRESTAZIONI**

### **2.1 GLI STUDI DI POWERS**

Lo sviluppo dei calcestruzzi ad alte prestazioni è stato possibile grazie all'introduzione di importanti novità scientifiche e tecnologiche nell'industria del calcestruzzo. Dal punto di vista cronologico il primo importante passo è stato mosso dagli studi di Powers (1958), che negli anni '50 analizzò in dettaglio il rapporto tra la porosità del calcestruzzo, il rapporto acqua/cemento dell'impasto e la sua resistenza a compressione, teorizzando una resistenza a compressione massima pari a 250 MPa, in corrispondenza di una porosità nulla. Una forte riduzione del rapporto acqua/cemento consente di avere calcestruzzi molto resistenti, a discapito però della lavorabilità dell'impasto (Skalny et al., 1973).

### **2.2 GLI ADDITIVI SUPERFLUIDIFICANTI**

Questo problema viene però superato negli anni '70 (Collepari, 1976), con l'introduzione di additivi superfluidificanti, che consentono comunque di avere impasti lavorabili, anche adottando rapporti acqua/cemento bassi. L'efficacia degli additivi superfluidificanti, in termini di riduzione d'acqua e quindi di incremento della resistenza meccanica, aumenta con il loro dosaggio. Tuttavia, oltre un certo limite (2-3 % in peso sul cemento) non si registrano ulteriori benefici nella riduzione del rapporto acqua/cemento e si comincia ad avvertire una lieve riduzione nella resistenza meccanica provocata dalla raccolta d'acqua (bleeding) nella zona di transizione tra la matrice cementizia e gli aggregati lapidei, con il pericolo di portare l'agglomerato cementizio ad uno stato di potenziale segregazione compromettendo le proprietà fisico meccaniche.

### **2.3 INTRODUZIONE DELLE PRIME AGGIUNTE MINERALI**

La UNI EN 206-1 (2006), classifica le aggiunte nel calcestruzzo come aggiunte di tipo I e di tipo II. Entrambi i materiali sono caratterizzati da una elevata finezza, le aggiunte di tipo I (esempio filler provenienti dalla macinazione del carbonato di calcio) non hanno la proprietà di reagire con i prodotti che si ottengono dalla reazione di idratazione del cemento con l'acqua. Le aggiunte di tipo II sono, invece, caratterizzate da una più o meno spiccata attività pozzolanica, capaci, pertanto, di reagire con la calce della pasta cementizia idratata e formare composti idraulici che apportano incrementi alla resistenza meccanica dei calcestruzzi. Tra le aggiunte minerali si possono annoverare le ceneri volanti o fly ash, le loppe d'alto forno macinate, la silice fume o fumi di silice, i metacaolini, ecc. Il fumo di silice, per esempio, oltre che dalla già citata attività pozzolanica, è caratterizzato da una granulometria tra 0,01  $\mu\text{m}$  e 1  $\mu\text{m}$ , riesce ad allocarsi nei vuoti interstiziali presenti tra i granuli di cemento con il risultato di ottenere un sistema meno poroso, più densificato e quindi meccanicamente più resistente. Inoltre, l'introduzione del fumo di silice, riducendo il fenomeno di bleeding consente di ottimizzare il contenuto di additivi superfluidificanti nell'impasto, potendo quindi ridurre ulteriormente il rapporto acqua/cemento. L'elevata compattezza della microstruttura rende il calcestruzzo con le aggiunte minerali maggiormente resistente al degrado indotto da agenti esterni e quindi caratterizzato da una più elevata durabilità. Bache (1981) coniò per la prima volta il termine DSP (Densified with Small Particles) 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. Il risultato dell'introduzione di fumo di silice è un calcestruzzo in grado di superare i 120 MPa di resistenza a compressione.

## 2.4 CALCESTRUZZI RPC

A valle dell'introduzione del fumo di silice, avendo ottenuto quindi una forte riduzione della porosità, l'anello debole del calcestruzzo si sposta sugli aggregati che devono quindi essere sempre più densi e compatti (basalti, graniti, ecc.), con tessitura superficiale ruvida per favorire la massima adesione della matrice. Un'ulteriore innovazione è introdotta nel Reactive Powder Concrete (RPC) dove gli aggregati grossi vengono eliminati dall'impasto e vengono adoperate solo sabbie finissime (Richard e Cheyrezy, 1995). Questa peculiarità, insieme con altre caratteristiche dell'impasto, quali l'utilizzo di fumo di silice di dimensioni al di sotto del micron e l'impiego di microfibre d'acciaio, consente di raggiungere resistenze a compressione di almeno 200 MPa, da cui discende, per questi calcestruzzi, la definizione RPC 200. Un ulteriore sostanziale incremento della resistenza meccanica a compressione può essere ottenuto con una compattazione prolungata dell'impasto fresco sia durante la fase di confezionamento sia durante la fase di presa, unitamente ad un trattamento termico che consiste nel sottoporre il calcestruzzo indurito ad una temperatura fino a 400°C. In questi casi la resistenza meccanica a compressione può raggiungere il valore di 800 MPa dando luogo ai cosiddetti RPC 800. A causa di questi trattamenti così sofisticati, il processo di confezionamento degli RPC 800 assomiglia a quello di un materiale ceramico. Gli RPC 200, invece, possono essere gettati e stagionati utilizzando le stesse tecniche usualmente impiegate per la realizzazione delle strutture in calcestruzzo sia in cantiere che negli stabilimenti di prefabbricazione.

## 2.5 CALCESTRUZZI FIBRORINFORZATI

Molte formulazioni di calcestruzzi ad alte prestazioni prevedono l'impiego di impasti fibrorinforzati. L'utilizzo di fibre nei calcestruzzi è stato in realtà introdotto e studiato a partire dagli anni '70 (Shah e Rangan, 1971), essenzialmente con l'obiettivo di incrementare la tenacità, la duttilità e, in alcuni casi, la resistenza a trazione dei prodotti finali, e si è ulteriormente evoluto in numerosi prodotti, che adoperano differenti tipologie di fibre, di diverse dimensioni. Inevitabilmente, però, l'utilizzo di fibre è stato varie volte introdotto nello sviluppo di diverse varianti di calcestruzzi ad alte prestazioni, come ad esempio nel caso dei calcestruzzi RPC, con l'obiettivo, attraverso l'incremento di resistenza a compressione, di ottenere indirettamente anche un incremento di resistenza a trazione. Dall'impiego di fibre, derivano ad esempio i calcestruzzi HPFRC (High Performance Fiber Reinforced Concrete) e UHPFRC (Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete) e i calcestruzzi ECC (Engineered Cementitious Composites).

## 2.6 CALCESTRUZZI AUTOCOMPATTANTI

All'interno dei calcestruzzi ad alte prestazioni vanno considerati anche i calcestruzzi SCC (Self Compacting Concrete) o autocompattanti. Questi particolari calcestruzzi, caratterizzati da eccellente fluidità, alta resistenza alla segregazione, al fenomeno del bleeding e buona coesività, vengono oggi adoperati per getti in cui sia richiesta elevata lavorabilità, in presenza di armature fitte, per strutture a faccia vista di pregio, nelle pavimentazioni, ecc. Nati negli anni '70, si sono evoluti con l'introduzione di additivi fluidificanti sempre più efficaci. Gli impasti di calcestruzzi SCC, oltre alla presenza di additivi fluidificanti, prevedono l'impiego di aggregati più piccoli di quelli adoperati nei calcestruzzi ordinari, elevato dosaggio di cemento, impiego di fumo di silice e ceneri volanti. Evidentemente l'impasto adoperato per gli SCC porta a calcestruzzi poco porosi, caratterizzati, oltre che dalle particolari caratteristiche reologiche, da una elevata resistenza meccanica. Ad ogni modo, a parità di resistenza con altri calcestruzzi ad alte prestazioni, non essendo la resistenza il parametro per il quale vengono progettati, il costo degli SCC sarà più elevato.

L'eliminazione delle attrezzature per la vibrazione riduce gli oneri di messa in opera e migliora le condizioni ambientali in cantiere e nelle aree circostanti, attraverso la riduzione dei danni da esposizione dei lavoratori al rumore ed alle vibrazioni. La fluidità e la resistenza alla segregazione dell'SCC assicurano alti livelli di omogeneità, minimo contenuto di vuoti ed uniforme resistenza del

calcestruzzo oltre a superiori livelli di finitura e durabilità delle strutture. Rispetto ai calcestruzzi ordinari, gli SCC offrono la possibilità di più alte velocità di getto (compatibilmente con il costo dei casseri) e tempi di costruzione più brevi. Le migliori prestazioni e condizioni di lavoro hanno reso l'SCC un'interessante soluzione sia per l'industria della prefabbricazione che per quella del calcestruzzo preconfezionato.

Al confronto con i calcestruzzi ordinari i principali vantaggi del calcestruzzo autocompattante possono essere così sintetizzati:

- minor tempo di posa in opera e tempi di costruzione ridotti;
- riduzione della manodopera per le operazioni di compattazione;
- assenza di vibrazioni;
- posa in opera semplificata;
- riduzione dei livelli di rumore in cantiere per assenza delle operazioni di costipamento;
- ambiente di lavoro più sano;
- completo ed omogeneo riempimento dei casseri anche nel caso di strutture fittamente armate (no blocking), casseforme complesse, sezioni ristrette e ostacoli in generale;
- maggior durabilità;
- assenza di difetti (segregazione e nidi di ghiaia) legati alla non adeguata compattazione;
- miglior finitura superficiale e resa estetica (assenza di pori e difetti superficiali in genere);
- maggiore libertà di progettazione;
- possibilità di realizzare sezioni trasversali ridotte e strutture più snelle.

Per contro, gli aspetti critici legati all'uso dell'SCC rispetto al calcestruzzo ordinario riguardano:

- il tendenziale maggior costo dell'SCC rispetto a calcestruzzi ordinari di pari resistenza;
- le maggiori spinte esercitate dagli SCC sui casseri e le conseguenti maggiori spese per la loro realizzazione (calibrazione delle velocità e delle altezze di getto);
- l'assenza di modelli validati per un'adeguata previsione di queste spinte;
- l'assenza di modelli pienamente validati per la previsione dei valori del modulo elastico e dei fenomeni lenti (creep e ritiro);
- la maggior attenzione richiesta nella selezione dei materiali;
- la maggior cura necessaria nel proporzionamento e progetto delle miscele (mix design);
- i più alti livelli di conoscenza, organizzazione ed esperienza necessari sia negli impianti di produzione che in cantiere;
- la tendenza a manifestare maggiore ritiro plastico.

## **2.7 CALCESTRUZZI AUTOCOMPATTANTI FIBRORINFORZATI**

Uno dei maggiori vantaggi derivanti dall'aggiunta di fibre in una matrice di calcestruzzo autocompattante consiste nella possibilità di ottenere, grazie alla eliminazione delle operazioni di compattazione e/o vibrazione meccanica o manuale ed alla stabilità reologica della matrice stessa, una dispersione delle fibre uniforme all'interno di un getto (Grunewald, 2004; Ferrara e Meda, 2006; Ozyurt et al., 2007; Ferrara et al., 2008). Tale requisito risulta di importanza fondamentale per garantire una affidabile prestazione strutturale di elementi realizzati con calcestruzzi fibrorinforzati. Infatti, una esecuzione impropria delle operazioni di getto e compattazione, rese altresì più complicate dagli effetti negativi che le fibre possono avere sulla lavorabilità del calcestruzzo (Bayasi e Soroushian, 1992), può portare ad una dispersione delle fibre non uniforme, con agglomerati di fibre in alcune zone accanto ad altre del tutto prive del rinforzo fibroso. In entrambi i casi tali difetti possono influire negativamente sulla prestazione strutturale, attivando meccanismi di rottura non previsti in fase progettuale.

Recentemente, è stato altresì dimostrato che, attraverso una prestazione allo stato fresco adeguatamente “progettata”, le fibre possono essere efficacemente orientate lungo la direzione del flusso di getto (Ozyurt et al., 2006; Stahli et al., 2008; Barnett et al., 2010; Ferrara et al., 2011; Boulekbache et al., 2010, 2012). In tal modo, finalizzando il procedimento di getto alla prevista applicazione strutturale, si può fare in modo che la direzione del flusso del calcestruzzo fresco, lungo la quale le fibre tendono ad allinearsi, venga a coincidere, per quanto possibile, con la direzione delle tensioni principali di trazione nell’elemento strutturale in opera. Ciò porta ad un impiego strutturale del materiale più efficace e dunque ad un miglioramento della prestazione strutturale complessiva, da cui può conseguirsi anche una ottimizzazione delle dimensioni (e dunque dei pesi propri) degli elementi strutturali. Da ciò, evidentemente, possono aversi ulteriori benefici in termini di maggiore rapidità ed economicità dell’intero processo costruttivo, ivi compresi, ad esempio nel caso di impieghi per elementi prefabbricati, i costi di trasporto, sollevamento ecc.

L’influenza della dispersione e dell’orientamento delle fibre, quali influenzati dal procedimento di getto, sulle proprietà meccaniche del materiale rappresenta una caratteristica distintiva del calcestruzzo fibrorinforzato autocompattante rispetto al calcestruzzo fibrorinforzato ordinario, che va adeguatamente tenuta in conto nel complesso delle prestazioni richieste al materiale. A tal fine è necessario un attento controllo della composizione della miscela (Ferrara et al., 2007), finalizzato all’ottenimento di un prefissato livello di prestazioni allo stato fresco che consenta di orientare le fibre lungo la direzione del flusso di getto, anche in funzione della geometria strutturale. Una efficace implementazione di tale tecnologia a livello industriale (Martinie e Roussel, 2011) pure deve accompagnarsi allo sviluppo di adeguate metodologie di rilievo non distruttivo della dispersione e dell’orientamento delle fibre negli elementi strutturali (Van Damme et al., 2004; Ozyurt et al., 2006; Lataste et al., 2008; Faifer et al., 2011), nonché, ad una calibrazione della dipendenza delle proprietà meccaniche del materiale, in special modo della tenacità, dalle suddette variabili (Ferrara et al., 2010, 2012a,b).

## **2.8 DAI CALCESTRUZZI AD ALTA RESISTENZA AI CALCESTRUZZI AD ALTE PRESTAZIONI**

I passaggi fin qui descritti rappresentano le principali innovazioni introdotte nella composizione del calcestruzzo per ottenere elevate resistenze. Ulteriori innovazioni nell’impasto, nella composizione degli ingredienti e nella lavorazione sono state in realtà introdotte negli anni, dando luogo a diverse sigle e definizioni. L’intento di questo paragrafo è comunque quello di chiarire il processo di evoluzione principale, al fine di agevolare al lettore la comprensione di qualsivoglia ulteriore derivazione e tipologia di calcestruzzo ad alte prestazioni. Si intende infine chiarire la differenza tra calcestruzzi ad alta resistenza (HSC, High Strength Concrete) e calcestruzzi ad alte prestazioni (HPC, High Performance Concrete). Il primo termine è stato storicamente sostituito dal secondo negli anni ‘80, con l’introduzione negli impasti del fumo di silice. Questo passaggio, infatti, ha consentito una notevole riduzione della porosità, apportando notevoli benefici tra cui una maggiore protezione dal degrado dovuto agli agenti esterni e quindi una maggiore durabilità, una maggiore resistenza alla fatica, una maggiore resistenza agli effetti di cicli gelo-disgelo; inoltre la possibilità di adoperare maggiori quantità di additivi fluidificanti ha determinato un incremento anche della lavorabilità. Il raggiungimento di più elevate prestazioni sia fisiche che meccaniche ha fatto sì che, correttamente, questi calcestruzzi venissero definiti come calcestruzzi ad alte prestazioni e non, in maniera limitativa, calcestruzzi ad alta resistenza.

## **2.9 NOTAZIONI MAGGIORMENTE DIFFUSE PER CALCESTRUZZI AD ALTE PRESTAZIONI**

Di seguito si riportano le principali notazioni ed acronimi relativi ai calcestruzzi ad alte resistenze e prestazioni, con relativa definizione.



- *HPC (High Performance Concrete)*: calcestruzzi ad alte prestazioni. Introdotta negli anni 80, si differenzia dalla definizione dei calcestruzzi ad alta resistenza HSC per la volontà di caratterizzare esplicitamente i calcestruzzi non solo per le resistenze meccaniche ma anche per le altre proprietà, comunque dovute alla bassa porosità.
- *UHPC (Ultra High Performance Concrete)*: calcestruzzi caratterizzati da prestazioni particolarmente elevate.
- *HSC (High Strength Concrete)*: calcestruzzi ad alta resistenza. Introdotta negli anni '70, questa definizione viene poi superata da quella di calcestruzzi ad alte prestazioni HPC.
- *RPC (Reactive Powder Concrete)*: particolare categoria di calcestruzzi HPC, caratterizzata dall'assenza di aggregati grossi e dalla presenza di sabbie finissime, oltre ad aggiunta di minerali e fibre. Possono essere distinti in calcestruzzi RPC 200, maturati a temperatura ambiente in grado di raggiungere 200 MPa di resistenza a compressione e calcestruzzi RPC 800, maturati in forno, in grado di raggiungere 800 MPa di resistenza a compressione.
- *DSP (Densified with Small Particles)*: definizione spesso associata ai calcestruzzi RPC, che intende evidenziare la granulometria particolarmente densa di questi calcestruzzi.
- *FRC (Fiber Reinforced Concrete)*: definizione generica relativa a calcestruzzi fibrorinforzati.
- *HPFRC (High Performance Fiber Reinforced Concrete)*: calcestruzzi fibrorinforzati ad alte prestazioni.
- *UHPFRC (Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete)*: calcestruzzi fibrorinforzati ad alte prestazioni, caratterizzati da comportamento a trazione incoerente fino a valori di deformazione significativi (fino a  $5-8 \cdot 10^{-3}$ ).
- *ECC (Engineered Cementitious Composites)*: calcestruzzi fibrorinforzati con un quantitativo ed una tipologia di fibre progettato a livello micromeccanico, tale da conferire ai calcestruzzi una elevatissima duttilità, sacrificando la resistenza a trazione (nell'ordine di 3-5 MPa).
- *SCC (Self Compacting Concrete)*: calcestruzzi autocompattanti ed autolivellanti, adoperati per getti in cui sia richiesta elevata lavorabilità o particolare uniformità delle superfici. Più precisamente, per SCC si intende un calcestruzzo fluido e resistente alla segregazione che, senza necessità di vibrazione durante il getto, è capace di fluire sotto il proprio peso riempiendo completamente le casseforme e raggiungendo una completa compattazione anche in presenza di armature congestionate.

In questa sezione si riportano anche i principali termini e definizioni più ricorrenti nell'ambito della tecnologia dei calcestruzzi autocompattanti (e non solo) con una breve descrizione del loro significato:

- *Aggiunta*: materiale inorganico finemente suddiviso usato nel calcestruzzo per migliorarne specifiche proprietà o per ottenerne di speciali. Le linee guida Europee si riferiscono a due tipi di addizioni inorganiche, rispettivamente definite nella UNI EN 206-1 (2006) come addizioni strettamente inerti (Tipo I) e addizioni pozzolaniche o semi idrauliche (Tipo II).

- *Additivo*: materiale aggiunto durante il processo di mescolamento del calcestruzzo (in bassissima percentuale rispetto alla massa del binder) per modificare le proprietà del calcestruzzo fresco o indurito.
- *Legante (binder)*: cemento e combinazione di cemento e di aggiunte Tipo II.
- *Capacità di riempimento (Filling ability)*: capacità del calcestruzzo fresco di fluire in tutti gli spazi di una cassaforma e riempirli sotto l'effetto del proprio peso senza vibrazione esterna.
- *Fini o polveri*: materiali con dimensione delle particelle inferiore a 0,125 mm (non solo come frazione del cemento ma anche di aggiunte ed aggregati).
- *Fluidità (Fluidity o Flowability)*: facilità nel fluire del calcestruzzo fresco in condizioni libere (non confinato dalle casseforme e/o dalle armature).
- *Malta*: frazione di calcestruzzo comprendente la pasta più gli aggregati di dimensione inferiori ai 4 mm.
- *Pasta*: frazione del calcestruzzo composta da polveri, acqua, aria e additivi.
- *Capacità di attraversamento (Passing ability)*: capacità del calcestruzzo fresco di fluire attraverso piccole aperture (come gli spazi tra le armature) senza fenomeni di segregazione o blocking.
- *Robustezza*: capacità del calcestruzzo di mantenere le sue proprietà allo stato fresco (reologiche) anche per piccole variazioni nelle proprietà o quantità dei materiali costituenti.
- *Resistenza alla segregazione*: capacità del calcestruzzo di rimanere omogeneo in composizione durante il suo stato fresco.
- *Slump-Flow*: diametro che misura lo spandimento del calcestruzzo come risultato del test che porta questo stesso nome e che viene condotto utilizzando il cono di Abrams.
- *Superfluidificante*: additivo aggiunto al calcestruzzo per ottenere alta fluidità degli impasti in combinazione a bassi valori del rapporto acqua/cemento.
- *Tixotropia*: tendenza di un materiale a perdere progressivamente fluidità se lasciato indisturbato in uno stato di riposo, associata alla capacità di tornare alla fluidità iniziale dopo l'applicazione di energia.
- *Viscosità*: resistenza di un materiale al moto fluido nel mentre tale moto ha luogo. La viscosità è qualitativamente apprezzata attraverso la misura del tempo necessario ad una quantità standard di calcestruzzo a fluire in condizioni libere (tempo T50 durante lo slump-flow test e tempo di efflusso nel V-Funnel test).
- *VMA (Viscosity Modifying Agent)*: additivo modificatore della viscosità (conferisce più coesione all'impasto e maggior resistenza alla segregazione).

### 3 COMPONENTI

Conformemente alla UNI EN 206-1 (2006), i materiali costituenti gli HPC possono essere gli stessi di quelli usati per il confezionamento del calcestruzzo ordinario. Rispetto ai calcestruzzi tradizionali, per ottenere prestazioni uniformi e costanti negli HPC, occorrono maggiori cure nella scelta, nella caratterizzazione e nel continuo monitoraggio delle proprietà dei componenti utilizzati. Ciò per consentire una maggiore efficacia nella progettazione della miscela di calcestruzzo.

E' qui doveroso sottolineare che il presupposto ineludibile per un'efficace progettazione di miscela è la chiara definizione di requisiti prestazionali. Quelli basilari sono ben classificati nella norma UNI EN 206-1 (2006) e UNI EN 206-9 (2010); quelli aggiuntivi, e più specifici per HPC, sono approfonditi più avanti, nel capitolo 5 del presente documento.

È anche utile ricordare che la produzione di HPC è in genere caratterizzata da uno scarto quadratico medio di processo più elevato rispetto alla produzione dei calcestruzzi ordinari. Pertanto, la resistenza media di progetto di un calcestruzzo ad alta resistenza si dovrebbe attestare su valori adeguati: a titolo di esempio, per un C70/85 la resistenza target dovrebbe essere progettata con almeno un margine di sicurezza da 15 a 20 MPa.

