

UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

Facoltà di INGEGNERIA



Corso di Laurea Magistrale in INGEGNERIA EDILE

***Influenza dell'agente espansivo sulle prestazioni  
meccaniche e deformative dei calcestruzzi UHPC***

-

***Influence of the expansive agent on mechanical and  
strain behaviour of UHPC concretes***

**Relatore:**  
Prof.ssa Ing. Corinaldesi Valeria

**Laureando:**  
Calderigi Michele

---

*Anno Accademico 2019/2020*



# INDICE

<b>Sommario .....</b>	<b>1</b>
<b>1. Introduzione.....</b>	<b>2</b>
1.1 Nascita del calcestruzzo .....	2
1.2 Sviluppo degli UHPC.....	3
1.3 Vantaggi e svantaggi degli UHPC .....	4
1.4 Applicazioni degli UHPC .....	5
1.5 Quadro normativo .....	8
<b>2. Proprietà meccaniche e chimico-fisiche degli UHPC .....</b>	<b>10</b>
2.1 Comportamento a compressione.....	10
2.2 Comportamento a trazione.....	12
2.3 Ritiro degli UHPC.....	14
2.4 Durabilità del materiale.....	15
<b>3. Composizione UHPC .....</b>	<b>17</b>
3.1 Cemento .....	17
3.2 Aggregati.....	19
3.3 Additivi .....	21
3.3.1 Superfluidificanti .....	21
3.4 Fumi di silice.....	24
3.5 Fibre .....	25
3.5.1 Fibre in acciaio ottonato.....	27
<b>4. Attività sperimentale.....</b>	<b>29</b>
4.1 Materiali utilizzati .....	29
4.2 Mix Design.....	32
4.3 Fasi operative .....	32
4.4 Provini .....	34
4.5 Prove eseguite .....	34
4.5.1 Prova di spandimento.....	35
4.5.2 Monitoraggio ritiro.....	36
4.5.3 Prove a flessione .....	37

4.5.4 Prove di compressione .....	37
<b>5. Risultati e discussione .....</b>	<b>39</b>
5.1 Risultati slump test.....	39
5.2 Risultati ritiro .....	40
5.3 Risultati prove a flessione.....	43
5.4 Risultati prove di compressione.....	46
<b>6. Conclusioni.....</b>	<b>49</b>
<b>Riferimenti .....</b>	<b>51</b>
<b>Ringraziamenti .....</b>	<b>53</b>

## Sommario

I calcestruzzi ad altissime prestazioni (*Ultra-High Performance Concrete, UHPC*) sono materiali a base cementizia fibro-rinforzata che presentano, rispetto ai calcestruzzi tradizionali, una migliore risposta meccanica a compressione e trazione, accompagnata da una notevole duttilità. L'acronimo nasce intorno agli anni '90 in riferimento a un materiale cementizio ottimizzato con l'impiego di particelle fini e ultrafine, le quali garantiscono alla matrice cementizia una microstruttura a bassa porosità e quindi quasi priva di imperfezioni. Successivamente si è poi inserito nel materiale anche la componente fibro-rinforzata, sia attraverso fibre metalliche che polimeriche, aumentandone così la resistenza. Questo materiale nasce con lo scopo di migliorare il calcestruzzo ordinario sia dal punto di vista meccanico, sia da quello della duttilità e durabilità, riducendo in questo modo i costi della manutenzione ordinaria e gli impatti ambientali tipici del suo predecessore.

Questa tesi, in particolare, è focalizzata sullo studio del comportamento del materiale in termini di ritiro e lavorabilità al variare delle quantità di espansivo e fibre all'interno del mix design. Si è inoltre valutata la resistenza meccanica a trazione e compressione con i diversi impasti e alle diverse stagionature, al fine di monitorare l'effetto dell'espansivo, e quindi del ritiro, sul materiale. I test di laboratorio sono stati eseguiti presso il Dipartimento di Scienze e Ingegneria della Materia dell'Ambiente ed Urbanistica (SIMAU) dell'Università Politecnica delle Marche di Ancona, realizzando un totale di novantasei provini con otto diverse combinazioni di impasto.

# 1. Introduzione

## 1.1 Nascita del calcestruzzo

Il calcestruzzo è un materiale già conosciuto dagli antichi romani. "Calcis structio" era la definizione che veniva utilizzata per le strutture realizzate con un composto di calce, sabbie pozzolaniche, mattoni o pietre macinate e acqua, che si è evoluto nei secoli fino a diventare l'odierno calcestruzzo. L'opera più emblematica di questo materiale è il Pantheon a Roma, che già dal II secolo d.C. ne dimostra le potenzialità e durabilità.

Tra la fine del Diciottesimo e l'inizio del Diciannovesimo secolo, sono stati messi a punto i primi procedimenti per ricreare artificialmente il comportamento dei leganti naturali (calce e pozzolana). Fino al brevetto del 1818 dell'ingegnere francese Louis-Joseph Vicat, che porta alla nascita del cemento, oggi uno dei materiali da costruzione più utilizzati.

Per i primi calcestruzzi armati bisogna aspettare la fine del Diciannovesimo secolo, con i brevetti di Joseph Monier, che prevedevano l'utilizzo di un'armatura metallica per rafforzare diverse strutture, tra cui opere in cemento.