Il progetto della miscela da parte del tecnologo (mix design) ha lo scopo di individuare i corretti rapporti quantitativi tra i componenti, idonei al raggiungimento delle prestazioni fisico-meccaniche e reologiche definite dal progettista. L'attività di progettazione della miscela consiste poi nella continua ottimizzazione nel tempo della miscela stessa, in funzione delle fisiologiche variazioni delle proprietà dei componenti e delle condizioni operative.

In letteratura, si possono reperire numerosi articoli riguardanti le metodologie di mix design dei calcestruzzi ordinari e autocompattanti, così come informazioni e prescrizioni autorevoli si possono trovare nelle raccomandazioni di numerose associazioni e di enti normativi di diversi Paesi Europei. Di seguito si riportano alcune note sintetiche in merito ai principali costituenti, individuandone le principali caratteristiche tecniche d'interesse per la produzione di HPC e segnalandone pregi e difetti per soddisfare pienamente i requisiti prestazionali.

#### 3.1 CEMENTO

Lo studio della progettazione dei calcestruzzi ad alta resistenza prevede un'attenta valutazione delle prestazioni meccaniche dei cementi idonei all'ottenimento delle caratteristiche di resistenza a compressione richieste.

I calcestruzzi ad alta resistenza richiedono l'impiego di cementi ad alta resistenza meccanica. La normativa europea distingue, come è noto, tre classi di resistenza a compressione dei leganti idraulici, come riportato in Tabella 3-1, tratta dalla UNI EN 197-1 (2011), aggiornamento della norma UNI EN 197-1 (2006).

		2 giorni	7 giorni	28 giorni	
32,5	L*	-	$\geq 12,0$	$\geq 32,5$	$\leq 52,5$
	N	-	$\geq 16,0$		
	R	$\geq 10,0$	-		
42,5	L*	-	$\geq 16,0$	$\geq 42,5$	$\leq 62,5$
	N	$\geq 10,0$	-		
	R	$\geq 20,0$	-		
52,5	L*	$\geq 10,0$	-	$\geq 52,5$	-
	N	$\geq 20,0$	-		
	R	$\geq 30,0$	-		

\* Classi di resistenza definite esclusivamente per cementi di tipo III

**Tabella 3-1** –Classi di resistenza a compressione dei leganti idraulici.

Tutti i cementi conformi alla UNI EN 197-1 (2011) possono essere usati. In questo caso, come per i calcestruzzi ordinari, la corretta scelta del tipo di cemento è normalmente dettata da richieste legate a specifiche applicazioni: per getti massivi, ad esempio, possono essere richiesti calori di idratazione ridotti; particolari esigenze tecnologiche possono invece essere legate, ad esempio, all'industria della prefabbricazione. I cementi più idonei sono certamente quelli aventi una classe di resistenza a compressione in malta plastica di 52,5 MPa. La scelta, però, della corretta classe del cemento da impiegare nelle ricette deve essere considerata in funzione di particolari specifiche o condizioni di getto, quali, ad esempio, un determinato sviluppo della resistenza nel tempo, la sezione dell'elemento strutturale, la tipologia di getto anche in funzione dei mezzi di posa che saranno utilizzati dall'impresa costruttrice per il getto del calcestruzzo.

Unitamente a tali esigenze, che condizionano la scelta del legante e del mix design dei calcestruzzi ad alte prestazioni, si deve necessariamente ricordare che l'aumento del contenuto di cemento per il raggiungimento di bassi rapporti acqua/cemento, comporta un innalzamento della temperatura del calcestruzzo dovuto alla reazione di idratazione, esotermica, tra il cemento e l'acqua. L'aumento della temperatura del conglomerato cementizio, se non considerato nel momento dello studio della ricetta, può provocare fenomeni di fessurazione di origine termica, compromettendo l'omogeneità e la monoliticità del getto, con gravi ripercussioni sulla durabilità dei manufatti e con costosi interventi di riparazione. Queste potenziali pericolosità richiedono, soprattutto per manufatti di un certo spessore, uno studio accurato e attento sulla metodologia di maturazione e protezione dei getti, come si ricorderà più avanti.

Pertanto, dopo aver condotto un esame approfondito, con il progettista, Direzione Lavori (DL) e impresa esecutrice, avente lo scopo di definire ulteriori caratteristiche reologiche e prestazionali del calcestruzzo in esame, anche in funzione della specificità di applicazione, lo studio da parte del tecnologo del calcestruzzo può essere esteso anche a cementi aventi una classe di resistenza inferiore ai 52,5 MPa, facendo ampio impiego di aggiunte minerali, aventi spiccate attività pozzolaniche, conformi alla UNI EN 206-1 (2006).

In tal caso è doveroso chiarire che le Norme Tecniche per le Costruzioni, NTC, (MIN.LL.PP, DM 14 gennaio 2008) ammettono la verifica, e/o il raggiungimento di determinate resistenze caratteristiche prescritte, anche a tempi di stagionatura dei calcestruzzi diversi dai 28 giorni canonici per la valutazione e la conformità ai requisiti prestazionali di progetto.

A meno di particolari esigenze progettuali, nel caso dei calcestruzzi ad alta resistenza si può, quindi, pensare di superare i 28 giorni di stagionatura posticipando la verifica dei livelli prestazionali a 56 o 84 giorni di stagionatura.

### 3.2 AGGREGATI

Nel caso della produzione dei calcestruzzi ad alta resistenza, i materiali lapidei devono essere oggetto di particolari analisi, non solo in termini di curve granulometriche, ma anche di resistenza

meccanica. Gli aggregati devono essere certamente conformi, con relativa certificazione CE, alla UNI EN 12620 (2008), e ai requisiti richiesti dalla UNI 8520-1(2005) e UNI 8520-2 (2005), unitamente alla UNI 8520-22 (2002) per la verifica delle espansioni accelerate dei provini di calcestruzzo, dovute alla potenziale reattività tra gli alcali contenuti nel cemento e certe forme di silice reattive presenti negli aggregati.

Gli aggregati occupano una quota rilevante, in termini volumetrici, nella micro e macro struttura della miscela, e la loro qualità, sia fisica che meccanica, influenza anche le proprietà fisico-meccaniche finali del conglomerato cementizio.

In particolare, nella scelta tra i diversi potenziali materiali vanno tenuti presenti la forma e la natura dei vari aggregati, incluso il loro diametro massimo, e l'aspetto prestazionale, cioè la loro resistenza meccanica.

L'aumento della resistenza meccanica e del modulo di elasticità della matrice cementizia, mediante l'abbassamento dei rapporti acqua/cemento (a/c) o acqua/polveri (a/p), come verrà chiarito più avanti, richiede parallelamente anche un aumento delle proprietà fisico-meccaniche dell'aggregato impiegato.

La zona di transizione, identificata come quella parte della micro struttura in cui vi è l'adesione tra pasta o matrice cementizia e superficie esterna degli aggregati, rappresenta al contempo la zona più "debole" dalla quale si propagano le micro fessurazioni nel momento in cui il calcestruzzo viene sollecitato.

Per aumentare le capacità di adesione aggregato-pasta o matrice cementizia si deve fare impiego di filler e di aggiunte minerali, unitamente all'impiego di diametri massimi contenuti, che vanno, in genere, dai 12 ai 20 mm.

La riduzione del diametro massimo dell'aggregato è necessaria in relazione alla densità delle barre d'armatura, generalmente piuttosto elevata nel caso di manufatti costruiti con conglomerati cementizi ad alte prestazioni meccaniche.

I diametri massimi ridotti degli aggregati permettono non solo una posa in opera più agevole, ma anche il raggiungimento di una ottima omogeneità del calcestruzzo all'interno dei getti, evitando eventuali fenomeni di "blocking" nei punti più critici nelle sezioni dell'elemento strutturale, dove l'attraversamento del conglomerato tra i ferri d'armatura potrebbe portare ad una segregazione del calcestruzzo.

Per gli aggregati utilizzabili nella produzione di SCC valgono le stesse regole e disposizioni previste per i calcestruzzi ordinari. I normali aggregati (non leggeri) sono quelli conformi alla UNI EN 12620 (2008) e che incontrano i principi di durabilità della UNI EN 206-1 (2006). Gli aggregati leggeri sono quelli conformi alla UNI EN 13055-1 (2003). Nelle operazioni di mix-design per l'SCC, le particelle d'aggregato minori di 0,125 mm in diametro contribuiscono alla somma totale delle polveri. Per la produzione di SCC di qualità costante occorre un monitoraggio continuo degli aggregati in merito a:

- contenuto d'acqua;
- assorbimento d'acqua;
- gradazione e contenuto degli aggregati fini.

Occorre porre attenzione all'uso dell'inerte leggero, secondo la norma UNI EN 13055-1 (2003). L'aggregato leggero, infatti, deve essere opportunamente combinato: data la bassa viscosità dell'SCC, l'inerte di densità normale tende ad affondare (segregazione), mentre quello leggero tende a galleggiare; questa seconda eventualità non è rilevata dal test di segregazione.

La massima dimensione dell'aggregato è condizionata dal valore dell'intraferro (spazio libero tra le armature in opera); attraverso uno specifico test (L-Box test), può essere accertata la tendenza al bloccaggio degli aggregati (blocking) tra le armature e la "passing ability" dell'SCC. La forma e la distribuzione granulometrica della ghiaia influenzano la passing ability e la richiesta di pasta di cemento; aggregati più tondeggianti migliorano/riducono il blocking e migliorano la scorrevolezza

dell'impasto. L'influenza dell'aggregato fine (le sabbie) sulle proprietà dell'SCC fresco è notevolmente superiore rispetto all'aggregato grosso. La parte con diametro minore di 0,125 mm costituisce il fino da considerare tra le polveri per il calcolo del rapporto acqua/polveri. Ad alti volumi di pasta corrisponde un ridotto attrito interno tra i grani di sabbia; per quest'ultima va comunque garantita una buona distribuzione granulometrica e l'utilizzo di "sabbie tagliate" può aiutare ad ottimizzare le curve degli aggregati e limitare la richiesta di pasta.

### **3.3 ADDITIVI**

La particolare tipologia delle strutture realizzate con calcestruzzi HPC richiede di solito un'alta fluidità, con classi di consistenza di almeno S5. La tecnologia di progettazione degli HPC, inoltre, prevede di solito alti dosaggi di cemento, di aggiunte e di additivi, con una proporzione pasta/aggregati che si avvicina al campo di progettazione degli SCC. Per questo motivo sempre maggiori quantità di HPC al giorno d'oggi sono realizzate e messe in opera con consistenza autocompattante in conformità alla norma UNI EN 206-9 (2010).

I calcestruzzi ad alta resistenza e basso rapporto acqua/polveri sono caratterizzati da elevate viscosità della matrice cementizia, tali da creare non pochi problemi nella compattazione all'interno dei casseri da parte delle imprese esecutrici. Le esperienze del Nord Europa, riferite in particolare alla costruzione delle stazioni petrolifere off-shore, ben testimoniano tali difficoltà. Ciò spinge ancor più i progettisti e le imprese a orientarsi verso calcestruzzi autocompattanti ad alta fluidità (classi di Slump-Flow SF2 e SF3) e costringe all'utilizzo degli additivi.

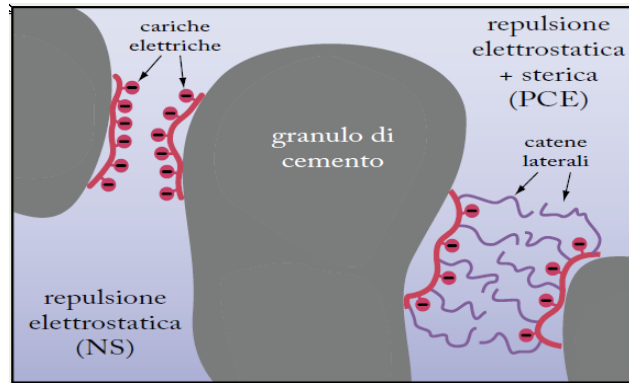
#### **3.3.1 Superfluidificanti**

Gli additivi più utilizzati sono i *superfluidificanti*, conformi alla UNI EN 934-2 (2009), che rappresentano un componente assolutamente essenziale del calcestruzzo autocompattante perché sono capaci di:

- ridurre drasticamente la richiesta d'acqua a parità di slump o di spandimento;
- incrementare notevolmente la fluidità a parità di rapporto a/c;
- consentire il raggiungimento di rapporti a/c particolarmente bassi, che in loro assenza condurrebbero ad impasti non soltanto poco fluidi, ma addirittura dall'aspetto quasi asciutto.

I superfluidificanti sono polimeri idrosolubili, per lo più poli-naftalen-solfonati, poli-melammin-solfonati, poli-carbossilati o poli-acrilici. Gli ultimi due tipi sono relativamente più recenti e generalmente più efficaci. Il principale effetto dei superfluidificanti è quello deflocculante: esso migliora la dispersione (e quindi facilita il movimento) delle particelle solide attraverso due diversi fenomeni: per repulsione elettrostatica o per allontanamento (impedimento sterico). Gli additivi policarbossilati o poliacrilici di ultima generazione hanno permesso un vero e proprio salto qualitativo dal punto di vista dello studio reologico delle miscele grazie alla presenza di rami laterali della molecola che costituiscono una sorta di ingombro sterico nella matrice cementizia come evidenziato in Figura 3-1.





**Figura 3-1** –Repulsione elettrostatica e sterica

L'impiego di questa tipologia innovativa di additivi ha permesso un'apprezzabile diminuzione della tensione limite di scorrimento,  $\tau_0$ , della pasta, secondo il modello di Bingham per fluidi plastici, permettendo un più facile scorrimento della miscela anche con contenuti d'acqua ridottissimi. Laddove si impieghi un additivo superfluidificante per aumentare la fluidità dell'impasto a parità di altri fattori, si dovrà aver cura di ottimizzare la progettazione della miscela per evitare i più comuni effetti collaterali: tendenza all'essudazione e alla segregazione ed eccessiva sensibilità alle minime variazioni di contenuto d'acqua. Qualora si utilizzi invece l'additivo superfluidificante per diminuire la quantità d'acqua a parità di altri fattori, si dovrà vigilare affinché l'impasto non diventi troppo viscoso e non sia caratterizzato da uno scorrimento eccessivamente lento. In linea generale, chi progetta la miscela di un HPC cercherà di ottenere entrambi i vantaggi dell'uso di un buon superfluidificante in modo ponderato, studiando gli effetti reologici di ogni sua decisione, consapevole che le proprietà del calcestruzzo fresco (non ultimo il mantenimento nel tempo della lavorabilità) sono assai critiche e spesso le più difficili da ottenere. I vantaggi di un corretto uso dell'additivo superfluidificante comprendono anche alcuni importanti miglioramenti a parità di resistenza e fluidità, come conseguenza di una contemporanea riduzione dell'acqua e del cemento, ovvero:

- la riduzione del ritiro igrometrico;
- la riduzione dei gradienti termici;
- la riduzione del creep e delle altre deformazioni differite nel tempo.

### 3.3.2 Altri additivi

I *modificatori di viscosità*, indicati con la sigla VMA possono essere progettati con quantità ridotte di parti finissime e modesti volumi di pasta, per:

- ridurre la tendenza alla segregazione e all'essudazione;
- ridurre la sensibilità dell'impasto alle piccole variazioni di dosaggio effettivo d'acqua, ottenendo così una maggior robustezza.

Altri additivi infine possono essere utilmente utilizzati negli HPC con gli stessi accorgimenti che devono essere adottati nella produzione di calcestruzzi ordinari, ovvero:

- *aeranti*, per inglobare in modo controllato nel calcestruzzo un sistema di microbolle d'aria che aumenta la resistenza ai cicli di gelo e disgelo;
- *acceleranti*, per diminuire i tempi di idratazione e di indurimento quando questi siano eccessivi per motivi climatici o per l'uso di componenti che ritardano lo sviluppo delle resistenze;
- *ritardanti*, per ottenere ritardi di idratazione e di indurimento specialmente nei climi caldi, oppure per prolungare ulteriormente i tempi di mantenimento della lavorabilità;

- *antiritiro*, Shrinkage Reduction Admixture (SRA), per consentire una maturazione più “protetta” al calcestruzzo, attraverso il rallentamento dei fenomeni capillari che portano alla perdita d’acqua per evaporazione e al conseguente ritiro.

### 3.4 AGGIUNTE MINERALI

Al paragrafo 2.3 si sono elencate alcune tipologie di aggiunte e la loro importanza nel confezionamento dei calcestruzzi ad alte prestazioni.

L’impiego delle aggiunte minerali nel confezionamento dei calcestruzzi ad alte prestazioni, specialmente autocompattanti, è spesso indispensabile.

Esse sono comunemente usate per:

- aumentare la coesione e l’omogeneità degli impasti ad alta fluidità;
- aumentare la resistenza alla segregazione sia in condizioni di riposo che durante lo spandimento del calcestruzzo.

Come nei calcestruzzi ordinari, anche negli HPC, le aggiunte possono aiutare a moderare il contenuto di cemento in modo da ridurre il calore di idratazione e i fenomeni fessurativi.

Come già ricordato, la norma UNI EN 206-1(2006) definisce l’aggiunta come un materiale finemente suddiviso, usato allo scopo di migliorare certe proprietà o di ottenere proprietà speciali, e considera due tipi di aggiunte inorganiche:

- aggiunte praticamente inerti (tipo I);
- aggiunte pozzolaniche o ad attività idraulica latente (tipo II).

#### 3.4.1 Aggiunte di tipo I

In linea generale, le aggiunte di tipo I sono costituite da polveri calcaree o da micronizzati lapidei di altra litologia, definiti *filler* dalla norma UNI EN 12620 (2008). Si tratta di materiali fini in grado di saturare il volume vuoto che rimane naturalmente tra particelle di dimensioni maggiori, migliorando così il packing complessivo e la compattezza del calcestruzzo. In base alla loro origine petrografica, distribuzione granulometrica e morfologia, essi influenzano la domanda d’acqua e la richiesta di additivo, entrambi aspetti assai critici negli HPC. La frazione più utile è quella minore di 0,63 mm. Polveri carbonatiche finissime sono largamente usate dai produttori di calcestruzzo di tutta Italia e possono conferire agli HPC eccellenti proprietà allo stato fresco e buona finitura allo stato indurito. I filler calcarei sono generalmente impiegati a dosaggi piuttosto elevati negli HPC autocompattanti, sia per aumentare la coesione degli impasti a pari spandimento, sia per “compattare” la micro struttura del calcestruzzo indurito con evidenti benefici in termini prestazionali. Tra i vantaggi vi è anche la minimizzazione dei difetti della zona di transizione.

#### 3.4.2 Aggiunte di tipo II

Le aggiunte di tipo II sono caratterizzate da una certa attività pozzolanica, e risultano spesso indispensabili nella progettazione delle miscele di HPC.

Tra le più importanti aggiunte di tipo II si possono annoverare:

- *ceneri volanti* (Pulverised Fuel Ash, PFA), conformi alla norma UNI EN 450-1 (2007) e UNI EN 450-2 (2005), e talvolta disponibili anche nelle forme “bonificata” o “rettificata”
- *fumi di silice* (Silica Fume, SF), conformi alla norma UNI EN 13263-1 (2009) e UNI EN 13263-2 (2009).
- *loppe d’altoforno* finemente macinate, conformi alle norme UNI EN 15167-1 (2006) UNI EN 15167-2 (2006).

Con l'uso di aggiunte di tipo II, visto il loro significativo contributo alla resistenza meccanica del calcestruzzo, la UNI EN 206-1 (2006) e la UNI 11104 (2004), stabiliscono per i vari casi i valori del coefficiente  $k$  che, moltiplicato per il dosaggio di aggiunta, fornisce il peso di "cemento equivalente" attraverso il quale è possibile ricalcolare il rapporto  $a/c$  "equivalente" della miscela. Se ad esempio, si impiegano 50 kg di fumi di silice (con  $k=2$ ), è possibile ridurre di 100 kg il contenuto di cemento nell'impasto mantenendo costante il rapporto  $a/c$ .

Le ceneri volanti si presentano in forma di particelle pressoché sferiche (5-90  $\mu\text{m}$ ) spesso cave. La forma tondeggiante di queste particelle migliora la lavorabilità degli HPC, ne incrementa la coesione degli impasti e ne riduce la sensibilità ai cambiamenti nel contenuto d'acqua. Grazie alla sua pozzolanicità contribuisce in modo non trascurabile alla resistenza finale del calcestruzzo. Il fumo di silice si presenta come silice amorfa in forma di microsferiche più piccole di 0,1  $\mu\text{m}$  che negli impasti possono allocarsi negli interstizi tra i granuli di cemento (1-50  $\mu\text{m}$ ). Il loro contributo alla resistenza finale del calcestruzzo è determinante e di solito assai più efficiente a pari peso del cemento stesso ( $k=2$ ). Data l'elevata finezza del fumo di silice, ad esso corrisponde anche un'elevatissima area superficiale che tende a richiedere un aumento dell'acqua di impasto, che è necessario compensare con un maggiore dosaggio di additivi superfluidificanti. L'estrema finezza e sfericità delle particelle di fumo di silice contribuisce a migliorare la coesione e la resistenza alla segregazione degli impasti. La loppa di altoforno, caratterizzata da struttura vetrosa e morfologia più angolare, possiede importanti proprietà idrauliche, confermate anche dal suo utilizzo in grandi quantità nei cementi d'altoforno di tipo III. Tra le aggiunte di tipo II la loppa è in genere quella con minor richiesta d'acqua e di additivo a pari fluidità.

### 3.5 FIBRE

Le fibre si caratterizzano per il tipo di materiale e per i parametri geometrici quali la lunghezza, il diametro equivalente, il rapporto d'aspetto e forma (fibre lisce, uncinato, ecc.).

La lunghezza della fibra può essere assunta pari alla distanza tra le estremità della fibra,  $l_f$ , o la lunghezza della linea d'asse della fibra,  $l_d$ . Il diametro equivalente è il diametro di un cerchio con area uguale all'area media della sezione trasversale della fibra. Per fibre con sezioni irregolari, il diametro equivalente può essere calcolato mediante la relazione:

$$d_f = \sqrt{\frac{4m}{\pi l_d \rho_f}} \quad (3.2)$$

essendo  $m$  la massa,  $l_d$  la lunghezza in sviluppo e  $\rho_f$  la densità della fibra.

Il rapporto d'aspetto è definito come rapporto tra la lunghezza,  $l_f$ , e il diametro equivalente,  $d_f$ , della fibra.

La resistenza a trazione della fibra è la tensione corrispondente alla massima forza di trazione sopportata dalla fibra. La resistenza a trazione deve essere valutata, in accordo a specifiche norme di riferimento, come rapporto tra la suddetta forza e l'area equivalente della sezione trasversale, definita come area del cerchio di diametro  $d_f$ .

Le principali categorie di fibre esistenti vengono introdotte sulla base:

- del materiale costituente, distinguendo tra fibre metalliche e non metalliche (polimeriche, vetro, basalto, carbonio, naturali);
- della dimensione del diametro equivalente, distinguendo tra microfibre ( $d_f=10-150 \mu\text{m}$ ) e macrofibre ( $d_f=0,2-1 \text{ mm}$ );
- della loro efficacia nel garantire una resistenza residua minima oltre la fessurazione del composito fibrorinforzato soggetto a flessione, considerata in valore assoluto (dell'ordine di

1 MPa, UNI EN 14889 (2006), o in rapporto alla resistenza di prima fessurazione del materiale composito (*fib* Model Code, 2010), distinguendo tra fibre strutturali e non strutturali.

Le fibre metalliche hanno una lunghezza,  $l_f$ , generalmente compresa tra 6 mm e 70 mm ed un diametro equivalente,  $d_f$ , compreso tra 0,1 mm e 1,20 mm. Le fibre di acciaio possono essere classificate in base al processo di produzione, alla forma ed al tipo di materiale. Con riferimento al processo di produzione, le fibre possono essere prodotte a partire da filo trafilato, da lamiera tagliata, da altre fabbricazioni. Con riferimento alla forma geometrica, le fibre possono essere distinte in rettilinee e sagomate (uncinate, ondulate, ecc.). Con riferimento al materiale, le fibre possono essere realizzate con acciaio a basso contenuto di carbonio, ( $C \leq 0,20$ ), acciaio ad alto contenuto di carbonio, ( $C > 0,20$ ), acciaio inox e altri metalli. Il modulo di elasticità delle fibre di acciaio può essere assunto pari a 200 GPa per le fibre a basso ed alto contenuto di carbonio, e a 190 GPa per quelle di acciaio inox.

Le fibre polimeriche possono essere distinte in microfibre, con lunghezze contenute nell'ordine dei millimetri, e macrofibre con lunghezze fino a 80 mm. Valori tipici del rapporto d'aspetto sono compresi tra 100 e 500. Il materiale costituente è acrilico, aramide, nylon, poliestere, polietilene e polipropilene, fibre di vetro e fibre di carbonio.

Il rinforzo fibroso nei calcestruzzi ad alte prestazioni ha diversi scopi; nel presente paragrafo si desidera sottolineare che l'aggiunta di fibre al calcestruzzo ad alte prestazioni è sempre possibile, indipendentemente dalla tipologia e dalla quantità, seppur elevata, di fibre.

Nel presente contesto, studi effettuati di mix design di calcestruzzi fibrosi ad elevate resistenze meccaniche hanno evidenziato che il principio base, su cui porre la maggiore attenzione per il calcolo delle quantità delle materie prime, rimane quello della definizione del volume della matrice minima occorrente affinché il calcestruzzo possa conservare il requisito della classe di consistenza richiesta. Infatti, non si deve trascurare che l'immissione di fibre "sottrae" drasticamente una parte del volume della matrice che andrà ad avvolgere la superficie delle stesse. Tale diminuzione porta ad una riduzione della lavorabilità del calcestruzzo.

L'uso di fibre sintetiche nell'HPC può risultare un rimedio efficace per ridurre il rischio di spalling da incendio. In presenza di incendio, infatti, l'acqua contenuta nei pori della matrice cementizia si trasforma in vapore con elevatissimi coefficienti di espansione, imponendo così una elevata tensione alla parete di materiale esposta al fuoco e indebolita. Quando la matrice non sopporta più la tensione generata dalla pressione dell'acqua vaporizzata avviene lo spacco superficiale della parete con la progressiva separazione di strati di matrice cementizia (spalling). L'impiego di micro fibre di natura sintetica, in genere in polipropilene, risulta assai efficace per prevenire tale fenomeno. Con dimensioni molto ridotte (diametri intorno ai 18  $\mu\text{m}$  e lunghezze dai 6 ai 12 mm), tali componenti raggiungono la temperatura di decomposizione intorno ai 170°C, temperatura di fusione del polipropilene. La decomposizione del materiale polimerico non sprigiona gas nocivi, ma lascia un volume di vuoti interconnessi all'interno della matrice che favorisce l'evacuazione del vapore generato dal passaggio di stato dell'acqua presente. I vuoti microscopici nella struttura si trasformano in una rete capillare di volume significativo che aumenta la permeabilità al vapore, impedendo l'aumento della pressione nei pori del conglomerato.

### 3.6 ELEMENTI DI PROGETTAZIONE DELLE MISCELE (MIX-DESIGN)

Nel presente paragrafo si forniscono alcuni elementi per la progettazione di un calcestruzzo ad alte prestazioni, cercando di caratterizzare un percorso che vede, nell'esempio specifico, il raggiungimento di una resistenza cubica caratteristica a compressione  $R_{ck}$  85.

Tale proposta metodologica prevede un approccio per fasi, al fine di ottimizzare i requisiti prestazionali. La normativa di riferimento è la UNI EN 206-9 (2010).

In primo luogo va definita una resistenza media di progetto, conforme alla resistenza caratteristica, rispetto alla quale ottimizzare i componenti della miscela per soddisfare il requisito della classe di consistenza prescritta.

A titolo di esempio, per un  $R_{ck}$  85 MPa, la resistenza media di progetto si dovrebbe attestare a valori di resistenza target non inferiori ai 100-115 MPa.

Per raggiungere il target stabilito, è consigliabile procedere con uno studio di diverse miscele teoriche, da testare in laboratorio per la definitiva qualifica del calcestruzzo oggetto della prescrizione.

Le correlazioni possono interessare, ad esempio, la resistenza in funzione del tempo fino a 60 e 90 giorni di stagionatura dei provini, la resistenza in funzione del rapporto a/c, del rapporto a/c equivalente e del rapporto a/p, dove per p si intende la somma complessiva delle polveri impiegate (cemento, aggiunte ad attività pozzolaniche, filler calcareo e passante al setaccio 0,125).

I metodi di mix design sono numerosi.

Per avere ad esempio un rapporto a/c tale da garantire la resistenza media target del calcestruzzo in esame, si può fare riferimento alla curva di correlazione tra la resistenza ed il rapporto a/c, relativa alla tipologia e classe di cemento che si intende impiegare nella composizione finale del calcestruzzo.

Il valore della resistenza target (ad esempio 100 MPa) può fornire il potenziale rapporto a/c e la quantità di cemento teorico da utilizzare con il quantitativo di acqua efficace che si intende utilizzare negli impasti, anche tenendo in conto della tipologia e quantità degli additivi superfluidificanti.

Ad esempio, se la funzione della curva esponenziale della resistenza contro il rapporto a/c per il cemento è la seguente:

$$R_c = 216,8e^{2,69a/c} \quad (3.1)$$

per una resistenza a compressione prevista di 100 MPa, il rapporto a/c risulta essere pari a 0,29. Definendo un contenuto di acqua efficace pari a 180 litri, il cemento teorico per metro cubo di calcestruzzo risulta pari a 620 kg.

Tale dosaggio è naturalmente troppo elevato e verrà progressivamente ridotto considerando l'impiego di aggiunte minerali che sono contraddistinte, come già citato al paragrafo 3.4, da un coefficiente k di equivalenza al cemento.

Se ad esempio, si impiegano 50 kg di Silica Fume, con k pari a 2, è possibile ridurre di 100 kg il cemento teorico previsto e una miscela potrebbe essere progettata con 520 kg di cemento e 50 kg di Silica Fume, per arrivare, ad esempio, ad un totale di 650 kg di polveri mediante l'impiego di filler calcareo.

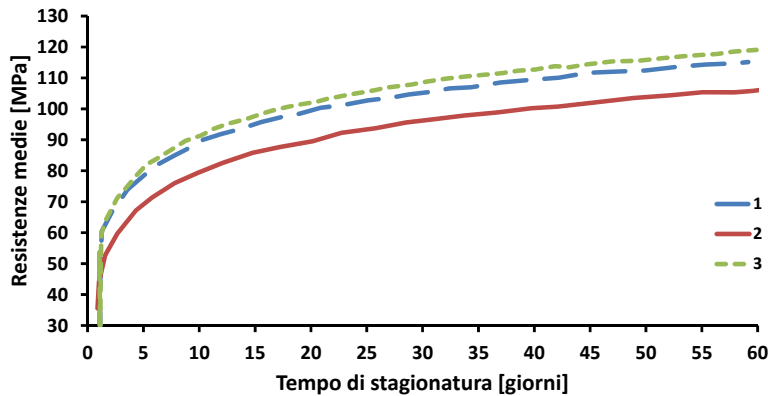
Sempre a titolo di esempio, in Tabella 3-2 si riporta uno studio sperimentale condotto su tre miscele per la definizione corretta del mix design di un calcestruzzo con resistenza caratteristica  $R_{ck}$  85.

Cod. Prodotto	Dos cem [kg]	Dos SF [kg]	Dos filler [kg]	a/p	a/c	Tot fini peso [kg]
1	500	50	100	0,26	0,34	650
2	450	50	150	0,26	0,37	650
3	550	50	50	0,27	0,31	650

**Tabella 3-2** –Mix-Design miscele considerate

Si osservi, come le tre ricette di calcestruzzo testate presentano tre dosaggi di cemento diversi, tre rapporti a/c diversi, tre rapporti a/p sostanzialmente simili e un contenuto di filler calcareo tale da ottenere un peso complessivo di polveri pari a 650 kg, comune a tutti gli impasti.

Le curve di sviluppo contro il tempo (Figura 3-2) della resistenza meccanica sono state le seguenti:



**Figura 3-2** –Curva resistenza meccanica-stagionatura

Le curve identificano un comportamento fisico-meccanico delle miscele testate, permettendo una valutazione complessiva dei risultati ed eventuali riflessioni circa la definizione della miscela finale. Naturalmente, gli impasti di prova devono prevedere l'impiego di idonei additivi superfluidificanti a base acrilica per essere conformi ad una classe di consistenza prevista dalla UNI EN 206-9 (2010) e prescritta dal progettista, ad esempio SF2.

In sintesi, la progettazione delle miscele dei calcestruzzi ad alta resistenza, con classi di consistenza previste nell'ambito dei requisiti che caratterizzano i calcestruzzi autocompattanti, richiede un percorso teorico e sperimentale avente lo scopo di ottimizzare le due fasi componenti il calcestruzzo: la fase fluida, cioè il volume della matrice e la fase solida, cioè il volume degli aggregati fini e grossi. La fase fluida è rappresentata dalla somma dei volumi parziali di acqua, cemento, additivo, aria, aggiunte di tipo II e di tipo I unitamente ai fini passanti al setaccio di 0,125 mm delle sabbie impiegate.

La fase solida è rappresentata dal volume occupato nel metro cubo di calcestruzzo dagli aggregati fine e grosso che, naturalmente, devono essere opportunamente "combinati" in termini di diametro e distribuzione granulometrica.

A tal fine, si può considerare che nella progettazione delle miscele dei calcestruzzi ordinari si fa spesso riferimento a curve granulometriche ideali per una corretta combinazione degli aggregati, con l'obiettivo di ridurre i vuoti granulometrici interstiziali tra gli stessi ed ottenere così la massima densità del conglomerato cementizio.

Le curve di riferimento sono notoriamente quelle di Bolomey, Faury, Fuller ed altre.

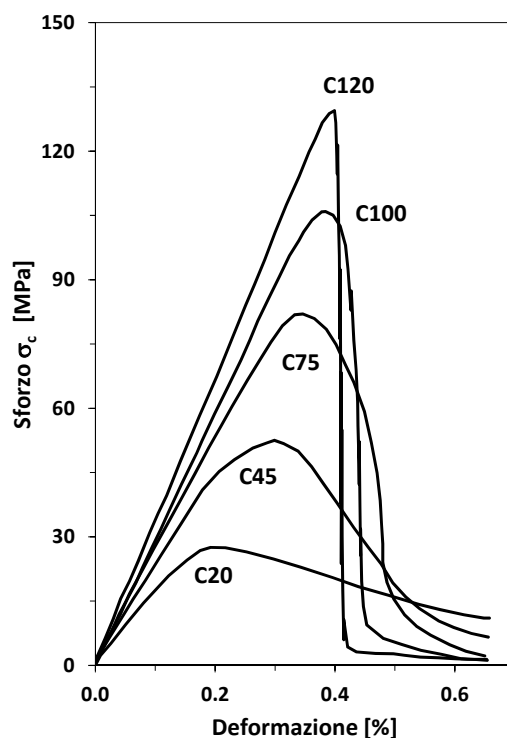


## 4 COMPORTAMENTO MECCANICO

### 4.1 COMPORTAMENTO A COMPRESIONE

Il legame sforzo deformazione (Figura 4-1) dei calcestruzzi HPC in compressione uniassiale si caratterizza per un comportamento che, al crescere della resistenza ultima, si presenta sempre più elasto-fragile. In particolare:

- il legame si presenta sempre più elastico lineare, fino a circa l'80 % della tensione di rottura;
- il ramo postpicco è sempre meno pronunciato, fino ad annullarsi per resistenze molto alte.



**Figura 4-1** –Legame sforzo deformazione in compressione uniassiale per diverse classi di calcestruzzo

Dal punto di vista micromeccanico, la principale differenza rispetto ai calcestruzzi ordinari risiede in un ritardo nell'attingimento della microfessurazione all'interfaccia tra pasta cementizia e aggregati che, per effetto del ridotto fenomeno di bleeding nei calcestruzzi HPC rispetto ai calcestruzzi ordinari, è meno porosa e quindi più resistente. Nei calcestruzzi ordinari invece, una concentrazione di sforzi proprio all'interfaccia pasta-aggregato dà luogo ad una microfessurazione più pronunciata (Cosenza et al. 1989, 1994, Pecce e Fabbrocino, 1999). Nei calcestruzzi ordinari, poi, l'evoluzione della microfessurazione all'interfaccia pasta-aggregato, determina quegli scorrimenti plastici che, a livello macroscopico, si traducono in un pronunciato ramo postpicco. Nel caso dei calcestruzzi HPC, invece, la ridotta microfessurazione fa sì che il ramo postpicco sia sempre meno pronunciato. Con particolare riferimento agli SCC, essi manifestano generalmente valori di resistenza a compressione simili a quelli del calcestruzzo tradizionale vibrato ed eventuali differenze sono coperte dai criteri di sicurezza su cui le norme sono basate.

### 4.2 COMPORTAMENTO A TRAZIONE

Per quanto riguarda la trazione uniassiale, invece, è stato ampiamente osservato come anche i calcestruzzi HPC presentino un comportamento elastico fino a rottura. Inoltre gli incrementi di resistenza

a trazione sono minori degli incrementi di resistenza a compressione. Infatti, mentre per calcestruzzi ordinari la resistenza a trazione è circa pari al 10 % della resistenza a compressione, nei calcestruzzi HPC questo rapporto si riduce progressivamente fino al 5 % per le classi più elevate.

Relativamente ai calcestruzzi autocompattanti, si assume che per una data classe di resistenza e maturità del calcestruzzo, la resistenza a trazione dell'SCC possa essere assunta prossima a quella del calcestruzzo ordinario, poiché il maggior volume della pasta (cemento+fini+acqua) non influisce sensibilmente su questa proprietà meccanica (The European Guidelines for SCC, 2005; PCI Guidelines for SCC, 2004).

### 4.3 MODULO DI YOUNG E MODULO DI POISSON

Il modulo di Young a compressione dei calcestruzzi HPC, come per i calcestruzzi ordinari presenta valori crescenti con la resistenza a compressione, in maniera meno che proporzionale, come assunto dalle diverse formulazioni presenti in letteratura. Mentre, però, nei calcestruzzi ordinari il modulo di Young a compressione è essenzialmente dipendente dalle proprietà meccaniche della matrice cementizia e non risulta influenzato dalle proprietà degli aggregati, nei calcestruzzi HPC, data l'elevata resistenza della matrice, è significativamente dipendente anche dalle proprietà meccaniche degli aggregati.

Relativamente agli SCC, il modulo di elasticità risulta un parametro di particolare interesse ed utilizzato specialmente per il calcolo elastico della freccia nel progetto di solette e di elementi pre/post tesi. Poiché l'SCC ha spesso un maggior contenuto di pasta di cemento rispetto al calcestruzzo tradizionale vibrato ci si può aspettare che il modulo di Young sia leggermente minore. I criteri di sicurezza delle norme UNI EN 1992-1-1 (2005), coprono tuttavia queste minime differenze.

Il modulo di Poisson iniziale nei calcestruzzi HPC non è molto diverso da quello dei calcestruzzi ordinari. Infatti, mentre alcuni studi evidenziano dei valori leggermente più bassi, molti lavori in letteratura affermano che non ci sono variazioni significative del modulo di Poisson iniziale con la resistenza. Una variazione importante risiede, invece, nel legame tra il modulo di Poisson e lo stato tensionale. Infatti, nei calcestruzzi ordinari, la dilatazione trasversale aumenta al crescere dello stato tensionale, per effetto del propagarsi delle fessurazioni. Invece, nei calcestruzzi HPC, essendo ritardate le fessurazioni, il modulo di Poisson, generalmente inferiore a 0,15-0,2, rimane pressoché costante fino a valori tensionali prossimi alla resistenza massima.

### 4.4 PROPRIETÀ TERMICHE

Il coefficiente di dilatazione termica rappresenta la deformazione che si produce in conseguenza dell'innalzamento della temperatura di un grado ( $1^{\circ}\text{C}$  o  $1^{\circ}\text{K}$ ) quando il calcestruzzo non è vincolato né internamente né esternamente.

Il coefficiente di dilatazione termica del calcestruzzo varia con:

- la composizione del calcestruzzo;
- l'età del calcestruzzo;
- l'umidità;
- la temperatura (oltre i  $100^{\circ}\text{C}$ ).

Poiché il maggior volume nel calcestruzzo è comunque composto dagli aggregati, l'uso di aggregati meno dilatanti comporta una minor dilatazione termica del calcestruzzo. La dilatazione termica dell'SCC è comunque paragonabile a quella del calcestruzzo ordinario.

I calcestruzzi ad elevate prestazioni sono caratterizzati da una struttura interna altamente compatta, in cui la porosità del materiale è ottimizzata attraverso specifici accorgimenti del mix design, quali la scelta di un superfluidificante ad alta efficacia per ridurre il tenore di acqua, l'impiego di un ele-

vato volume di finissimi, come filler calcarei e fumi di silice che riempiono i vuoti creati dalla particelle di clinker di dimensioni maggiori, e conferiscono una ottima fluidità al conglomerato.

La bassa porosità dei calcestruzzi HPC è dunque un sinonimo di alte prestazioni, ovvero elevata resistenza a compressione, ma anche elevata durabilità, conseguenza diretta della scarsa permeabilità della struttura agli agenti aggressivi. La stessa bassa porosità determina anche la scarsa conducibilità termica della struttura e questo può avere conseguenze significative nella fase di idratazione.

Con riferimento, infatti, alle strutture di grande spessore, come platee di fondazione di edifici in elevazione, i muri di sostegno di notevole altezza, la bassa conducibilità termica del conglomerato determina una disuniformità termica all'interno della struttura. Infatti tutte le reazioni che si svolgono all'interno del calcestruzzo in fase di idratazione avvengono con sviluppo di calore e se il materiale non riesce a dissipare questo calore verso l'esterno per la sua bassa conducibilità, allora il calore viene tutto accumulato all'interno con un conseguente aumento locale della temperatura. La conseguenza di questo sviluppo non costante della temperatura si traduce in un gradiente termico tra le zone periferica e interna del calcestruzzo, l'una con tendenza a contrarsi, l'altra con tendenza ad espandersi. Il risultato è che nella prima fase di riscaldamento gli strati superficiali di calcestruzzo, più freddi e vincolati dalle armature, si oppongono alla dilatazione del cuore della struttura, e quindi subiscono una sollecitazione di trazione quando il materiale ancora non ha sviluppato sufficiente resistenza per contrastarla. Nella pratica l'insorgenza di tensioni in superficie a breve scadenza dal getto si traducono nello sviluppo di fessurazioni che compromettono la qualità della struttura.

Una misura cautelativa per ridurre il rischio di forti gradienti termici nelle strutture estese o fortemente spesse in HPC può essere l'impiego di cementi di miscela, come i pozzolanici o d'altoforno, in cui la sostituzione di materiali pozzolanici o loppa d'altoforno ad una quota di clinker può permettere uno sviluppo di calore più lento grazie al fatto che la reazione pozzolanica di idratazione per questi materiali pozzolanici è più graduale rispetto a quella del clinker.

#### 4.5 RITIRO

Il ritiro totale è somma del *ritiro autogeno* e del *ritiro igrometrico*.

Il *ritiro autogeno* si verifica durante la presa ed è dovuto al consumo d'acqua nelle reazioni chimiche di idratazione del cemento: il volume dei prodotti di idratazione è infatti minore di quello delle particelle di cemento non idrate e dell'acqua di reazione (inevitabile).

Il *ritiro igrometrico*, di natura ambientale, è invece causato dalla migrazione dell'acqua dal calcestruzzo verso l'ambiente. Generalmente si tratta di acqua appartenente alla pasta di cemento.

Poiché gli aggregati si oppongono al ritiro della pasta di cemento, un maggior volume di aggregati nell'impasto e l'uso di aggregati caratterizzati da un modulo elastico maggiore comporta riduzioni del ritiro del calcestruzzo. Una riduzione nelle dimensioni dell'inerte richiede più pasta di cemento e quindi tende ad essere causa di maggior ritiro. Per via del maggior contenuto di pasta, rispetto al caso dei calcestruzzi ordinari, negli HPC il ritiro autogeno atteso può essere maggiore. Tuttavia, poiché a parità di resistenza a compressione il rapporto acqua/cemento è minore, il ritiro igrometrico può risultare minore (European Guidelines for SCC, 2005; PCI Guidelines for SCC, 2004).

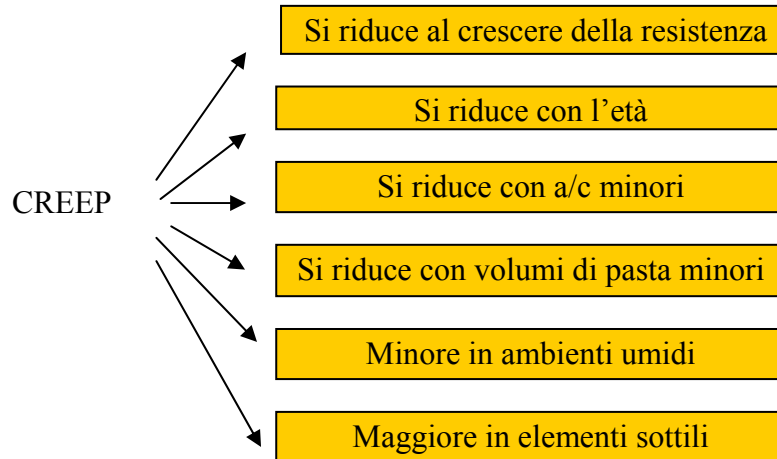
#### 4.6 FENOMENI VISCOSI

Nei calcestruzzi ad elevate prestazioni è importante valutare il comportamento viscoso già alle brevi stagionature. Infatti, molto spesso, si utilizzano questi materiali per sfruttare la resistenza che possono raggiungere a poche ore dal getto. In questa fase il fenomeno viscoso diventa rilevante ed occorrono adeguate sperimentazioni per prevedere il comportamento del materiale in questa fase.

L'incremento di deformazione nel tempo sotto carichi di lunga durata (creep) ha luogo nella pasta di cemento ed è influenzato dalla sua porosità (direttamente connessa al rapporto acqua/cemento). Durante l'idratazione la porosità della pasta diminuisce e, quindi, per un dato calcestruzzo, il creep si riduce mentre la resistenza aumenta. Il tipo di cemento è importante; cementi che idratano prima

hanno minor creep. Poiché gli aggregati ostacolano il creep, maggior volume di aggregati e maggior rigidità dell'aggregato riducono il fenomeno.

Per quanto riguarda gli SCC, il volume della pasta di cemento è maggiore che nel calcestruzzo ordinario; il creep dell'SCC è potenzialmente maggiore di quello del calcestruzzo ordinario di pari resistenza. Le differenze sperimentali sono generalmente piccole e coperte dai criteri di sicurezza. Dal punto di vista ingegneristico e normativo non esistono modelli di previsione del creep specifici per l'SCC ed universalmente accettati, ma i livelli di incertezza che ancora caratterizzano quelli attualmente suggeriti dai codici per i calcestruzzi ordinari coprono la casistica relativa ai calcestruzzi auto compattanti. Lo schema seguente (Figura 4-2) sintetizza i fenomeni principali che influenzano il creep.



**Figura 4-2** – Fenomeni che influenzano il creep

#### 4.7 SVILUPPO DELLA RESISTENZA NEL TEMPO

I calcestruzzi HPC sviluppano elevate resistenze meccaniche in tempi molto più brevi dal getto, rispetto a quanto accade per i calcestruzzi ordinari. Al contrario di quanto accade per i calcestruzzi ordinari, però, la resistenza non presenta incrementi significativi nel periodo medio-lungo.

Come per i calcestruzzi ordinari, per gli HPC si può assumere che la resistenza a compressione segua un andamento nel tempo che può essere stimato dalla seguente formula (*fib Model Code*, 2010):

$$f_c(t) = \beta(t) f_c \quad (4.1)$$

dove

$$\beta(t) = e^{\left[ 1 - \left( \frac{28}{t/t_1} \right)^{0.5} \right]} \quad (4.2)$$

con

- $f_c$  la resistenza a compressione a 28 giorni
- $f_c(t)$  la resistenza a compressione al tempo  $t$
- $t$  il tempo in giorni a cui valutare la resistenza
- $t_1$  pari a 1 giorno

- $s$  un coefficiente che dipende dalla tipologia di cemento e dal rapporto a/c. Per cementi 42,5R, è possibile adoperare  $s=0,165$ , per un rapporto acqua/cemento fino a 0,35 (Bergner, 1997).

#### 4.8 INGRANAMENTO DEGLI AGGREGATI

In prossimità ed oltre l'attingimento della capacità portante, generalmente i calcestruzzi di resistenze medio-basse presentano una fessurazione che non interessa gli aggregati, i quali, quindi, rimangono integri, fornendo un notevole contributo attritivo lungo le superfici delle fessure. Viceversa, con calcestruzzi caratterizzati da maggiori resistenze, nel processo di frattura sono coinvolti anche gli aggregati che possono presentare resistenze a trazione inferiori alla pasta cementizia.

A seguito della fessurazione, il calcestruzzo mostra una marcata riduzione di rigidità e ciò riflette la modifica dei campi tensionali e lo sviluppo di differenti meccanismi portanti e resistenti. La fessurazione, inizialmente parallela alle direzioni di trazione, generalmente è seguita da una redistribuzione di forze che porta alla rotazione delle direzioni principali di compressione e allo sviluppo di tensioni tangenziali lungo le fessure. Tale fenomeno attritivo, noto come *aggregate interlock*, è accentuato sia dalla presenza delle armature che limitano l'apertura delle fessure, sia dalla scabrezza delle superfici del calcestruzzo fessurato.

Tipici esempi, dove questo meccanismo influenza la risposta del calcestruzzo, sono rappresentati dal softening post-picco del calcestruzzo e dal comportamento delle travi in calcestruzzo armato soggette a taglio. Il softening post-picco è, infatti, anche governato dal comportamento del calcestruzzo tra le fessure. Nei calcestruzzi ad alta resistenza il contributo attritivo dato dall'ingranamento degli aggregati è drasticamente ridotto. Inoltre, prove sperimentali hanno mostrato riduzioni della capacità tagliante dell'ordine del 50-75 %. La presenza delle armature riveste però un ruolo chiave, sia perché esse non sono interessate dalla frattura degli aggregati, sia perché contribuiscono a ridurre l'apertura delle fessure e quindi ad esaltare l'attrito tra le superfici delle fessure stesse.

#### 4.9 ADERENZA ACCIAIO-CALCESTRUZZO

L'efficacia del legame acciaio-calcestruzzo è influenzata dalla:

- direzione e profondità delle barre nel getto;
- qualità del calcestruzzo;
- efficacia nella compattazione del calcestruzzo.

Difetti di aderenza possono quindi derivare da:

- cattivo avvolgimento delle barre da parte del calcestruzzo;
- essudazione (bleeding);
- problemi di segregazione.

Questi ultimi rappresentano tutte cause di riduzione del contatto tra le armature ed il calcestruzzo circostante. Data la più alta fluidità, coesione ed omogeneità degli HPC e degli SCC in particolare, questi effetti negativi vengono minimizzati specialmente per le barre situate nelle posizioni più alte all'interno di sezioni profonde. Per una data classe di resistenza del calcestruzzo, le proprietà di aderenza sono quindi generalmente migliori rispetto ai calcestruzzi ordinari.

## 5 CRITERI PER LA DEFINIZIONE DELLE PRESTAZIONI

Nel paragrafo precedente sono state esaminate e approfondite alcune delle grandezze fisico-meccaniche dei calcestruzzi ad alte prestazioni.

Conformemente agli indirizzi dettati dalle NTC, (MIN.LL.PP, DM 14 gennaio 2008), è importante chiarire che le prescrizioni relative ai calcestruzzi richiedono un approccio di tipo prestazionale e non più compositazionale.

Si fa osservare che il calcestruzzo ad alte prestazioni presenta proprietà molto differenti dal calcestruzzo ordinario, e per questo motivo la prescrizione puntuale di requisiti prestazionali costituisce un presupposto fondamentale per ridurre la possibilità che piccole e grandi negligenze lungo il processo di progettazione, realizzazione e uso delle opere possano comprometterne la qualità e la sostenibilità.

### 5.1 DEFINIZIONE DELLE PRESTAZIONI

#### 5.1.1 Resistenza caratteristica a compressione

Il requisito principale dei calcestruzzi ad alte prestazioni riguarda senza dubbio la resistenza caratteristica del conglomerato che, come noto, viene definito in fase di progettazione delle strutture. Dal momento che il calcestruzzo deve essere confezionato attraverso impianti industrializzati, per esempio, a cura di un produttore di calcestruzzo preconfezionato o all'interno di stabilimenti di prefabbricazione, la qualifica del materiale richiesto deve essere condotta con particolare cura soprattutto nella fase di definizione della resistenza media, obiettivo che il calcestruzzo deve raggiungere per risultare conforme alla resistenza caratteristica richiesta.

Le NTC e l'EC2 (UNI EN 1992-1-1:2005), stabiliscono la relazione tra resistenza cilindrica media e caratteristica di progetto secondo la relazione:

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \quad [N/mm^2] \quad (5.1)$$

Nel caso d'impiego di provini cubici di calcestruzzo, la relazione (5.1) può essere interpretata in termini di resistenza media cubica  $R_{cm}$  e caratteristica cubica  $R_{ck}$  dividendo i termini dell'uguaglianza per il coefficiente di conversione cilindro/cubo assunto pari a 0,83 ed ottenendo:

$$R_{cm} = R_{ck} + 9,64 \cong R_{ck} + 10 \quad [N/mm^2] \quad (5.2)$$

Nella fase di mix design, la progettazione della ricetta deve essere tuttavia orientata all'ottenimento di valori di resistenza target del calcestruzzo certamente superiori a quelli medi ottenuti applicando le relazioni (5.1) o (5.2). E' infatti noto come la resistenza del calcestruzzo dipenda sensibilmente dal rapporto  $a/c$  e come le curve di correlazione tra  $R_c$  ed il rapporto  $a/c$  abbiano variazioni significative per valori del rapporto  $a/c$  più bassi. Piccoli errori nel controllo del contenuto d'acqua durante il confezionamento del calcestruzzo comportano, quindi, sensibili variazioni nella resistenza finale del calcestruzzo. Nella definizione della resistenza media target si raccomanda, quindi, di assumere un adeguato margine di sicurezza sulla base della reale qualità dell'impianto destinato alla produzione del conglomerato. L'esperienza maturata negli ultimi anni nella produzione di calcestruzzi ad alta resistenza porta comunque a considerare un margine di sicurezza non inferiore ad almeno 15-20 MPa.

#### 5.1.2 Sviluppo della resistenza nel tempo

La conformità alla resistenza caratteristica di un conglomerato cementizio viene generalmente stabilita a 28 giorni di stagionatura attraverso campioni di calcestruzzo portati a rottura a questo livello di maturazione. Va tuttavia sottolineato che le NTC permettono anche diverse stagionature per la determinazione delle relative caratteristiche meccaniche dei calcestruzzi.

Come ricordato nel capitolo 3 con riferimento ai materiali ed al mix design, nel caso dei calcestruzzi ad alte prestazioni può essere indispensabile il ricorso ad aggiunte minerali per ridurre il calore altrimenti sviluppato dalle miscele in fase di idratazione. In queste situazioni i termini per il controllo della conformità prestazionale di un calcestruzzo speciale si possono spostare a tempi di stagionatura pari a 60 o a 90 giorni.

### **5.1.3 Bilancio termico della miscela**

I calcestruzzi ad alte prestazioni sono caratterizzati da contenuti di cemento tendenzialmente più elevati che nei calcestruzzi ordinari. Per la valutazione del calore di idratazione della miscela sono quindi necessari studi più approfonditi dello sviluppo termico, possibilmente da realizzare attraverso la rilevazione diretta delle temperature non solo attraverso l'impiego di calorimetri adiabatici ma anche in strutture pilota opportunamente munite di termocoppie.

Dal punto di vista prestazionale, è opportuno che il progettista tenga in considerazione la dimensione geometrica del manufatto ed il massimo valore consentito al gradiente termico, questo ultimo inteso come differenza tra il valore della temperatura interna del getto e quella dell'ambiente esterno. Al fine di prevenire pericolosi fenomeni di fessurazione legati a gradienti termici eccessivi, in letteratura viene spesso indicato come limite un valore di  $\Delta T$  massimo pari a 20-25°C. Si sottolinea che tale traguardo non può essere raggiunto facilmente se non attraverso una preventiva calibrazione della composizione della miscela di calcestruzzo da impiegare ed una corretta protezione e stagionatura dell'elemento strutturale in fase di realizzazione delle opere.

### **5.1.4 Proprietà del calcestruzzo fresco**

Dopo attente valutazioni, una corretta prescrizione relativa alle proprietà del calcestruzzo fresco non può prescindere dalla definizione del diametro di spandimento richiesto, ovvero dalla scelta di una delle tre classi in cui la consistenza del calcestruzzo è stata convenzionalmente catalogata (da SF1 a SF3) in funzione dei diversi spandimenti; tale classe dipende dalla tipologia della struttura da realizzare (fondazioni, pareti, solette, rampe ecc.) e dal metodo di getto adoperato.

Nel caso dei calcestruzzi destinati alla realizzazione di opere particolarmente complesse, è necessario introdurre prescrizione relative alle caratteristiche reologiche del calcestruzzo, ovvero, secondo la EN-206-9 (2010), prescrizioni relative a:

- la *classe di viscosità* in funzione del valore di T50 (scelta tra classe VS1 e classe VS2);
- la *classe di viscosità* in funzione del valore di tempo al V-FunnelT50 (scelta tra classe VF1 e classe VF2);
- la *classe di capacità di attraversamento (passing ability)* come risultato dell'L-Box test (scelta tra classe PA1 e classe PA2);
- la *classe di resistenza alla segregazione* come risultato della prova di segregazione su setacci (*sieve segregation test* - scelta tra classe SR1 e classe SR2).

Bisogna inoltre tenere in considerazione:

- i tempi previsti per il trasporto e per il posizionamento dell'autobetoniera per lo scarico, tempi in base ai quali prescrivere correttamente il tempo di mantenimento della consistenza e delle altre proprietà reologiche in termini di minuti/ore: ad esempio 60 o 90 minuti;
- l'idoneità della miscela ad essere pompata.

Molto spesso, in fase progettuale, non è sempre possibile indicare "a priori" le prescrizioni relative ad alcune proprietà reologiche del calcestruzzo, soprattutto per mancanza di adeguate informazioni

circa l'organizzazione dei getti, la modalità di realizzazione, la tipologia delle casseforme, l'impiego della pompa, ecc.

### **5.1.5 Diametro massimo e qualità degli aggregati**

Il requisito prescrittivo relativo al diametro massimo degli aggregati deve essere assolutamente mirato e corretto, dal momento che i calcestruzzi ad alte prestazioni vengono spesso impiegati per strutture ad alta ed altissima densità di armatura. Occorre, infatti, escludere ogni possibile effetto di "blocking", evitando che aggregati di dimensioni troppo elevate risultino incapaci di attraversare lo spazio libero tra le barre d'armatura e che l'omogeneità del calcestruzzo in opera risulti compromessa.

I calcestruzzi ad alte prestazioni sono caratterizzati da una matrice cementizia più resistente e rigida che nel caso dei calcestruzzi ordinari, con valori del modulo elastico e della resistenza talmente elevati da superare quello degli aggregati utilizzati. L'esperienza maturata nella qualifica di tali calcestruzzi porta a concludere che la richiesta di elevate resistenze del conglomerato comporta, in fase di studio della miscela, la necessità di un'attenta valutazione soprattutto nei riguardi della qualità degli aggregati superiori ai 4 mm in diametro.

### **5.1.6 Corretta maturazione e cura dei getti**

Le Linee Guida sulla messa in opera del calcestruzzo strutturale (C.S.L.P., 2008), emanate dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, Servizio Tecnico Centrale nel febbraio 2008, affrontano compiutamente anche l'argomento della protezione dei getti dal punto di vista termico.

Si può fare utile riferimento a tale documento in cui il problema del bilancio termico delle miscele, della protezione termica durante la stagionatura e della sua durata vengono analizzati con esempi che chiariscono la metodologia ed i materiali da utilizzare, le corrette prescrizioni e le regole per il disarmo.

## **5.2 DURABILITÀ E CLASSI DI ESPOSIZIONE**

L'impiego di calcestruzzi HPC, per incrementare la durabilità delle opere in cemento armato, è favorito dalle indicazioni delle norme UNI EN 206-1 (2006) e UNI 11104 (2004), che per ogni classe di esposizione, individuano la minima classe di calcestruzzo adoperabile insieme ad altri parametri dell'impasto, quali il massimo rapporto acqua/cemento o il minimo contenuto d'aria. Quanto più gravosa è quindi la classe di esposizione, tanto più alta deve essere la classe di resistenza del calcestruzzo da adoperare.

## **5.3 COMPORTAMENTO AL FUOCO**

Il comportamento al fuoco dei calcestruzzi HPC presenta differenze significative ma non sostanziali rispetto al comportamento mostrato dai calcestruzzi ordinari. Numerose analisi sperimentali mostrano infatti che i calcestruzzi HPC, sottoposti ad alte temperature, mostrano un degrado più marcato delle proprietà meccaniche. Infatti, il degrado della resistenza a compressione con la temperatura risulta maggiore di quello osservato nei calcestruzzi ordinari, in particolare fino a circa 400°C; raggiunti quindi gli 800°C la resistenza a compressione si riduce a circa il 30 % del valore mostrato a temperatura ambiente (Phan e Carino, 1998), ma la riduzione può risultare ben maggiore nei calcestruzzi con aggregato altamente siliceo, spesso usati in Europa centrale (Felicetti e Gambarova, 1998).

Ciò che però caratterizza il comportamento di calcestruzzi HPC al fuoco è il fenomeno dello spalling che in genere si presenta in modo più marcato che nei calcestruzzi ordinari. Ciò è dovuto non tanto alla minore porosità che caratterizza i calcestruzzi HPC, quanto alla minore connettività dei pori, che negli HPC sono più isolati fra di loro. Questa caratteristica determina maggiori sovrappressioni nei pori indotte dall'acqua che, trasformandosi in vapore acqueo ad alta temperatura e



pressione, non riesce a defluire verso l'esterno. Tali sovrappressioni possono quindi indurre stati tensionali tali da causare fenomeni di spalling di tipo più o meno esplosivo. Tuttavia il fenomeno dello spalling è favorito, talora in modo determinante, dai gradienti termici e dalle conseguenti autotensioni, nonché dallo stato tensionale dovuto ai carichi. Al contempo la maggiore resistenza a trazione e la maggiore energia specifica di frattura degli HPC – crescenti però in modo meno che proporzionale alla resistenza a compressione - tendono a contrastare il fenomeno dello spalling (Bamonte et al., 2008; Bamonte e Gambarova, 2010).

Il comportamento al fuoco dei calcestruzzi HPC è comunque influenzato da diversi fattori:

- Il contenuto d'umidità influenza il fenomeno dello spalling; livelli d'umidità più alti determinano fenomeni di spalling più accentuati. Ciò costituisce un ulteriore contributo alla differenza di comportamento con i calcestruzzi ordinari, dove, dopo il getto, il contenuto d'umidità si riduce più velocemente di quanto accade nei calcestruzzi HPC, ancora a causa della porosità minore e meno interconnessa di questi ultimi (Kodur et al., 2003).
- Il gradiente di temperatura, nel tempo, favorisce il fenomeno dello spalling in quanto il rilascio di vapor acqueo verso l'esterno risulta ancor più limitato (Danielsen, 1997).
- Lo stato tensionale presente nella struttura influisce significativamente sul fenomeno dello spalling; in particolare la presenza di sforzi di compressione può essere significativamente sfavorevole.
- L'utilizzo di fibre polipropilene determina una riduzione dello spalling grazie non tanto ai canali che si generano a seguito della fusione delle fibre (già a temperature di qualche centinaio di gradi) e che favoriscono il trasporto di umidità verso l'esterno (Kodur, 1999), quanto alle microfessure, che si generano attorno ai vuoti lasciati dalle fibre e che connettono i pori isolati tipici degli HPC (Jansson and Boström, 2008).
- Gli aggregati carbonatici, grazie al loro più basso calore specifico (Kodur et al., 2003) ed alla loro maggiore stabilità fisico-chimica possono ridurre lo spalling ed il degrado delle proprietà meccaniche, rispetto agli aggregati silicei (Felicetti e Gambarova, 1998).
- L'utilizzo di aggregati di dimensioni maggiori favorisce ulteriormente lo spalling ed il degrado di resistenza (Kodur, 2003).
- L'utilizzo di aggregati leggeri favorisce lo spalling a causa del maggiore contenuto d'umidità (Kodur, 2003) e dei maggiori gradienti termici dovuti alla loro minore diffusività termica (Felicetti et al., 2012).
- Negli elementi strutturali, un più elevato numero di staffe opportunamente chiuse può ridurre significativamente il fenomeno dello spalling del copriferro (Kodur, 2003).
- La presenza di fibre può incrementare significativamente la tenacità anche alle alte temperature (Colombo et al., 2010; Bamonte e Gambarova, 2010).

Non potendosi prevedere, allo stato attuale della conoscenza, l'instaurarsi del fenomeno dello spalling, sono necessarie opportune prove in fase di prequalifica. Le prove dovrebbero essere condotte simulando lo stato tensionale e la curva di incendio di progetto.

Occorre comunque segnalare che calcestruzzi ad elevata resistenza rinforzati con fibre di acciaio in elevate quantità hanno mostrato scarsa o nulla sensibilità allo spalling.

La resistenza al fuoco dell'SCC è simile a quella del calcestruzzo normale (si vedano i confronti fra varie campagne sperimentali in Bamonte e Gambarova, 2012). A calcestruzzi meno permeabili corrisponde, in genere, maggior spalling, e questo può valere in particolare per gli SCC data la loro elevata compattezza e ridotta porosità.

#### **5.4 COMPORTAMENTO ALLE ALTE VELOCITA' DI DEFORMAZIONE**

I calcestruzzi ordinari presentano proprietà meccaniche che dipendono dalla velocità di deformazione (CEB, 1988; *fib* Model Code, 2010). In particolare, i calcestruzzi vedono un incremento delle

resistenze, specie quella a trazione, al crescere della velocità di deformazione. Tale comportamento diventa però meno significativo per calcestruzzi caratterizzati da alte resistenze dove il comportamento viscoso è meno pronunciato (Schuler e Hansson, 2006; Mindess et al., 1987; Asprone et al. 2009). Ciò è tra l'altro confermato dalle formulazioni riportate nei documenti CEB (1988) e *fib* Model Code (2010) per la stima delle resistenze per dati valori di velocità di deformazione. Nel caso però di calcestruzzi fibrorinforzati ad alta resistenza, possono ottenersi anche significativi aumenti dei valori di resistenza ed energia di frattura, al crescere della velocità di deformazione (Caddoni et al., 2009a,b, Caverzan et al., 2009, 2012).

## 5.5 SELF HEALING

La capacità di autoriparazione dei materiali a matrice cementizia è nota sin dal 1937 quando Turner (1937) per primo registrò il verificarsi di questo fenomeno in una serie di casi studio, dalle tubazioni, ai serbatoi, alle pile da ponte e a diverse tipologie di elementi prefabbricati danneggiati da eventi accidentali.

Fondamentale per il verificarsi del fenomeno è la presenza dell'acqua, anche sotto forma di umidità atmosferica: la capacità di "auto-risigillare" le fessure esistenti è infatti dovuta principalmente alle reazioni di idratazione di particelle di cemento anidre che sono presenti sulle superficie di una fessura e che sono dunque disponibili a reagire con l'acqua, qualora essa penetri all'interno della fessura stessa. Queste reazioni portano alla formazione di nuovi prodotti "idratati" che si depositano lungo le facce della fessura, riducendo progressivamente l'ampiezza di quest'ultima e finanche venendo a ricostituire completamente la continuità del materiale.

Il meccanismo venne per la prima volta spiegato da Lauer e Slate (1956), i quali dimostrarono che i prodotti delle reazioni di "self-healing" consistono essenzialmente di cristalli di idrossido di calcio e carbonato di calcio. Questi ultimi sono dovuti alla reazione dell'idrossido di calcio, prodotto dalla idratazione del cemento, con la anidride carbonica presente sia nell'acqua sia nell'aria. La progressiva consumazione dell'idrossido di calcio presente sulle superficie di una fessura, dovuta al progredire delle reazioni di self healing, ne determina altresì la sua migrazione verso la fessura dalle zone interne del getto; contemporaneamente, i cristalli generati dalle reazioni di self healing si depositano sulle superficie della fessura, venendo progressivamente a risigillarla.

Hearn e Moorley (1997) hanno altresì evidenziato il ruolo della idratazione differita nell'estrinsecarsi del fenomeno: onde ciò accada sono necessari certamente sia la presenza dell'acqua sia di particelle di materiale cementizio ancora anidro, ma anche di spazio libero per la formazione dei nuovi idrosilicati di calcio. Ciò, come messo in luce da Neville (2002) ha maggiori probabilità di verificarsi alle brevissime e brevi stagionature, in presenza di fessure dal percorso più tortuoso (a motivo della minore resistenza e tenacità della pasta), che possono così esporre alle condizioni ambientali esterne "agglomerati" più grandi di particelle non idratate. In calcestruzzi più "vecchi" invece i prodotti delle reazioni di self-healing consistono principalmente di carbonato di calcio, a motivo delle reazioni sopra illustrate.

Oltre alla presenza dell'acqua ed, eventualmente dell'anidride carbonica, altre variabili possono influenzare il fenomeno:

- la composizione del calcestruzzo (più elevato è il contenuto di cemento, più significativo il fenomeno; Dhir et al., 1973);
- lo stato di sforzo lungo la fessura e la stabilità dello stadio fessurato in corrispondenza del quale il processo si innesca (Ngab et al., 1981);
- una temperatura dell'acqua più elevata pare favorire il fenomeno (Reinhardt e Joos, 2003)
- l'alternanza tra immersione in acqua ed esposizione all'aria, con differenti contenuti di umidità relativa.
- la presenza di additivi aerocristallizzanti nel calcestruzzo (ACI 212-3R-10, 2010; Ferrara et al., 2012c).

Molti degli studi sin qui compiuti hanno focalizzato l'attenzione sulla variazione della permeabilità all'acqua (Hearn e Morley, 1997; Hearn, 1998; Edvardsen, 1999; Aldea et al., 2000) e solo in uno di essi sono stati esaminati gli effetti sul recupero di resistenza (Dhir et al., 1973).

I compositi cementizi fibrorinforzati ad alte prestazioni sono assai inclini a manifestare un comportamento del tipo "autoriparante". Ciò è dovuto al concorrere di due fattori: da un lato la composizione dei suddetti materiali, caratterizzata da elevati quantitativi di cemento (o di sostituti del cemento) e da bassi rapporti acqua/legante; dall'altro il comportamento fessurativo dei suddetti materiali, contraddistinto da una ampia fase di multi fessurazione stabile che precede la localizzazione instabile di una singola macro-fessura. A motivo della suddetta composizione, significative quantità di materiale anidro, che può manifestare sia attività cementizia sia attività pozzolanica, si trovano ad essere esposte, a fessurazione avvenuta, all'umidità atmosferica e dunque possono innescare le reazioni di idratazione "ritardata" proprie del fenomeno del self-healing. Il comportamento multifessurativo del materiale "spalma" l'apertura di una fessura su molte singole fessure, ciascuna singolarmente aperta nell'ordine di poche decine di micron e dunque assai più facilmente "richiudibile", che non una singola fessura la cui apertura sia dell'ordine del centinaio di micron. Ciò consente significativi recuperi della capacità deformativa, della resistenza e della tenacità del materiale, ovviamente dipendenti delle condizioni di esposizione e del livello di danneggiamento preesistente (Yang et al., 2009).

## 5.6 COMPATIBILITA' MUTUA DELLE PRESTAZIONI

I calcestruzzi ordinari hanno un campo di fattibilità prestazionale particolarmente ampio, vale a dire che le prestazioni richieste possono essere facilmente soddisfatte anche con ampie variazioni dei tipi, delle quantità e delle proprietà dei componenti utilizzati. Al contrario, gli HPC hanno spesso prescrizioni stringenti e non di rado multiple, che restringono i gradi di libertà nella progettazione delle miscele, e spesso limitano fortemente il campo di fattibilità. Si deve dunque mantenere un difficile equilibrio dinamico tra richieste prestazionali da soddisfare e proprietà dei componenti a disposizione, attraverso un'analisi ponderata e continua che tenga innanzitutto conto dei requisiti potenzialmente contrastanti.

### 5.6.1 Requisiti contrastanti

Diverse sono le richieste prestazionali che possono generare contrasti reciproci ai fini della fattibilità tecnologica di un HPC. Innanzitutto, le elevate prestazioni meccaniche richieste per un HPC (alta resistenza a compressione, alto modulo elastico, sviluppo precoce delle prestazioni), a causa della necessità di alti contenuti di cemento e aggiunte attive, contrastano fortemente con eventuali requisiti di basso sviluppo di calore, e in generale con tutti i requisiti orientati ad evitare fessurazioni, che tendono invece a minimizzare il contenuto di leganti. Allo stesso modo, è evidente che i requisiti di alta fluidità del calcestruzzo fresco e di lungo mantenimento nel tempo della stessa, si trovano in conflitto con la primaria necessità di ridurre fortemente la quantità di acqua d'impasto. Qui di seguito, (Tabella 5-1), sono riportati alcuni dei più frequenti contrasti tra i requisiti, legati ciascuno alla necessità di minimizzare e massimizzare allo stesso tempo una determinata proprietà del calcestruzzo.

<i>Requisiti contrastanti</i>	<i>Proprietà che generano il contrasto</i>
Alte resistenze ↔ basso calore d'idratazione	contenuto di cemento e aggiunte attive
Alta fluidità ↔ basso rapporto a/c	contenuto d'acqua
Prestazioni precoci ↔ mantenimento di consistenza	velocità d'idratazione

Diametri aggregati ridotti ↔ basso ritiro	volume di pasta
Bassi contenuti d'acqua ↔ qualità estetica della finitura superficiale	bassa velocità di scorrimento
Basso ritiro ↔ robustezza reologica	Basso contenuto di pasta e di parti fini

**Tabella 5-1** –Contrasti tra requisiti

### 5.6.2 Preservare l'approccio prestazionale

L'effettiva fattibilità dei requisiti prestazionali di un HPC non può essere assicurata attraverso la proliferazione e il grande dettaglio delle specifiche progettuali. Al contrario, quanto più si fa complesso lo studio tecnologico della miscela, tanto più la sua fattibilità deriva dal soddisfacimento di tutti i requisiti prestazionali, anche quando siano parzialmente contrastanti.

La frequente aggiunta, nei capitolati o nei documenti progettuali, di prescrizioni operative o di requisiti compositivi, anche quando siano ispirati alle conoscenze tecnologiche più aggiornate, ottiene talvolta il solo risultato di confondere il quadro di responsabilità delle parti.

Considerando il difficile equilibrio progettuale di una miscela HPC, il progettista dovrebbe limitarsi a definire tutti i requisiti prestazionali sul calcestruzzo fresco e indurito, obbligando di conseguenza il tecnologo a studiare e gestire al meglio i componenti a sua disposizione, adattando le miscele nel tempo per soddisfare tali requisiti, sia in fase di qualifica, sia durante la fornitura di calcestruzzo.

A titolo esemplificativo, risulta molto più stringente ed efficace un requisito numerico sul massimo incremento termico consentito al calcestruzzo (ad esempio 40° C in condizioni adiabatiche) di qualsiasi prescrizione compositiva che abbia lo stesso scopo, ma che voglia ottenerlo fissando limitazioni od obblighi per i tipi e i dosaggi di cementi e aggiunte da utilizzare.

Allo stesso modo, per limitare gli effetti del ritiro igrometrico è molto più efficace prescrivere un valore massimo di riferimento per la prova relativa (ad esempio, deformazioni pari a  $0,4 \cdot 10^{-3}$  in condizioni standard tra i 7 e 60 giorni) piuttosto che indicare tipi e quantità di additivi specifici da utilizzare: questa prescrizione compositiva, oltre a non garantire il successo, renderebbe anche incerta l'attribuzione di responsabilità.

## 5.7 ESEMPI DI DEFINIZIONE DELLE PRESTAZIONI

Le tabelle seguenti (Tabella 5-2 e 5-3), esemplificano alcuni casi di requisiti prestazionali che potrebbero essere definiti per un HPC.

Classe minima di resistenza	C90/105 a 84 giorni; C35/45 a 3 giorni
Classe di consistenza	F6 o SF1/SF2/SF3 Mantenimento della consistenza almeno 60 minuti dall'arrivo del carico al punto di getto
Classe di esposizione	XC3+XA1
Classe di contenuto di cloruri	0,2
Massimo ritiro igrometrico standard tra 7 e 28 giorni	400 $\mu\text{m}/\text{m}$
Massima profondità di penetrazione d'acqua in pressione	20 mm
Diametro massimo dell'aggregato	$\leq 16$ mm

**Tabella 5-2** –Requisiti prestazionali HPC

Classe minima di resistenza	C70/85 a 84 giorni; C60/70 a 28 giorni
Classe di consistenza	F6 o SF1/SF2/SF3 Mantenimento della consistenza per 60 minuti dall'arrivo del carico al punto di getto
Classe di esposizione	XC2
Classe di contenuto di cloruri	0,4
Massima profondità di penetrazione d'acqua in pressione	20 mm
Massimo delta (innalzamento) termico adiabatico	40°C
Diametro massimo dell'aggregato	≤16 mm

**Tabella 5-3** – Requisiti prestazionali HPC

Altri requisiti prestazionali dovranno derivare dall'osservazione di alcune prestazioni fisico meccaniche e termiche, dedotte da idonea sperimentazione da eseguirsi sulla miscela di qualifica:

- *Modulo elastico*: il modulo elastico, misurato sperimentalmente in conformità alla normativa vigente, dovrà essere dichiarato su una media di 3 provini confezionati dall'impasto che si ritiene idoneo e conforme alle specifiche di capitolato.
- *Resistenza alla trazione per flessione*: il valore sarà quello ottenuto da una media di almeno 3 provini confezionati dall'impasto di qualifica e portati a rottura secondo la normativa vigente.
- *Sviluppo di calore*: la prova deve essere eseguita in condizioni adiabatiche con relativo diagramma temperatura-tempo. L'innalzamento della temperatura dell'impasto di qualifica deve essere tale da non superare la temperatura di picco di 70°C.
- *Massima temperatura nel manufatto*: la temperatura massima all'interno del getto non deve superare i 70°C. Si dovrà tener conto del piano di getto e di tutte le precauzioni di protezione termica che si dovranno adottare durante la fase di stagionatura del manufatto per mantenere a 20°C il valore del gradiente termico, inteso come differenza tra la temperatura del calcestruzzo al nucleo e quella ambientale a contatto con la struttura. La protezione deve essere conforme ad uno o più metodi di protezione descritti dalle Linee guida per la messa in opera del calcestruzzo strutturale (C.S.L.P., 2008).
- *Sviluppo della resistenza meccanica a compressione nel tempo*: la miscela di qualifica deve essere caratterizzata dal diagramma resistenza-tempo a scadenze previste che comprendono almeno le seguenti stagionature: 1, 3, 7, 28, 60, 90 giorni con indicazione del modello matematico della curva ipotetica di regressione.
- *Controllo della temperatura in opera*: in funzione della tipologia in opera (per esempio plinto o getto fondazione di tipo massivo) o di lavorazioni in serie (pilastri o solette, ecc.), le temperature devono essere monitorate mediante l'impiego di termocoppie opportunamente posizionate all'interno dei getti, partendo dal nocciolo fino allo strato corticale del calcestruzzo unitamente a ulteriori termocoppie che devono rilevare la temperatura ambientale

(esterna) o dell'ambiente di contatto quando la struttura risulta protetta dallo stesso ambiente esterno.

## **6 PRODUZIONE, MESSA IN OPERA E CONTROLLO DI CALCESTRUZZI AD ALTE PRESTAZIONI**

Le considerazioni fatte nei capitoli precedenti, specialmente laddove ci si è occupati di stabilire i requisiti prestazionali e di descrivere le difficoltà per garantirne nel tempo la fattibilità tecnologica, spingono di fatto a definire un processo innovativo di qualifica/accettazione e controllo degli HPC, che può senz'altro costituire un modello anche per i calcestruzzi ordinari.

Il moderno approccio puramente prestazionale ai requisiti per il calcestruzzo rende necessario e conveniente applicare lo stesso sistema alle fasi di validazione e di controllo del prodotto.

### **6.1 QUALIFICA DI CALCESTRUZZI AD ALTE PRESTAZIONI**

La fase preliminare di qualifica sarà finalizzata soprattutto a verificare la capacità del produttore di calcestruzzo di soddisfare tutti i requisiti prestazionali e quindi di assicurare la fattibilità tecnologica.

Durante la qualifica l'elenco dei parametri tecnici da verificare coinciderà con quello dei requisiti prestazionali fissati. Il tradizionale interesse per la definizione di una ricetta qualificata, intesa come elenco di componenti e relativi dosaggi per metro cubo, oltre a contrastare sostanzialmente con la definizione di "calcestruzzo a prestazione garantita" della norma UNI EN 206-1 (2006), genera inoltre vincoli e requisiti compositivi che non aggiungeranno alcun elemento di confidenza per il progettista e invece potranno ostacolare nel tempo la fattibilità tecnologica e il soddisfacimento prestazionale, specialmente se si considera la fisiologica variabilità delle condizioni operative e delle proprietà dei componenti nel tempo, molto maggiore in genere dei margini di tolleranza di una singola ricetta di HPC. Unica eccezione è rappresentata dal calcestruzzo "a composizione richiesta", per il quale i requisiti sono esclusivamente compositivi e le verifiche in fase di qualifica, saranno orientate principalmente alla ricetta. Si presume, infatti, che in questo caso chi ha definito i requisiti abbia verificato preliminarmente la validità tecnologica della ricetta che è stata richiesta al fornitore. In genere, tuttavia, il calcestruzzo a composizione richiesta è capace di mantenere invariate le sue caratteristiche prestazionali soltanto in condizioni operative particolarmente costanti.

### **6.2 PRODUZIONE DI CALCESTRUZZI AD ALTE PRESTAZIONI**

In questa sezione vengono espone note sintetiche sulla produzione facendo in particolare riferimento ai seguenti aspetti:

- Stoccaggio dei materiali.
- Mescolatori e miscele di prova.
- Procedure di impianto per la mescolazione.
- Controllo di produzione.
- Accettazione in sito.

In generale, si può asserire che rispetto al caso dei calcestruzzi ordinari, gli HPC sono meno tolleranti a cambiamenti nelle caratteristiche dei costituenti ed a variazioni tra impasto ed impasto. È inoltre importante che tutti gli aspetti della produzione e della posa in opera siano accuratamente controllati. Sarebbe quindi ideale che la produzione degli HPC avvenga sempre attraverso processi in cui le attrezzature e i materiali siano controllati. Inoltre, tutto il personale coinvolto nella produzione, consegna e posa in opera di questa tipologia di calcestruzzi dovrebbe ricevere adeguata preparazione soprattutto assistendo alle fasi di produzione ed ai test.

#### ***6.2.1 Stoccaggio dei materiali***

Le regole di stoccaggio dei materiali utilizzati nel confezionamento degli HPC sono le stesse che per il calcestruzzo ordinario. Poiché gli HPC sono, tuttavia, più sensibili ad ogni tipo di variazione, maggiore attenzione va indirizzata ai seguenti importanti aspetti:

- per gli aggregati occorre evitare le contaminazioni granulometriche e proteggerli dagli agenti atmosferici, in modo da prevenire le variazioni di umidità ed il movimento del feno.
- in merito al cemento, le addizioni e gli additivi valgono le stesse regole di stoccaggio che per il caso dei calcestruzzi ordinari, con l'attenzione di evitare variazioni di prestazioni dovute alla consegna dei materiali che va mantenuta uniforme per la durata dell'intera produzione di HPC.

### **6.2.2 Mescolatori e procedure di impianto per la preparazione**

Gli HPC possono essere prodotti con mescolatori di ogni tipo:

- a pale;
- a caduta libera;
- autobetoniera;
- mescolatori forzati.

E' importante che il mixer sia in buone condizioni meccaniche e che assicuri piena ed uniforme mescolazione dei materiali solidi, con sufficiente azione di taglio per disperdere e attivare il superfluidificante specialmente nel caso di SCC. Poiché negli SCC le forze di attrito sono ridotte, il tempo necessario per per attivare il superfluidificante ed ottenere un completo mescolamento può essere più lungo che nel caso di calcestruzzi di normale consistenza.

Nel caso di alto contenuto di volume di pasta cementizia o di matrice, ad alta fluidità, l'omogeneizzazione dei costituenti, rispetto a calcestruzzi di più bassa consistenza, può risultare più impegnativo.

La maggior difficoltà è la formazione di agglomerati (balling) di materiale non perfettamente miscelato e che rimane tale anche in fase di scarico del calcestruzzo, creando difficoltà nei getti specialmente con beton pompa.

La formazione di tali agglomerati si verifica spesso quando la miscelazione dei componenti degli HPC avviene impiegando direttamente le tradizionali autobetoniere del calcestruzzo e non con miscelatori forzati o premiscelatori.

La suddetta problematica deve essere opportunamente studiata dal produttore di calcestruzzo mediante prove di carico e scarico, al fine di eliminare la quantità di calcestruzzo agglomerato.

Anche se non esistono studi definitivi a riguardo, il fenomeno degli agglomeramenti del calcestruzzo dipende da più fattori, il maggiore dei quali può essere rappresentato dal fatto che la miscela in autobetoniera si può trovare in condizioni troppo asciutte e le pale della stessa agiscono più da piatto granulatore che da mescolatore. L'obiettivo, pertanto, rimane quello, sempre nel caso di impiego di autobetoniera, di programmare l'ingresso dei materiali in maniera tale da che la miscelazione rimanga il più possibile superfluida. La procedura di carico deve essere di conseguenza attentamente studiata, sperimentata e procedurata. Esperienze molto comuni maturate presso produttori di calcestruzzo testimoniano che i calcestruzzi ad alte prestazioni possono essere prodotti anche impiegando le tradizionali autobetoniere.

Nei capitoli precedenti si è specificato come l'aumento della resistenza a compressione dei calcestruzzi porti inevitabilmente ad un aumento dello scarto quadratico medio dei valori dedotti dai prelievi effettuati durante la fase sia di qualifica e sia, soprattutto, nella fase di produzione e consegna.

La produzione dei calcestruzzi HPC è, infatti, influenzata da numerosi fattori che "incidono" maggiormente o che contribuiscono ad incrementare il valore della deviazione standard.

Si citano di seguito alcuni principali esempi:



- Cambiamenti in corso di produzione dell'umidità degli aggregati:
- Variazioni nella distribuzione granulometrica degli aggregati
- Variazione dei moduli di finezza delle sabbie e, soprattutto, del contenuto dei fini
- Variazioni nella sequenza di preparazione

Nel caso che l'impianto sia fornito di premescolatori per il calcestruzzo o premescolatori parziali atti alla sola miscelazione del volume della matrice, sarà sempre compito del produttore redigere una opportuna procedura di carico e di controllo di processo, per esempio una curva di taratura slump/manometro dell'autobetoniera o il valore del wattometro del motore del premescolatore.

### **6.3 CONSEGNA ED ACCETTAZIONE IN SITO**

E' importante che esista una condivisa e documentata procedura standard per il ricevimento e l'accettazione degli HPC in sito.

In merito a tale procedura, il produttore del calcestruzzo ed il tecnico che ne prescrive i requisiti prestazionali debbono trovarsi in accordo prima della stesura di ogni nuovo contratto di fornitura, che a sua volta dovrebbe includere l'ispezione visiva di ogni carico di calcestruzzo, la lista delle prove ed i parametri di controllo.

Le operazioni di controllo degli HPC durante la fornitura e la messa in opera saranno innanzitutto ispirate ai criteri di controllo di conformità prestazionale fissati dalle leggi e dalle normative tecniche vigenti.

La particolare criticità dei calcestruzzi ad alte prestazioni rende però molto utili alcuni controlli aggiuntivi facilmente attuabili in cantiere, come il tempo di mantenimento della consistenza e le prove reologiche aggiuntive sul calcestruzzo autocompattante.

Particolare importanza riveste il controllo periodico del soddisfacimento dei requisiti prestazionali diversi dalla resistenza meccanica, dato che - come già detto in precedenza - tali prestazioni non sono assicurate dal mantenimento di una composizione richiesta, ma dalla continua rivalutazione della ricetta stessa da parte del tecnologo che deve garantire nel tempo la rispondenza prestazionale.

Sarà quindi utile stabilire preliminarmente le frequenze di tali controlli, che potranno anche comprendere ulteriori controlli di requisiti quali l'incremento termico, il ritiro igrometrico e le altre prestazioni richieste.

La procedura standard di ricevimento ed accettazione in cantiere dovrebbe includere alcuni dettagli riguardanti principalmente le reciproche responsabilità con riferimento alle prove, sia reologiche sia fisico meccaniche, le modalità delle stesse in conformità alle UNI EN 12390 (2002-2010) unitamente ad elaborazioni statistiche che possano essere condivise e che devono fornire eventuali azioni correttive alla miscela per il mantenimento delle prestazioni.

Una procedura di controllo dovrebbe prevedere, per esempio, l'elencazione di tutte le prove previste per un completo monitoraggio delle prestazioni.

In particolare dovrebbe essere verificato che:

- i test sono condotti da personale competente in luoghi adeguati (al riparo, senza vibrazioni, con attrezzature calibrate, su piani regolari, ecc.);
- il materiale è rimescolato in autobetoniera per almeno 1 minuto ad alta velocità prima del test;
- il campionamento avviene in accordo alla UNI EN 12350-1 (2009), (il primo quantitativo di calcestruzzo dall'autobetoniera non è rappresentativo);
- i campioni di calcestruzzo prelevati per le prove di resistenza sono gettati in unico strato senza compattazione.

Le prove vanno eseguite in conformità alle UNI EN 206-9 (2010) in accordo con le UNI EN 12390 (2002-2010).

Il test più raccomandato per caratterizzare l'SCC in sito è certamente quello dello *slump-flow*. Questa prova è in grado di fornire utili indicazioni non solo in riferimento alla specifica della consistenza ma anche informazioni circa:

- uniformità e distribuzione dei componenti dell'SCC,
- assenza di materiale concentrato al centro del cerchio di calcestruzzo,
- eventuale presenza di segregazione della pasta cementizia.

Oltre alla prova dello slump flow, la procedura deve prendere in considerazione, secondo una frequenza condivisa, anche le prove, di cui sempre alla UNI EN 206-9, come il V-funnel, L'L-box, il J-ring e, per ultimo, il test della resistenza alla segregazione mediante il metodo al setaccio di 4 mm in accordo alla UNI EN 12350-11 (2010).

#### **6.4 MESSA IN OPERA DI CALCESTRUZZI AD ALTE PRESTAZIONI**

Prima della consegna del calcestruzzo l'appaltatore deve comunque assicurarsi che il cantiere sia stato accuratamente preparato. Questo include che:

- le specifiche dell'HPC siano appropriate al lavoro;
- il cantiere possa gestire gli scarichi di HPC alla velocità convenuta;
- le procedure di accettazione dell'HPC siano concordate e documentate;
- il personale di cantiere sia addestrato alla messa in opera dell'HPC;
- le casseforme siano opportunamente preparate.

E' essenziale che la capacità di produzione dell'impianto, il tempo di trasporto e la capacità di getto in cantiere siano tutti aspetti bilanciati per assicurare che il personale in cantiere getti senza interruzioni e nei tempi di mantenimento della consistenza. Interruzioni temporanee durante la preparazione e lo scarico possono favorire fenomeni tixotropici nel calcestruzzo che influenzano la capacità di riempimento dei casseri alla ripresa dello scarico (soprattutto nel caso di SCC) e la comparsa di linee di ripresa sulle superfici verticali.

Testare l'uniformità degli HPC di ogni scarico è di assoluta importanza. Tuttavia alcune modificazioni dell'HPC in sito possono rendersi indesiderabili: in tal caso gli aggiustamenti debbono essere controllati e valutati dal tecnologo del produttore ed ogni modifica all'HPC va annotata. Aggiunte di additivi come controllori della presa possono essere fatti in cantiere prima del getto a patto che l'effetto sia stato ben valutato. In particolare, nel caso di SCC con slump-flow fuori dai criteri di conformità, questi dovrebbero essere aggiustati solo in base a procedure concordate e documentate, tenendo presente che ogni aggiunta richiede 1 min/m<sup>3</sup> di autobetoniera con un minimo di 4 minuti.

In merito a supervisione e competenza, è essenziale che il personale di cantiere utilizzato nelle fasi di getto degli HPC sia stato preparato ed istruito in merito ai requisiti specifici di posa in opera del calcestruzzo. Nel caso di SCC occorre, ad esempio, che particolare attenzione sia indirizzata ai seguenti aspetti:

- effetto delle vibrazioni sulla stabilità del mix;
- velocità di innalzamento del getto (in m/h);
- effetto di una interruzione durante il getto;
- azioni da intraprendere se si verifica un'interruzione;
- requisiti per il getto con pompa, bicchiere o canaletta;
- posizionamento dello scarico (altezze di caduta, percorrenze, ecc.);
- finitura delle superfici di getto (esposte) e maturazione.

##### **6.4.1 Aspetti relativi alle casseforme per SCC**

Rispetto ai calcestruzzi ordinari, i calcestruzzi autocompattanti garantiscono normalmente una più alta qualità e finitura superficiale fornendo una copia speculare delle casseforme e consentendo di migliorare il design e l'estetica di molte strutture. Tuttavia, una buona preparazione delle casseforme in combinazione all'uso di disarmanti idonei è essenziale per ottimizzare la finitura superficiale e l'estetica finale dell'SCC. L'alta fluidità degli SCC impone un'estrema cura nell'assemblaggio dei casseri che devono risultare particolarmente precisi e ben assemblati per risultare a perfetta tenuta. Tutto questo ha finora concentrato l'interesse per l'SCC soprattutto da parte dell'industria della prefabbricazione, limitando la diffusione di questi calcestruzzi nei cantieri ordinari dove la tecnologia del calcestruzzo tradizionale, meno impegnativa, è ancora preferita a quella degli SCC.

Il definitivo sviluppo dell'SCC nei cantieri è risultato tuttavia condizionato anche dal problema delle maggiori pressioni che, rispetto ai calcestruzzi ordinari, l'SCC tende generalmente ad esercitare contro i casseri durante le operazioni di getto. Questo, inevitabilmente, si traduce in un drastico incremento dei costi per le costruzioni realizzate in SCC piuttosto che con calcestruzzo ordinario. Secondo l'ACI 347 R-03 (2004), *“il costo di realizzazione delle casseforme può raggiungere il 60% di quello dell'intera struttura, e qualche volta superare anche queste proporzioni”*.

Ad oggi, tra l'altro, non esistono ancora modelli universalmente accreditati per la previsione di queste pressioni, e l'indicazione più cautelativa per il caso di riempimenti di casseforme eseguiti dall'alto resta quella di considerare l'SCC come un materiale perfettamente fluido (con densità pari a 2,4 volte quella dell'acqua) che genera pressioni di tipo idrostatico (cioè direttamente proporzionali alla profondità).

Nel caso dei calcestruzzi ordinari vibrati, esistono ormai da tempo formulazioni in grado di consentire un'adeguata previsione delle pressioni esercitate sui casseri. Esse tengono conto, principalmente, dei seguenti fattori:

- dimensione e forma aggregati;
- temperatura ambientale e del calcestruzzo;
- tempo di presa;
- tipo di additivi;
- forma dei casseri;
- velocità di riempimento;
- altezza del getto;
- metodo di getto (pompaggio dall'alto o dal basso);
- fluidità e coesione del calcestruzzo.

Le istruzioni tecniche relative al progetto e dimensionamento dei casseri per calcestruzzi di normale consistenza non si adattano, però, al caso dei calcestruzzi autocompattanti e, benché sia plausibile che gli stessi fattori influenzino anche le pressioni dagli SCC, i numerosi test finora condotti per definire una relazione tra tutti questi fattori continuano a fornire risultati spesso contraddittori e di difficile interpretazione. Ricerche del CEBTP (1999), condotte su casseforme strumentate alte 12 m, hanno infatti mostrato che le pressioni esercitate dall'SCC possono deviare anche notevolmente dall'andamento idrostatico, fino a riduzioni del 30-35 % al piede della struttura: la differenza, in questo caso, è stata principalmente attribuita all'attrito fra il calcestruzzo e le pareti interne dei casseri. Durante alcune ricerche condotte in Svezia, le pressioni orizzontali misurate su pile da ponte in SCC furono pari al solo 50 % circa di quelle generate da calcestruzzi di consistenza ordinaria (Skarendahl, 1999).

Altri autori, tuttavia, (Brameshuber e Uebachs, 2003) hanno realizzato esperimenti durante i quali le pressioni generate dall'SCC sono invece risultate in accordo con l'ipotesi di comportamento perfettamente idraulico del materiale. La giustificazione, in questo caso, è stata attribuita agli aggravanti effetti dovuti *“all'alta velocità di getto adottata”* (3 m/h), sebbene questa non fosse certo maggiore che in altri casi in cui le pressioni sono risultate più basse. È, dunque, chiaro che le ragioni per un così vasto panorama di risultati sono ancora oscure, giacché, ad esempio, casi di pressioni pari al

solo 60 % del valore idrostatico sono noti, dalla letteratura, anche per SCC gettati con velocità di innalzamento di 5 m/h (Billberg, 2003). Negli ultimi anni diverse campagne sperimentali sono quindi state condotte in laboratorio ed in situ per indagare meglio il comportamento dell'SCC nelle casseforme sia durante la fase di getto che nelle ore successive alla sua conclusione. I test sperimentali hanno riguardato l'uso di diverse velocità di getto, diverse miscele di ingredienti (variando contenuto e tipo degli additivi chimici: ritardanti, acceleranti, viscosizzanti e superfluidificanti), vari rapporti a/p, diverse tipologie di cemento, di binders, di aggregati e contenuti dei fini.

Una completa ricognizione dei risultati ottenuti in tutte queste ricerche è stata condotta da Galeota et al. (2008), in cui viene anche presentato uno studio sulla natura dei fenomeni tixotropici e sulla loro influenza sulle pressioni esercitate dagli SCC. Ulteriori studi condotti recentemente sullo stesso filone (Gregori et al., 2005; Douglas et al., 2011; Ferron et al., 2008; Amziane et al., 2010; Kwon et al., 2010) hanno confermato l'esistenza di un legame tra il grado di tixotropia degli SCC e le pressioni che essi esercitano nei casseri, ma le formulazioni proposte dagli autori sono ancora differenziate tra loro ed i vari modelli teorici non ancora pienamente validati. Le esperienze di laboratorio ed in situ hanno finora mostrato che SCC più tixotropici tendono a spingere meno se gettati dall'alto. E' invece noto che, quando l'SCC è pompato dal basso e specialmente alla ripresa dopo uno stop, la pressione nel punto di scarico può raggiungere valori anche più alti di quelli idrostatici. Tale comportamento risulta, comunque incostante, non correlato ai valori dello slump flow iniziale, ed estremamente sensibile anche a vibrazioni involontarie esterne (ad esempio legate, in cantiere, al transito dei mezzi). E' dunque per questo che per il progetto delle casseforme, dei supporti e degli ancoraggi, si assume cautelativamente che le pressioni esercitate dall'SCC gettato dall'alto siano quelle pienamente idrostatiche. I casi registrati hanno, tuttavia, evidenziato come la variabile più significativa per il controllo delle pressioni laterali sia la velocità di getto. La forma e l'intensità dei diagrammi di spinta sui casseri è infatti governata dalla velocità di risalita del calcestruzzo nelle casseforme. Mantenendo questa velocità a valori opportunamente bassi, (dell'ordine di 3-5 m/h), le pressioni possono essere ridotte, mentre l'adozione di velocità più alte è certamente causa di spinte maggiori. Questo effetto negativo, tuttavia, può trovare una certa mitigazione nel getto di strutture particolarmente alte, (>6 m). Infatti, per particolari combinazioni di altezze e velocità di getto, i tempi necessari alla conclusione dell'opera possono risultare sufficientemente lunghi, (2,5 - 3 h) così da consentire ai primi strati di calcestruzzo (quelli al piede della struttura) lo sviluppo di una certa resistenza allo scorrimento ed una sostanziale perdita di mobilità. In questi casi, la deviazione delle pressioni reali rispetto all'ipotesi di comportamento idraulico può risultare notevole (anche fino al 30 - 40 % in meno). A parità di fluidità, l'adozione di rapporti a/p più bassi (ad esempio 0,30 anziché 0,35), in combinazione con più alti dosaggi di additivo superfluidificante e di VMA può aiutare nella produzione di SCC più tixotropici e, quindi, potenzialmente meno spingenti.

## 7 INQUADRAMENTO NORMATIVO

### 7.1 NORMATIVA ITALIANA

Il calcestruzzo è classificato in classi di resistenza in base alla resistenza a compressione caratteristica cubica  $R_{ck}$  e cilindrica  $f_{ck}$ . Le norme UNI EN 206-1 (2006) e le NTC, (MIN.LL.PP, DM 14 gennaio 2008), individuano per i calcestruzzi le seguenti classi (Tabella 7-1), in cui il primo valore dopo la C indica la resistenza cilindrica  $f_{ck}$  ed il secondo la resistenza cubica  $R_{ck}$ ; si noti che le classi sono sostanzialmente sovrapponibili e la UNI EN 206-1 (2006) considera calcestruzzi a resistenza superiore fino a C100/115.

<i>Classi UNI 206-1:2006</i>	<i>Classi DM 2008</i>
C8/10	C8/10
C12/15	C12/15
C16/20	C16/20
C20/25	C20/25
C25/30	C25/30
	C28/35
C30/37	
	C32/40
C35/45	C35/45
C40/50	C40/50
C45/55	C45/55
C50/60	C50/60
C55/67	C55/67
C60/75	C60/75
C70/85	C70/85
C80/95	C80/95
C90/105	C90/105
C100/115	

**Tabella 7-1** –Classi di resistenza secondo la UNI EN 206-1 (a sinistra) e DM 2008 (a destra)

Con riferimento ai calcestruzzi ad alte prestazioni, in particolare, le NTC, (MIN.LL.PP, DM 14 gennaio 2008) impongono che per le classi di resistenza superiori a C45/55, la resistenza caratteristica e tutte le grandezze meccaniche e fisiche che hanno influenza sulla resistenza e durabilità del conglomerato siano accertate prima dell'inizio dei lavori tramite un'apposita sperimentazione preventiva; impone altresì che la produzione debba seguire specifiche procedure per il controllo di qualità. Invece, per la realizzazione di elementi strutturali con calcestruzzi appartenenti a classi di resistenza superiori a C70/85, la normativa impone che queste siano sottoposte ad autorizzazione del Servizio Tecnico Centrale su parere del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, autorizzazione che riguarda l'utilizzo del materiale nelle specifiche tipologie strutturali proposte sulla base di procedure definite dal Servizio Tecnico Centrale stesso.

### 7.2 CNR-DT 204

Tali linee guida rappresentano il documento italiano di riferimento per la progettazione di strutture in calcestruzzo fibrorinforzato. A differenza delle precedenti UNI 11188 (2007), che trattano solo fibre di acciaio, qui vengono considerate tutte le tipologie di fibre. Il materiale composito viene classificato come incrudente (*hardening*) o degradante (*softening*) sulla base del suo comportamento a trazione uniassiale. La misura di tale proprietà meccanica è effettuata a partire dalla risposta caratteristica misurata in prove di trazione uniassiale per il materiale incrudente ed in prove di flessione a quattro punti su provino intagliato per materiale degradante. In quest'ultimo caso la norma di prodotto di riferimento è la UNI 11039-1 (2003); in base ad essa, a partire dalla risposta a flessione

oltre la fessurazione della matrice, vengono introdotti due parametri di resistenza equivalente a flessione  $f_{eq0-0,6}$  e  $f_{eq0,6-3}$ , corrispondenti a tensioni nominali medie, calcolate sulla sezione critica intagliata, in corrispondenza di due intervalli di apertura di fessura ( $w=0-0,6$  mm e  $w=0,6-3$  mm). Tali valori di resistenza vengono rispettivamente associati agli stati limite di esercizio ed ultimo. A partire da questi valori si definiscono, mediante ipotesi basate sul modello di sezioni piane del concio medio, i legami costitutivi semplificati in trazione uniassiale sfruttando equilibri sezionali imposti per i corrispondenti valori di apertura di fessura. Il legame costitutivo è espresso in funzione dello sforzo,  $\sigma$ , in funzione dell'apertura di fessura,  $w$ . Per passare ad un legame sforzo-deformazione viene introdotta la lunghezza caratteristica strutturale  $l_{cs}$  pari al minimo tra la distanza tra le fessure, in caso di multi localizzazione (in presenza di armatura tradizionale o di materiali incrudenti), e l'altezza della sezione, in presenza di una sola fessura (localizzazione). La relazione costitutiva a trazione, che si basa prevalentemente sul comportamento ad estrazione delle fibre in presenza di fessure (*pull-out*), è assunta come riferimento in tutte le equazioni successive che definiscono le prestazioni strutturali. La condizione di stato limite ultimo per il materiale fibrorinforzato soggetto a trazione uniassiale viene associata al raggiungimento di una apertura di fessura limite  $w_u$  pari al minimo tra un requisito di duttilità ( $\epsilon_u \cdot l_{cs}$ ) ed una dimensione associabile alla massima apertura di fessura compatibile con una risposta uniforme del composito ( $w_u = 2,5$  mm). Vengono introdotte le equazioni di verifica per elementi monodimensionali e bidimensionali (lastre e piastre) per gli stati limite di esercizio ed ultimi. Vengono anche introdotte le principali verifiche per il controllo del materiale nelle fasi esecutive e, in particolare, per la determinazione della distribuzione delle fibre che risulta il parametro determinante avendo assunto come ipotesi di comportamento costitutivo l'omogeneità e l'isotropia. Per tener in conto distribuzioni non isotrope, nel caso di getti effettuati con procedure standardizzate e pertanto ripetitive, è introdotta una prova a flessione (sempre a quattro punti) su provino non intagliato definito "strutturale" nella misura in cui ripropone la medesima procedura di getto della struttura: tale prova risulta particolarmente consigliata per provini sottili. Nelle linee guida viene introdotto per la prima volta un parametro che amplifica la resistenza di strutture dotate di capacità redistributive degli sforzi, in quanto si è potuto osservare che per tali strutture il valore della capacità resistente è prevalentemente correlato alla resistenza media e non a quella caratteristica, tenuto conto dell'importante scarto delle proprietà meccaniche oltre la fessurazione in provini con sezioni critiche di dimensioni limitate (150x150 mm), dovuto prevalentemente alla distribuzione non omogenea delle fibre. Nelle linee guida viene anche suggerita una procedura per la verifica di resistenza alle alte temperature corrispondenti a scenari di incendio.

### 7.3 ACI 363 R-92, ACI 441 R-96 ED ACI 237 R-07

Il documento ACI 363 R-92 (1993) analizza e descrive le proprietà dei calcestruzzi caratterizzati da resistenza a compressione fino a 12000 psi, equivalenti a 83 MPa. Per tali tipologie di calcestruzzi, vengono inoltre illustrate le caratteristiche fisiche e le proprietà dei materiali costituenti, fornendo indicazioni circa il mix design necessario ad ottenere specifiche proprietà meccaniche. Vengono quindi introdotti modelli meccanici e formulazioni numeriche necessarie a descrivere le proprietà meccaniche di tali calcestruzzi, consentendo di progettare coerentemente con l'approccio adoperato nei documenti e nei codici ACI.

Il documento ACI 441 R-96 (1996) invece, analizza il comportamento meccanico di colonne in calcestruzzo armato realizzate con calcestruzzi ad alta resistenza, individuando con questa definizione i calcestruzzi con resistenza a compressione oltre i 10000 psi, equivalenti a 70 MPa. Lo scopo del documento è quello di illustrare il comportamento meccanico dell'elemento strutturale colonna, sollecitato in pressoflessione monotona e ciclica. Vengono quindi illustrati gli effetti sul comportamento meccanico delle colonne di diverse configurazioni di armatura, sia a flessione, sia a taglio. Sebbene non si indichi un limite superiore alla resistenza a compressione del calcestruzzo per la quale si considerino valide le formulazioni proposte, si evidenzia che i test sperimentali su cui si basano i

modelli meccanici illustrati si riferiscono a calcestruzzi con resistenza a compressione fino a circa 100 MPa.

Il documento ACI 237 R-07 (2007) presenta uno stato dell'arte sui calcestruzzi autocompattanti, con riferimento alle proprietà allo stato fresco ed indurito, ed alla loro misura. Inoltre fornisce indicazioni per la progettazione delle miscele, la produzione, il trasporto, la messa in opera e le operazioni di finitura, corredate da indicazioni per la definizione e la misura delle prestazioni richieste in ciascuna delle suddette fasi operative.

## 7.4 EUROCODICE 2

Il documento UNI EN 1992-1-1 (2005), fornisce principi e regole per il calcestruzzo normale e ad alta resistenza. Altresì sono contemplati i calcestruzzi con aggregati leggeri. La resistenza a compressione del calcestruzzo è individuata con classi di resistenza del calcestruzzo che fanno riferimento alla resistenza caratteristica cilindrica  $f_{ck}$ , o alla resistenza caratteristica cubica  $f_{ck,cube}$ , in accordo con la EN 206-1 (2006). Le classi di resistenza sono basate sulla resistenza caratteristica cilindrica determinata a 28 giorni con un valore massimo di  $C_{max}$  da adottare in ciascuno Stato attraverso gli annessi nazionali; il valore massimo raccomandato è C90/105. Le classi sono uguali a quelle recepite dalle NTC, (MIN.LL.PP, DM 14 gennaio 2008).

## 7.5 fib MODEL CODE 2010

Il documento *fib Model Code* (2010) contempla calcestruzzi con resistenza cilindrica caratteristica a compressione fino a 120 MPa e distingue tra *Normal Strength Concrete*, caratterizzati da una resistenza caratteristica a compressione fino a 50 MPa, e *High Strength Concrete*, caratterizzati da una resistenza a compressione superiore a 50 MPa.

Il documento *fib Model Code* (2010) si basa sulle definizioni introdotte dal documento ISO 22965-1 (2007) e ISO 22965-2 (2007).

Si individuano in particolare le seguenti classi, per i calcestruzzi di peso normale C e con aggregati leggeri LC:

- C12, C20, C30, C40, C50, C60, C70, C80, C90, C100, C110, C120
- LC8, LC12, LC16, LC20, LC25, LC30, LC40, LC50, LC60, LC70, LC80

laddove, il valore numerico indica la resistenza caratteristica cilindrica,  $f_{ck}$ . In tal modo è stata abbandonata la doppia dizione che include anche la resistenza cubica caratteristica a compressione.

Il Model Code introduce due paragrafi riferiti ai calcestruzzi fibrorinforzati: il paragrafo 5.6 sul materiale ed il paragrafo 7.7 sulle verifiche strutturali. Nel primo paragrafo viene introdotta una classificazione concettualmente non molto diversa da quella introdotta nella UNI 11039-1 (2003), basata su due parametri: le resistenze equivalenti a flessione per aperture di fessura rispettivamente pari a 0,5 mm e 2,5 mm. Il test di flessione di riferimento (UNI EN 14651:2007), è un test introdotto dalla Commissione Rilem TC 162 TDF (Vandewalle et al., 2003), ovvero una prova di flessione su tre punti su provino avente una sezione pari a 150x150 mm, intagliato nella sezione di mezzzeria in corrispondenza del carico centrato con sezione critica di 150x125 mm; la distanza tra gli appoggi è pari a 500 mm. La classificazione del materiale si basa su un numero che indica la classe di resistenza nominale caratteristica a flessione per  $w=0,5$  mm ( $f_{R1}$ ) ed una lettera che indica il rapporto tra la resistenza caratteristica nominale a flessione per  $w = 2,5$  mm ( $f_{R3}$ ) e la  $f_{R1}$ . Sono accettati come strutturali quei materiali in grado di garantire minime prestazioni in termini di resistenza nominale caratteristica residua a flessione pari a  $f_{R1} \geq 0,4 f_{Lk}$ , essendo quest'ultima la resistenza di prima fessurazione del composito e  $f_{R3} \geq 0,5 f_{R1}$ . Le relazioni costitutive in trazione uniassiale sono definite seguendo lo stesso approccio delle linee guida CNR-DT 204 (2006): anche in questo caso per definire incrudente un materiale si assume che tale materiale sia in grado di giungere al valore di una defor-

mazione in trazione pari all'1 % senza incorrere nel fenomeno della localizzazione ovvero della formazione di una macrofessura. Le resistenze nominali a flessione si basano in accordo con la UNI EN14651 (2007) su valori corrispondenti ad aperture puntuali in corrispondenza della bocca dell'intaglio (CMOD - Crack Mouth Opening Displacement) e non dell'apice (CTOD - Crack Tip Opening Displacement) e non sono valori medi espressi per intervalli di apertura. Per tenere in conto distribuzioni non omogenee ed isotrope delle fibre si introduce un coefficiente  $K$  che a denominatore rispetto alla resistenza di progetto può assumere valori maggiori o minori di 1, a seconda che il contributo possa essere sfavorevole o favorevole per la particolare orientazione. Viene introdotto il concetto che a fronte di un  $K < 1$  occorra considerare in direzione ortogonale un  $K > 1$ . Il parametro che mira a considerare l'effetto favorevole della distribuzione degli sforzi nelle strutture con ampie capacità redistributive è il  $K_{Rd}$  per il quale viene proposto un possibile approccio quantitativo di valutazione. Tutti gli stati limite ultimi vengono correlati alla resistenza  $f_{Ftu}$  calcolabile sulla base delle resistenze nominali caratteristiche  $f_{R1k}$  ed  $f_{R3k}$  e corrispondente all'apertura limite  $w_u$  considerando un coefficiente di sicurezza  $\gamma_F$  pari a 1,5 mentre tutte le formule relative all'esercizio tengono conto della resistenza  $f_{Fts}$  pari a  $0,45f_{R1k}$ , valore della resistenza per un'apertura  $CMOD = 0,5$  mm. Nelle verifiche di esercizio vengono anche suggerite espressioni per il calcolo delle aperture di fessura tenendo conto dell'effetto di cucitura delle fibre computato sempre sulla base di  $f_{Ftsk}$ .



## 8 CALCESTRUZZI AD ALTE PRESTAZIONI E SOSTENIBILITÀ

In questa sezione, si intende analizzare il tema della sostenibilità di strutture civili realizzate adoperando calcestruzzi HPC. Si precisa innanzitutto che una valutazione di sostenibilità deve essere condotta con riferimento ad un'unità funzionale ben definita, ovvero ad un oggetto della valutazione, al quale riferire gli impatti economici, ambientali e sociali. Con riferimento alle operazioni di trasformazione realizzate nel mondo delle costruzioni, l'unità funzionale deve riferirsi all'intero edificio o infrastruttura, o all'intero intervento realizzato e non può riferirsi al singolo componente o al singolo materiale adoperato. La disamina quindi delle caratteristiche di sostenibilità associabili ai calcestruzzi ad alte prestazioni, condotta in questo capitolo, non ha lo scopo di fornire indicazioni circa la sostenibilità di tali materiali, ma ha invece l'obiettivo di analizzare le proprietà che possono incidere positivamente sulla valutazione di sostenibilità, condotta per l'intero edificio o l'intera infrastruttura.

Coerentemente poi con l'approccio alla sostenibilità, la valutazione di sostenibilità di una qualsiasi operazione di trasformazione dell'ambiente costruito, che sia relativa alla realizzazione di una nuova struttura o all'intervento su una struttura esistente, va condotta tenendo conto di tre aspetti fondamentali:

- è necessario far riferimento all'impatto ambientale, sociale ed economico indotti dalla trasformazione oggetto della valutazione;
- nella valutazione degli impatti va considerata sia la fase di realizzazione sia la fase di gestione, manutenzione e dismissione dei materiali e delle strutture;
- gli impatti ambientali, sociali ed economici vanno valutati con riferimento ai diversi attori coinvolti nella trasformazione, ovvero gli operatori coinvolti nella realizzazione, gli utenti della struttura attuali e futuri e coloro sui quali graveranno gli oneri legati alla manutenzione ed alla dismissione della struttura stessa.

Una valutazione di sostenibilità poi, di un qualsiasi intervento di trasformazione dell'ambiente costruito, va condotta in maniera comparativa. La sostenibilità, infatti, è un criterio complesso, che racchiude molteplici caratteristiche e performance di natura molto diversa tra loro, relative agli aspetti ambientali, sociali ed economici. Il requisito della sostenibilità va adoperato quindi in fase di progettazione degli interventi, per individuare l'opzione più "sostenibile", laddove, però, inevitabilmente, taluni aspetti che concorrono alla definizione della sostenibilità potranno essere in conflitto con altri. La valutazione della sostenibilità di una qualsiasi opzione progettuale è uno strumento di supporto alle decisioni che, operando una sintesi del sistema di requisiti e criteri, conduce verso la scelta maggiormente sostenibile, relativamente a tutte quelle praticabili.

La valutazione della sostenibilità di un intervento che preveda l'utilizzo di calcestruzzi HPC, come anche di qualsiasi materiale, va contestualizzata caso per caso, non potendo pervenire a delle valutazioni assolute. E' possibile invece evidenziare talune caratteristiche e peculiarità del calcestruzzi HPC, che possono rendere una specifica scelta progettuale che ne preveda l'utilizzo, più "sostenibile" di altre opzioni, che prevedano l'impiego di altri materiali strutturali.

Le caratteristiche che di seguito si evidenzieranno non costituiscono delle valutazioni di sostenibilità dei calcestruzzi HPC, ma rappresentano invece gli ingredienti di procedure di valutazione di sostenibilità, che non possono confrontare in maniera assoluta i calcestruzzi HPC con altri materiali strutturali, ma devono riguardare, quindi, in maniera specifica le concrete opzioni progettuali.

Per ciascuna delle caratteristiche seguenti si evidenziano quindi gli aspetti positivi e negativi apportati dai calcestruzzi HPC con riferimento agli impatti ambientali, sociali ed economici, facendo riferimento a tutta la potenziale vita utile del materiale. Nell'ultimo paragrafo si analizzano i vantaggi e gli svantaggi derivanti dall'utilizzo di calcestruzzi HPC nell'implementazione della procedura di

valutazione della sostenibilità attraverso il protocollo ITACA, individuato dalla Conferenza delle Regioni e delle Province autonome come strumento di valutazione della sostenibilità degli interventi edilizi.

### **8.1 EMISSIONI DI CO<sub>2</sub> ED ALTRE EMISSIONI**

Il mondo delle costruzioni è responsabile di circa il 6 % del consumo totale di risorse energetiche e dell'inquinamento atmosferico per emissione di CO<sub>2</sub>.

Nella produzione di calcestruzzo destinato ad opere costruttive si possono distinguere le varie fasi del processo di produzione che più si discostano dai principi di un processo sostenibile ed è possibile associare a ciascuna di esse una quota di responsabilità nei confronti del quantitativo di CO<sub>2</sub> che viene emessa in atmosfera.

Ovviamente il processo produttivo del calcestruzzo è comprensivo anche della fase preliminare di approvvigionamento di tutti i materiali componenti, cemento in primis, aggregati, acqua, additivi chimici.

Le fasi produttive a più alto rischio sono:

- Produzione del clinker;
- Macinazione del clinker con il gesso per ottenere cemento Portland;
- Frantumazione di aggregati estratti da roccia o escavazione di elementi lapidei alluvionali;
- Miscelazione in impianto di betonaggio di tutti i componenti della miscela;
- Trasporto del calcestruzzo.

I consumi e le emissioni associati a queste fasi si possono distinguere in:

- Consumo di combustibile e di energia termica;
- Consumo di energia elettrica;
- Emissione di CO<sub>2</sub> ed altri inquinanti in atmosfera;
- Consumo di acqua.

### **8.2 DURABILITÀ DELLE STRUTTURE**

La durabilità di nuovi materiali può essere verificata e confermata dall'evidenza sperimentale solo dopo molti anni dalla realizzazione di nuove strutture. Nel caso di calcestruzzi HPC, quindi, dove l'innovazione tecnologica introduce in rapida successione nuove formulazioni, capaci di offrire prestazioni sempre migliori, la durabilità potrà essere verificata solo dopo anni dalla loro introduzione in nuove strutture. Ad ogni modo, le caratteristiche fisiche e meccaniche che caratterizzano i calcestruzzi HPC e le performance offerte da strutture realizzate già molti anni fa lasciano trarre conclusioni molto positive riguardo la durabilità dei calcestruzzi.

La bassa porosità che caratterizza i calcestruzzi HPC, infatti, fornisce un'elevata protezione dagli attacchi chimici provenienti da ambiente esterno. Inoltre le elevate resistenze meccaniche rendono questi calcestruzzi particolarmente resistenti a dilavazione o abrasione causate da detriti, sabbia o altro (Aitcin, 2003). La buona durabilità di calcestruzzi HPC dipende comunque anche da una corretta procedura di getto, controllando i fenomeni di ritiro ed evitando quindi la presenza di fessurazioni.

La bassa porosità, però, può rappresentare una criticità per elementi sottoposti a cicli di gelo-disgelo ed al fuoco. La scarsità di pori non saturi, determina elevate sovrappressioni interne indotte dall'acqua quando gela o evapora, capaci di causare fessure interne e quindi rotture. Questo fenomeno può essere ovviato inglobando aria nel getto (Hammer e Sellevold, 1990; Aitcin et al., 1998), in quantità però tali da non determinare un decadimento delle proprietà meccaniche.

La durabilità del calcestruzzo è associata alla permeabilità degli strati superficiali, quelli che dovrebbero impedire l'ingresso delle sostanze aggressive:

- anidride carbonica;
- cloruri;
- solfati;
- acqua;
- ossigeno;
- alcali, acidi, ecc.

La durabilità dipende quindi da:

- selezione dei materiali;
- composizione del calcestruzzo;
- accuratezza nella posa in opera;
- compattazione, finitura e maturazione.

Poiché la vibrazione è un processo discontinuo, il calcestruzzo ordinario tende a non raggiungere ovunque nella struttura lo stesso grado di compattazione. A differenti permeabilità corrispondono ingressi selettivi di soluzioni aggressive, sicché vibrazioni sbagliate moltiplicano i problemi di permeabilità, dando luogo a segregazione, nidi di ghiaia e bleeding, che riducono la durabilità del calcestruzzo.

L'SCC risolve il problema della cattiva compattazione negli spazi tra armature e casseforme risultando tendenzialmente più omogeneo, più uniforme e meno permeabile del calcestruzzo ordinario: esso tende quindi ad avere caratteristiche di durabilità superiori a quelle dei calcestruzzi ordinari di pari resistenza. Un'attenta selezione degli aggregati costituisce, tuttavia, una condizione imprescindibile per l'ottenimento di questi migliori risultati.

### **8.3 FUNZIONALITÀ DELLE STRUTTURE**

Qualunque sia la prestazione richiesta ai calcestruzzi HPC, il loro utilizzo consente di avere a disposizione un materiale dotato di elevate resistenze meccaniche. La progettazione, quindi, di strutture con calcestruzzi HPC può essere condotta ottimizzando le geometrie degli elementi strutturali, in relazione alle proprietà meccaniche a disposizione. Una corretta progettazione, sotto questo punto di vista, rispetto al caso in cui si utilizzino calcestruzzi ordinari, consente quindi di ridurre l'ingombro degli elementi strutturali, a vantaggio degli spazi funzionali delle strutture. Questo si traduce in un vantaggio sulla fruibilità della struttura, che in talune situazioni può essere significativo, traducendosi in una altrettanto significativa convenienza economica.

Nelle caratteristiche di funzionalità spesso possono includersi prestazioni non strutturali, che possono essere richieste a taluni elementi strutturali. Per garantire tali performance vengono sviluppati numerosi calcestruzzi speciali.

Tra questi possono annoverarsi i calcestruzzi fotocatalitici, caratterizzati dalla presenza di specifiche sostanze, dette fotocatalizzatori; queste, sfruttando l'energia luminosa, sono in grado di produrre sostanze fortemente ossidanti in grado di decomporre inquinanti presenti nell'ambiente evitando l'accumulo sulle superfici. Tali proprietà garantiscono quindi superfici a vista in grado di mantenersi pulite nel tempo.

Tra i calcestruzzi speciali, possono poi includersi i calcestruzzi colorati. I pigmenti infatti rappresentano una tipologia di additivi sempre più frequentemente utilizzata per ottenere risultati particolari dal punto di vista estetico più che prestazionale. I pigmenti possono tuttavia influenzare le proprietà reologiche degli impasti ed essi non vanno aggiunti a mix già calibrati senza prima aver svolto specifiche prove. Per l'uso dei pigmenti valgono le stesse attenzioni dei calcestruzzi ordinari ed i pigmenti conformi alla UNI EN 12878 (2001) possono essere usati con successo anche negli HPC. In generale, l'alta fluidità consente una dispersione più efficace dei pigmenti e quindi una maggiore

uniformità di colore (per impasto e tra più impasti) rispetto al caso dei calcestruzzi ordinari: occorre tuttavia tener presente che, per via del più alto contenuto di pasta, possono essere necessari maggiori dosaggi di pigmenti per ottenere la desiderata colorazione.

Un'ulteriore tipologia di calcestruzzi speciali, recentemente sviluppata è quella dei calcestruzzi trasparenti. In questo caso, l'aggiunta nel cemento di fibre di vetro o polimeriche, trasparenti alla luce, rende i manufatti parzialmente trasparenti su scala macroscopica. Le fibre, infatti, che possono avere una orientazione preferenziale o essere disposte in maniera random, convogliano parte della luce che impatta su una superficie, sulla superficie opposta, garantendo quindi una parziale trasparenza a pannelli e manufatti in calcestruzzo.

#### **8.4 SICUREZZA DEGLI OCCUPANTI**

Uno dei requisiti essenziali nella definizione del concetto di sostenibilità delle costruzioni è legato alla sicurezza degli occupanti durante la vita utile delle strutture. Tale performance, che afferisce alla sostenibilità sociale delle costruzioni, si realizza attraverso la sicurezza strutturale.

I principi moderni della progettazione strutturale impongono livelli di sicurezza elevati nei confronti di diverse azioni ed eventi che possono verificarsi sulla struttura durante la vita utile della stessa. Progettare strutture caratterizzate da un'elevata robustezza e da una ridondanza degli elementi, consente però di incrementare ulteriormente il livello di sicurezza, cautelandosi nei confronti di eventi estremi non prevedibili, perseguendo in questo modo un'elevata sicurezza per gli occupanti e quindi la sostenibilità sociale delle strutture.

L'utilizzo di calcestruzzi HPC, caratterizzati da elevate resistenze meccaniche, è in grado di fornire alle strutture proprio queste caratteristiche, contribuendo a riserve di resistenze e performance meccaniche delle strutture, in grado di contribuire nel caso di azioni ed eventi estremi.

#### **8.5 RIUSO E RICICLO**

Alcuni dei tipici componenti degli HPC sono di fatto materiali di scarto di altri processi produttivi. Ad esempio, i fumi di silice condensati sono una polvere di scarto ottenuta nel processo di produzione del silicio e delle leghe ferro silicio nei forni di riduzione della quarzite.

Essa si presenta come una polvere finissima in forma di microsfele di dimensioni variabili tra 0,1 e 0,5  $\mu\text{m}$ , che al microscopio si presentano come ammassi globulari sferici di dimensioni da 1 a 3  $\mu\text{m}$  e con una struttura amorfa.

La caratteristica principale di questa polvere è che essa è dotata di un'attività pozzolanica molto alta, che ne consente l'impiego in impasti di calcestruzzo non solo in addizione al cemento, ma anche in sostituzione di una aliquota di esso.

Impiegando i fumi di silice in sostituzione del cemento si possono ottenere diversi vantaggi tecnologici per la miscela di calcestruzzo. Infatti si registrano notevoli incrementi di resistenze meccaniche, ma anche forti riduzioni della permeabilità, cui sono associate elevate resistenze al gelo – disgelo, agli attacchi di agenti aggressivi e alla reazione alcali-silice. Tali vantaggi si ottengono grazie alla spiccata attività pozzolanica della polvere, e grazie alla sua finezza superiore di circa 50 volte rispetto a quella del cemento che permette di riempire i vuoti tra le particelle di cemento, ottimizzando la compattezza della matrice finale.

L'impiego di fumi di silice permette di ridurre il consumo di cemento, il che consente di ridurre la quantità di  $\text{CO}_2$  emessa per la sua produzione, e allo stesso tempo permette di impiegare un sottoprodotto di scarto altrimenti destinato alla discarica.

L'uso poi degli aggregati di riciclo è ammesso dalle NTC (MIN.LL.PP, DM 14 gennaio 2008) entro i limiti prescritti. Gli aggregati di riciclo maggiormente impiegati sono costituiti da frammenti di calcestruzzo recuperato da altre opere dismesse, oppure dal calcestruzzo di scarto che viene raccolto negli impianti. Per poter impiegare questo tipo di aggregati è necessario eliminare le impurità dal

precedente utilizzo, prevalentemente costituite da pezzi di armatura in acciaio e di materiale isolante.

Possono essere impiegati come aggregati di riciclo anche vetro, mattoni, laterizi, ma questi offrono minori garanzie rispetto ai precedenti, soprattutto in termini di durabilità e resistenza meccanica.

Gli aggregati di riciclo possono essere aggiunti in sostituzione degli aggregati naturali in quantità variabili, a seconda delle prestazioni prescritte per il prodotto finale; in genere la quota massima non supera il 20-30 %, ma la ricerca sta approfondendo l'indagine in questo settore per far sì che si possa arrivare a dosaggi più elevati e che i calcestruzzi così ottenuti siano comunque in grado di garantire le più alte prestazioni.

## 8.6 COSTI ECONOMICI

I calcestruzzi HPC presentano costi talora significativamente più elevati dei calcestruzzi ordinari. Ciò può rappresentare un ostacolo al loro utilizzo specie se le performance che offrono non vengono ottimizzate e sfruttate in maniera opportuna. La sostenibilità di un intervento strutturale realizzato con calcestruzzi HPC, coerentemente con l'approccio al ciclo di vita che caratterizza le valutazioni di sostenibilità, deve includere i minori costi sostenuti in fase di gestione, manutenzione e dismissione delle strutture, legati alle prestazioni offerte dai calcestruzzi stessi. Tali vantaggi economici vanno valutati caso per caso, ma possono essere legati, ad esempio, ai ridotti volumi degli elementi strutturali, dovuti alle più elevate performance meccaniche dei calcestruzzi o ai minori interventi di manutenzione, dovuti alle elevate caratteristiche di durabilità offerte. Pertanto i costi più elevati dei calcestruzzi HPC rispetto ai calcestruzzi ordinari non pregiudicano la sostenibilità economica degli stessi.

## 8.7 I CALCESTRUZZI HPC NELLE PROCEDURE DI VALUTAZIONE DEL PROTOCOLLO ITACA

Il calcestruzzo ad alte prestazioni, come gli altri materiali innovativi, può essere sottoposto a valutazione secondo i criteri del protocollo Itaca, che rappresenta un sistema di certificazione dei requisiti di sostenibilità ambientale degli edifici, identificando anche processi e responsabilità.

Nel considerare i criteri secondo cui si valuta l'impatto ambientale del materiale da costruzione e quindi di un edificio, le proprietà dei calcestruzzi HPC possono risultare un vantaggio o meno rispetto ai seguenti criteri individuati dal protocollo ITACA.

- *Criterio C 1 - Emissioni di CO<sub>2</sub> equivalente.*

Le emissioni di CO<sub>2</sub> per la produzione di un calcestruzzo HPC possono risultare più o meno elevate rispetto a quelle per un calcestruzzo ordinario.

Bisogna considerare che nei calcestruzzi HPC è previsto un impiego massiccio di rinforzo strutturale, l'impiego quasi esclusivo di aggregati naturali, l'uso di additivi chimici, tutti fattori che hanno un impatto negativo sulle emissioni di CO<sub>2</sub>.

Per contro, però, le miscele in calcestruzzo ad alte prestazioni sono più facilmente lavorabili, dunque rendono più agevole la fase di messa in opera accorciandone i tempi; inoltre i calcestruzzi HPC sono realizzati con minore contenuto di acqua, e risultano di elevata durabilità. Dunque per questi altri aspetti le emissioni di CO<sub>2</sub> nel caso di impiego di HPC possono essere ritenute di entità inferiore.

- *Criterio E 1 - Sicurezza in fase operativa.*

Come già ricordato, le miscele in calcestruzzo ad alte prestazioni sono più facilmente lavorabili e ciò rende la fase operativa di messa in opera più agevole e rapida, riducendo la probabilità di incidenti sul lavoro.

-  *Criterio E 6 - Mantenimento delle prestazioni in fase operativa.*

La scelta progettuale di realizzare una struttura in calcestruzzo HPC ha tra gli obiettivi primari la garanzia di elevata durabilità dell'opera e il mantenimento delle sue proprietà nel tempo. La compattezza di un calcestruzzo HPC, le alte resistenze meccaniche che esso garantisce, la qualità dei singoli componenti selezionati ad hoc per la miscela sono caratteristiche che garantiscono il mantenimento delle prestazioni per tempi molto prolungati. Inoltre, sul lungo termine le opere realizzate in HPC necessitano di interventi di ripristino di minore entità; pertanto, in questo senso l'uso di HPC può costituire un significativo vantaggio nei confronti della sostenibilità ambientale.

## RIFERIMENTI

ACI 212-3 R-10, (2010). Report on chemical admixtures for concrete. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.

ACI 237 R-07, (2007). Self-Consolidating Concrete 237R-07. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 34 pp.

ACI 347 R-03, (2004). Guide to Formwork for Concrete. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.

ACI 363 R-92, (1993). State-of-the-art report on high-strength concrete. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 55 pp.

ACI 441 R-96, (1996). High Strength Concrete Columns: State of the Art., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 13 pp.

Aitcin, P.C., Pigeon, M., Pleau, R., Gagnè, R., (1998). Freezing and thawing durability of high performance concrete. Proceedings of the International Symposium on High-Performance Concrete and Reactive Powder Concretes, Sherbrooke 98, vol. 4, pp. 383-91.

Aitcin, P.C., (2003). The durability characteristics of high performance concrete: a review. Cement & Concrete Composites, 25, pp. 409-20.

Aldea, C.M., Song, W.J., Popovics, J.S., (2000). Extent of Healing of Cracked Normal Strength Concrete. ASCE Journal of Materials in Civil Engineering, 2, pp. 92-96.

Amziane, S., Perrot, A., Ovarlez G., Roussel, N., (2010). SCC Formwork Pressure: Influence of Steel Rebars. 6th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete and 4th North American Conference on the Design and Use of SCC, SCC Montreal, September 26-29.

Asprone, D., Cadoni, E. and Prota, A., "Experimental analysis on the tensile dynamic behavior of existing concrete under high strain-rates" ACI Structural Journal vol.106, issue 1, January-February 2009, pp.106-113.

Bache, H.H., (1981). Densified Cement/Ultra-Fine Particle Based Materials. 2nd International Conference on Superplasticizers in Concrete, Ottawa, Canada, June 10-12.

Bamonte P.F., Gambarova P.G. and Meda a. (2008): "Today's Concretes Exposed to Fire – Test Results and Sectional Analysis", *fib* -Journal "Structural Concrete", No.1 - January-March 2008, 19-29.

Bamonte P.F. and Gambarova P.G. (2010): "Thermal and Mechanical Properties at High Temperature of a Very High-Strength Durable Concrete", ASCE-Journal of Materials in Civil Engineering, Vol.22, No.6, June 2010, pp. 545-555.

Bamonte P. and Gambarova P.G. (2012): "A Study on the Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete at High Temperature and after Cooling", RILEM - Materials and Structures, DOI 10.1617/s11527-012-9839-9.

Barnett, S.J., Lataste, J.F., Parry, T., Millard, S.G., Soutsos, M.N, (2010). Assessment of fibre orientation in Ultra High Performance fiber reinforced concrete and its effect on flexural strength. *Materials and Structures*, 43, pp. 1009-1023.

Bayasi, M.Z. and Soroushian, P., (1992). Effect of Steel fiber reinforcement on fresh mix properties of concrete. *ACI Materials Journal*, 89(4), pp. 369-374.

Bergner, H., (1997). Rissbreitenbeschränkung zwangbeanspruchter Bauteile aus hochfestem Normalbeton. *DAfStb*, Heft 482. ISBN 978-3-410-65682-1.

Billberg, P., (2003). Form Pressure Generated by Self-Compacting Concrete. 3rd International Symposium on Self-Compacting Concrete, 17-20 August, Reykjavik, Iceland.

Boulekbache, B., Hamrat, M., Chemrouk, M, Amziane, S., (2010). Flowability of fibre-reinforced concrete and its effect on the mechanical properties of the material. *Construction and Building Materials*, 24, pp. 1664-1671.

Boulekbache, B., Hamrat, M., Chemrouk. M., Amziane, S., (2012). Influence of yield stress and compressive strength on direct shear behaviour of steel fibre-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 27, pp. 6-14.

Brameshuber, W. and Uebachs, S., (2003). Investigation on the formwork pressure using self-compacting concrete. 3rd International Symposium on Self-Compacting Concrete, 17-20 August, Reykjavik, Iceland.

Cadoni E, Meda A, Plizzari G. Tensile behaviour of FRC under high strain-rate. *Materials and Structures* 2009a;42:1283-1294.

Cadoni E., Caverzan A., di Prisco M., Dynamic Characterization of Advanced Cementitious Composites in Design and Construction of Safe Tunnel, PROTECT 2009b, Hayama (Japan), on CD.

Caverzan, A. and Ferrara, L., (2012). “Collapsible” concrete as a blast and impact absorber: from material concept to static characterization. *Proceedings fib Symposium*, 10-14 June, Stockholm.

Caverzan, A., Cadoni, E., di Prisco, M. (2012). Tensile behaviour of high performance fibre-reinforced cementitious composites at high strain rates, *International journal of impact engineering*, 45, 28 -38.

Caverzan A., Colombo M., di Prisco M., High performance steel fibre reinforced concrete: Residual behaviour at high temperature, PROTECT 2009, Hayama (Japan), on CD.

CEB, Comité Euro-International du Béton. “Concrete Structures Under Impact and Impulsive Loading,” CEB Bulletin No. 187, Lausanne, Switzerland, 1988, 184 pp.

Centre Expérimental du Bâtiment et des Travaux Publics (CEBTP), (1999). The Validated Technique of Self-Compacting Concrete. Report No. B242-9-054, 4 June, (in French).

CNR-DT 204/2006, “Istruzioni per la progettazione, l’Esecuzione ed il Controllo di Strutture di Calcestruzzo Fibro-rinforzato”. CNR 2006.



Colleparidi, M., (1976). Assessment of the “rheoplasticity” of concretes. *Cement and Concrete Research*, 6(3), pp. 401-407.

Colombo, M., di Prisco, M., Felicetti, R., 2010. Mechanical properties of Steel Fibre Reinforced Concrete exposed at high temperatures, *Materials and Structures*, 43(4), 475-491.

Cosenza E., De Stefano M., Pecce M.: "Analisi critica di alcune prestazioni strutturali dei calcestruzzi ad alta resistenza", *Giornate AICAP 89*, Napoli, 4-6 maggio 1989.

Cosenza E., Greco C., Manfredi G., Marino R., Pecce M.: "Monotonic and Cyclic Behaviour of High Strength Reinforced Beams", *X European Conference of Earthquake Engineering*, Vienna, 28 August - 2 September, 1994.

C.S.L.P. (2008) *Linee Guida per la messa in opera del calcestruzzo strutturale e per la valutazione delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo indurito mediante prove non distruttive*, Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici Servizio Tecnico Centrale.

Danielsen, U., (1997). Marine concrete structures exposed to hydrocarbon fires. Report, SINTEF – The Norwegian Fire Research Institute, pp. 56-76.

Dhir, R.K., Sangha C.M., Munday J.G., (1973). Strength and Deformation Properties of Autogeneously Healed Mortars. *ACI Journal*, 70(3), pp. 231-236.

di Prisco, M., Plizzari, G., Vandewalle, L., 2009. Fibre reinforced concrete: new design perspectives, *Materials and Structures*, 42(9), 1261-1281.

di Prisco M., Dozio D., Galli A., Lapolla, S., (2010), Assessment and control of a SFRC retaining structure: Mechanical issues *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 14 (10), 1259-1296.

Douglas R., Gregori A., Sun Z. and Shah S.P., (2011). Rheological Method to Evaluate Structural Build-up and Thixotropy in Cement Pastes. *ACI Materials Journal*, publication in press.

Edvardsen, C., (1999). Water permeability and autogenous healing of crack in concrete, *ACI Materials Journal*, 96(4), pp. 448-454.

Faifer, M., Ottoboni, R., Toscani, S., Ferrara, L., (2011). Non-destructive testing of steel fiber reinforced concrete using a magnetic approach. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 60(5), pp. 1709-1717.

Felicetti, R., and Gambarova, P.G. (1998): “Effects of High Temperature on the Residual Compressive Strength of High-Strength Siliceous Concretes”, *ACI Materials J.*, V.95, No.4, 395-406.

Felicetti R., Gambarova P.G. and Bamonte P. (2012): “Thermal and Mechanical Properties of Light-Weight Concrete Exposed to High Temperature”, *Fire and Materials*, DOI: 10.1002/fam.2125.

Ferrara, L. and Meda, A., (2006). Relationships between fibre distribution, workability and the mechanical properties of SFRC applied to precast roof elements. *Materials and Structures*, 39, pp. 411-420.

Ferrara, L., Park, Y.D., Shah, S.P., (2007). A method for mix-design of fiber reinforced self compacting concrete. *Cement and Concrete Research*, 37, pp. 957-971.

Ferrara, L., Park, Y.D., Shah, S.P., (2008). Correlation among fresh state behaviour, fiber dispersion and toughness properties of SFRCs. *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, 20, pp. 493-501.

Ferrara, L., di Prisco, M., Lamperti, M.G.L., (2010). Identification of the stress-crack opening behavior of HPFRCC: the role of flow-induced fiber orientation. *Proceedings FraMCoS 7, 7th International Conference of Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures*, Jiejiu, South Korea, 23-28 May, pp. 1541-1550.

Ferrara, L., Ozyurt, N., Di Prisco, M., (2011). High mechanical performance of fiber reinforced cementitious composites: the role of “casting-flow” induced fiber orientation. *Materials and Structures*, 44, pp. 109-128.

Ferrara, L., Faifer, M., Toscani, S., (2012). A magnetic method for non destructive monitoring of fiber dispersion and orientation in Steel Fiber Reinforced Cementitious Composites – part 1: method calibration. *Materials and Structures*, 45(4), pp. 575-589.

Ferrara, L., Faifer, M., Muhaxheri, M., Toscani, S., (2012). A magnetic method for non destructive monitoring of fiber dispersion and orientation in Steel Fiber Reinforced Cementitious Composites – part 2: correlation to tensile fracture toughness. *Materials and Structures*, 45(4), pp. 591-598.

Ferrara, L., Bamonte, P., Krelani, V., Pessina, I., Gastaldo Brac E., (2012). An experimental methodology to assess the self-healing capacity of cementitious composites with “aero-crystallizing” additives. Accepted for presentation to ICCRRR2012. Cape Town, South Africa, 3-6 September.

Ferron, R.P., Gregori A., Sun Z., Shah, S.P., (2008). Rheological method to evaluate structural build-up and thixotropy in cement pastes. *ACI Materials Journal*, 104(3), pp. 242-250.

*fib* Model Code, Design Code. Comité Euro-International du Béton, Thomas Telford, Lausanne, Switzerland, 2010, pp. 248-253.

Galeota D., Giammatteo M.M., Gregori A., Marino R., (2008). Pressioni orizzontali degli SCC sulle casseforme. Progetto ULISSE 2004-2006, IV Congresso ATECAP, 29-31 Maggio, Rimini.

Gregori A., Douglas R., Sun Z., Shah S.P., (2005). The effect of SCC ingredients and shear history on the thixotropic rate of rebuilding. *Second North American Conference on SCC and Fourth RILEM International Conference*, October, Chicago – USA.

Grunewald, S., (2004). Performance based design of self compacting steel fiber reinforced concrete. PhD Thesis, Delft University of Technology.

Hammer, T.A. and Sellevold, E.J., (1990). Frost resistance of high strength concrete. *High-Strength Concrete: Second International Symposium*. ACI SP-121, p.p. 457-488.

Hearn, N. and Morley, C.T., (1997). Self-Sealing Property of Concrete – Experimental Evidence. *Materials and Structures*, 30(8), pp. 404-411.

Hearn, N., (1998). Self-Sealing, Autogenous Healing and Continued Hydration: What is the Difference?. *Materials and Structures*, 31(9), pp. 563-567.

ISO 22965-1:2007 Concrete - Part 1: Methods of specifying and guidance for the specifier, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

ISO 22965-2:2007 Concrete - Part 2: Specification of constituent materials, production of concrete and compliance of concrete, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

Jansson, R. and Boström, L., (2008): "The Influence of Pressure in the Pore System on Fire Spalling of Concrete", Proc. 5th Int. Conf. "Structures in Fire" – SIF 2008, ed. by K.H. Tan, V.K.R. Kodur and T.H. Tan, pub. by Nanyang Technological University, Singapore, pp.418-429.

Kodur, V.R., (1999). Fibre-reinforced concrete for enhancing the structural fire resistance of columns. *Fibre- Structural Applications of Fibre-Reinforced Concrete*, ACI SP-182, pp.215-234.

Kodur, V.K.R., (2003). Fire resistance design guidelines for high strength concrete columns NRCC-46116. SCE/SFPE Specialty Conference of Designing Structures for Fire and JFPE, Baltimore, MD., October, pp. 1-11.

Kodur V.K.R., Cheng F.P., Wang T.C., Sultan, M.A., (2003). Effect of strength and fiber reinforcement on the fire resistance of high strength concrete columns. *ASCE Journal of Structural Engineering*, 129(2), pp. 253-259.

Kwon, S.H., Phung, Q.T., Park, H.Y., Kim, J.H., Shah, S.P., (2010). Experimental study on effect of wall friction on formwork pressure of self-consolidating concrete. 6th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete and 4th North American Conference on the Design and Use of SCC, SCC 2010, September 26-29, Montreal, Canada.

Lataste, J.F., Behloul, M., Breysse, D., (2008). Characterisation of fibres distribution in a steel fibre reinforced concrete with electrical resistivity measurements. *NDT & E International*, 41(8), pp. 638-647.

Lauer, K.R. and Slate, F.O., (1956). Autogenous Healing of Cement Past. *ACI Journal* 52(6), pp. 1083-1097.

Martinie, L. and Roussel, N., (2011). Simple tools for fiber orientation prediction in industrial practice. *Cement and Concrete research*, 41, pp. 993-1000.

Meshgin, P. and Xi, Y., (2012). Effect of phase-change materials on properties of concrete. *ACI Materials Journal*, 109(1), pp. 71-80.

Mindess, S., Banthia, N., Yan, C., (1987). Fracture toughness of concrete under impact loading. *Cement and Concrete Research*, 17, pp. 231–241

MIN.LL.PP, DM 14 gennaio, (2008a), "Norme Tecniche per le Costruzioni", *Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana*, 29.

Neville, A., (2002). Autogenous Healing – A concrete miracle?. *Concrete International*, 24(11), pp. 76-82.

- Ngab, A.S., Nilson, A.H., Slate, F.O., (1981). Shrinkage and creep of high strength concrete. *ACI Journal* 78(4), pp. 225-261.
- O'Neil, E.F., Shen, W., Jennings, H.M., Thomas, J.J., Cummins, T., (2012). Development of frangible concrete to reduce blast-related casualties. *ACI Materials Journal*, 109(1), pp. 31-40.
- Ozyurt, N., Mason, T.O., Shah, S.P., (2006). Non destructive monitoring of fiber orientation using AC-IS: an industrial scale application. *Cement and Concrete Research*, 36, pp. 1653-1660.
- Ozyurt, N., Mason, T.O., Shah, S.P., (2007). Correlation of fiber dispersion, rheology and mechanical performance of FRCs. *Cement and Concrete Composites*, 29, pp.70-79.
- Pecce M., Fabbrocino G.: "Plastic Rotation Capacity of Beams in Normal and High Performance Concrete"; *ACI Structural Journal*, Vol.96, n. 2, March-April, 1999.
- PCI, Precast, Prestressed Concrete Institute, (2004). *Interim Guidelines for the Use of Self-Consolidating Concrete in Precast/Prestressed Concrete Institute Member Plants*, TR-6-03 ISBN 0937040681.
- Phan, L.T. and Carino, N. J., (1998). Review of mechanical properties of HSC at elevated temperature. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 10(1), pp. 58-63.
- Powers, T.C., (1958). Structure and physical properties of hardened Portland cement paste. *Journal of the American Ceramic Society*, 41(1), pp. 1-6.
- Reinhardt, H.W. and Jooss, M., (2003). Permeability and self-healing of cracked concrete as a function of temperature and crack width. *Cement & Concrete Research*, 33, pp. 981-985.
- Richard, P. and Cheyrezy, M., (1995). Composition of reactive powder concretes. *Cement and Concrete Research*, 25(7), pp. 1501-1511.
- Schuler, H. and Hansson, H., (2006). Fracture behaviour of high performance concrete (HPC) investigated with a hopkinson-bar. *Journal de physique*, 134, pp. 1145–1151
- Shah, S.P. and Rangan, V.B., (1971). Fiber reinforced concrete properties. *Journal of the American Concrete Institute*, 68, pp. 126-135.
- Skalny, J., Phillips, J.C., Cahn, D.S., (1973). Low water to cement ratio concretes. *Cement and Concrete Research*, 3(1), pp. 29-40.
- Skarendahl, A., (1999). *Self-Compacting Concrete for Improved Productivity, Working Environment, and Performance*. IREX-Meeting, Paris, 23 February.
- Stahli, P., Custer, R., Van Mier, J.G.M., (2008). On flow properties, fibre distribution, fibre orientation and flexural behaviour of FRC. *Materials and Structures*, 41, pp. 189-196.
- The European Guidelines for Self-Compacting Concrete (May 2005) - Specification, Production and Use. European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems.

Turner, L., (1937). The autogenous healing of cement and concrete: its relation to vibrated concrete and cracked concrete. International Association for Testing Materials. London Congress, April 19-24: 344.

UNI 8520-1:2005 Aggregati per calcestruzzo - Istruzioni complementari per l'applicazione della EN 12620 - Parte 1: Designazione e criteri di conformità, Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano, Italia.

UNI 8520-2:2005 Aggregati per calcestruzzo - Istruzioni complementari per l'applicazione della EN 12620 - Requisiti, Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano, Italia.

UNI 8520-22:2002 Aggregati per confezioni di calcestruzzi - Determinazione della potenziale reattività degli aggregati in presenza di alcali, Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano, Italia.

UNI 11039-1:2003 Calcestruzzo rinforzato con fibre di acciaio - Definizioni, classificazione e designazione, Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano, Italia.

UNI 11104:2004 Calcestruzzo - Specificazione, prestazione, produzione e conformità - Istruzioni complementari per l'applicazione della EN 206-1, Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano, Italia.

UNI 11188:2007 Elementi strutturali di calcestruzzo rinforzato con fibre d'acciaio - Progettazione, esecuzione e controllo, Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano, Italia.

UNI EN 197-1:2011 Cemento - Parte 1: Composizione, specificazioni e criteri di conformità per cementi comuni, Ente Nazionale di Unificazione, Milano, Italia.

UNI EN 206-1:2006 Calcestruzzo - Parte 1: Specificazione, prestazione, produzione e conformità, Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano, Italia.

UNI EN 206-9:2010 Calcestruzzo - Parte 9: Regole complementari per il calcestruzzo autocompattante (SCC), Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano, Italia.

UNI EN 450-1:2007 Ceneri volanti per calcestruzzo - Parte 1: Definizione, specificazioni e criteri di conformità, Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano, Italia.

UNI EN 450-2:2005 Ceneri volanti per calcestruzzo - Parte 2: Valutazione della conformità, Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano, Italia.

UNI EN 934-2:2009 Additivi per calcestruzzo, malta e malta per iniezione - Parte 2: Additivi per calcestruzzo - Definizioni, requisiti, conformità, marcatura ed etichettatura, Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano, Italia.

UNI EN 1992-1-1:2005 Eurocodice 2 - Progettazione delle strutture di calcestruzzo - Parte 1-1: Regole generali e regole per gli edifici, Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano, Italia.

UNI EN 12350-1:2009 Prova sul calcestruzzo fresco - Parte 1: Campionamento, Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano, Italia.

UNI EN 12350-11:2010 Prova sul calcestruzzo fresco - Parte 11: Calcestruzzo autocompattante - Prova di segregazione mediante setaccio, Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano, Italia.

UNI EN 12390-1-11:2002-2010 Prova sul calcestruzzo indurito, Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano, Italia.

UNI EN 12620:2008 Aggregati per calcestruzzo, Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano, Italia.

UNI EN 12878:2001 Pigmenti per la colorazione di materiali da costruzione a base di cemento e/o calce - Specifiche e metodi di prova, Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano, Italia.

UNI EN 13055-1:2003 Aggregati leggeri - Aggregati leggeri per calcestruzzo, malta e malta per iniezione, Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano, Italia.

UNI EN 13263-1:2009 Fumi di silice per calcestruzzo - Parte 1: Definizioni, requisiti e criteri di conformità, Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano, Italia.

UNI EN 13263-2:2009 Fumi di silice per calcestruzzo - Parte 2: Valutazione della conformità, Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano, Italia.

UNI EN 14651:2007 Metodo di prova per calcestruzzo con fibre metalliche - Misurazione della resistenza a trazione per flessione [limite di proporzionalità (LOP), resistenza residua], Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano, Italia.

UNI EN 14889:2006 Fibre per calcestruzzo - Parte 1: Fibre di acciaio - Definizioni, specificazioni e conformità, Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano, Italia.

UNI EN 15167-1:2006 Loppa d altoforno granulata macinata per calcestruzzo, malta e malta per iniezione - Parte 1: Definizioni, specifiche e criteri di conformità, Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano, Italia.

UNI EN 15167-2:2006 Loppa d altoforno granulata macinata per calcestruzzo, malta e malta per iniezione - Parte 2: Valutazione della conformità, Ente Nazionale Italiano di Unificazione, Milano, Italia.

Van Damme, S., Franchois, A., De Zutter, D., Taerwe, L., (2004). Nondestructive determination of the steel fiber content in concrete slabs with an open-ended coaxial probe. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42, pp. 2511-2521.

Vandewalle, L., Nemegeer, D., Balazs, L., Barr, B., Barros, J., Bartos, P., Banthia, N., Criswell, M., Denarie, E., Di Prisco, M., (2003). RILEM TC 162-TDF: Test and design methods for steel fibre reinforced concrete -  $\sigma$ - $\varepsilon$  design method – Final Recommendations. *Materials and Structures*. Vol. 36, nr. 262, pp. 560-567.

Yang, Y., Lepech, M.D., Yang, E.H., Li, V., (2009). Autogenous healing of ECCs under wet-dry cycles. *Cement & Concrete Research*, 39(5), pp. 382-390.

Il presente Documento Tecnico è stato predisposto da un Gruppo di studio così composto:

ANGOTTI Prof. Franco	- Università di Firenze
ASPRONE Ing. Domenico	- Università di Napoli "Federico II"
BENCARDINO Ing. Francesco	- Università della Calabria
BERTAGNOLI Ing. Gabriele	- Politecnico di Torino
CINTI Ing. Uriel	- Holcim
COSENZA Prof. Edoardo	- Università di Napoli "Federico II"
COZZOLINO Ing. Oriana	- Unicalcestruzzi S.p.A.
DI PRISCO Prof. Marco	- Politecnico di Milano
FRANCINI Ing. Marco	- Unical S.p.A.
GALEOTA Prof. Dante	- Università dell'Aquila
GREGORI Ing. Amedeo	- Università dell'Aquila
LIGNOLA Ing. Gian Piero	- Università di Napoli "Federico II"
FERRARA Ing. Liberato	- Politecnico di Milano
MANCINI Prof. Giuseppe	- Politecnico di Torino
MANFREDI Prof. Gaetano	- Università di Napoli "Federico II"
MARCHESE ing. Giuseppe	- Italcementi Group
MARINO ing. Roberto	- RM Concrete Consulting
MEDA Prof. Alberto	- Università di Roma "Tor Vergata"
MORICONI Prof. Giacomo	- Università Politecnica delle Marche
PLIZZARI Prof. Giovanni	- Università di Brescia
PROTA Prof. Andrea	- Università di Napoli "Federico II"
RIVA Prof. Paolo	- Università di Bergamo
SAVOIA Prof. Marco	- Università di Bologna
SPADEA Prof. Giuseppe	- Università della Calabria

Coordinatori:

Coordinatore generale:

MANFREDI Prof. Gaetano.

Segreteria:

PROTA Prof. Andrea.

Il presente Documento Tecnico è stato approvato in versione preliminare il 5/7/2012 e sottoposto ad inchiesta pubblica dalla “Commissione di studio per la predisposizione e l’analisi di norme tecniche relative alle costruzioni” del Consiglio Nazionale delle Ricerche, così composta:

ANGOTTI Prof. Franco	- Università di Firenze
ASCIONE Prof. Luigi	- Università di Salerno
BARATTA Prof. Alessandro	- Università “Federico II”- Napoli
COSENZA Prof. Edoardo	- Università “Federico II”- Napoli
JAPPELLI prof. Ruggiero	- Università “Tor Vergata” - Roma
MACERI Prof. Franco	- Università “Tor Vergata” - Roma
MANCINI Prof. Giuseppe	- Politecnico di Torino
MAZZOLANI Prof. Federico Massimo	- Università “Federico II”- Napoli
PINTO Prof. Paolo Emilio	- Università “La Sapienza” - Roma
SAVOIA Prof. Marco	- Università di Bologna
SOLARI Prof. Giovanni	- Università di Genova
URBANO Prof. Carlo	- Politecnico di Milano
VINCI Arch. Roberto	- Consiglio Nazionale delle Ricerche
ZANON Prof. Paolo	- Università di Trento