La sua affermazione come materiale da costruzione nel nostro paese risale alla ricostruzione successiva al devastante sisma che colpì Messina ed altre aree nel 1908. La necessità di fornire risposte immediate e di sicura solidità determina, per la prima volta, l'utilizzo su larga scala della tecnica costruttiva del calcestruzzo armato.

Questo particolare materiale è riuscito a conciliare le esigenze funzionali degli edifici moderni con i problemi connessi alla loro progettazione, garantendo diversi vantaggi come facilità di esecuzione, costo ridotto dei componenti e grande versatilità nel suo utilizzo, permettendo forme e geometrie impossibili da realizzare con altri materiali da costruzione. Parallelamente però, il calcestruzzo presenta anche alcuni svantaggi, sia dal punto di vista prestazionale che della sostenibilità ambientale. Il vero difetto tuttavia, sta nella durabilità stessa del materiale. Negli anni 90 in Italia, una serie di studi hanno evidenziato che circa il 70% di queste strutture presenta condizioni di degrado avanzato. Le cause sono svariate, tra cui l'impiego di materiali facilmente degradabili dagli agenti

ambientali, il confezionamento scadente del calcestruzzo, l'insufficiente copriferro e le modalità di posa in opera scadente.

## 1.2 Sviluppo degli UHPC

A partire dagli anni '70, con lo sviluppo di nuovi additivi e di aggiunte, minerali e non, accanto allo studio attento dei processi di stagionatura e del mix-design, si è cercato di sviluppare il calcestruzzo, al fine di far fronte ai suoi problemi di durabilità.

In tale periodo si assiste alla nascita dei cosiddetti calcestruzzi **DSP** (*Densified with Small Particle*) ovvero calcestruzzi in cui viene sperimentato il binomio superfluidificante-fumo di silice. Quest'ultimo è un sottoprodotto dell'industria della produzione di leghe a base di silicio e la sua elevata finezza (nell'ordine di 0,01-1  $\mu\text{m}$ ) consente di riempire i vuoti interstiziali tra i granuli di cemento, addensando la matrice cementizia e migliorandone notevolmente la resistenza agli agenti corrosivi. L'utilizzo del fumo di silice comporta tuttavia un incremento dell'acqua necessaria per il confezionamento del conglomerato. Tale inconveniente viene aggirato grazie all'utilizzo dei superfluidificanti, che permettono un basso rapporto a/c mantenendo inalterata la lavorabilità. Questo binomio dà origine ad una pasta cementizia poco porosa e più resistente degli aggregati stessi, i quali diventano il punto debole del materiale, assieme alla sottile area posta a confine tra aggregato e matrice, detta "zona di transizione".

Nonostante le ottime prestazioni meccaniche e di resistenza alle aggressioni ambientali, anche il calcestruzzo DSP, denota limiti prestazionali nel comportamento deformativo, avendo una natura estremamente fragile, con brusca perdita di resistenza in fase post-picco. In caso di incendio, inoltre, l'impermeabilità della matrice cementizia risulta un limite, in quanto si oppone alla fuoriuscita del vapore acqueo generato dal surriscaldamento dell'acqua in esso contenuta, causando un aumento di pressione interna, con la possibile esplosione delle parti corticali del calcestruzzo (spalling).

Per ovviare a tali limiti, agli inizi degli anni '90, si sono sviluppati gli RPC (reactive Powder Concrete), nati dall'unione dei DSP con fibre in acciaio o polimeriche. Mentre

le prime aumentano la duttilità e riducono i fenomeni di rottura con l'assorbimento degli sforzi, le altre hanno una particolare efficacia in caso di incendio, riducendo sensibilmente il fenomeno dello spalling.

Gli studi effettuati in Francia da Richard e Cheyrezy sugli RPC, riscontrano un materiale avente ultra-prestazioni meccaniche, con resistenza a compressione superiore a 200 MPa e a flessione nell'ordine di 50 MPa, ma soprattutto, caratterizzato da una duttilità fino a 40 kJ/m<sup>2</sup>, molto al di sopra di quella di un calcestruzzo ordinario.

A partire dagli studi francesi si sono poi sviluppati e brevettati diverse tipologia di materiali contraddistinti da sigle come FRC, HPC, UHPC, UHPFRC.

In generale, per poter classificare un calcestruzzo come ad "alte prestazioni", il mix-design deve essere caratterizzato da un basso rapporto acqua/cemento, l'utilizzo di superfluidificante per la lavorabilità, un inerte finissimo affiancato da un aggregato con dimensioni massime ridotte.

### **1.3 Vantaggi e svantaggi degli UHPC**

I calcestruzzi ad altissime prestazioni presentano costi di realizzazione 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. L'utilizzo di questi calcestruzzi comporta dei vantaggi economici se valutati in un ambito più ampio, che comprenda la possibile riduzione dei 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 iniziali più elevati dei calcestruzzi UHPC vengono facilmente controbilanciati dai numerosi vantaggi prestazionali del materiale, quali:

- Resistenza a flessione e a trazione nettamente superiore rispetto ad un calcestruzzo ordinario appartenente alla stessa classe di resistenza (in fase di calcolo il contributo del calcestruzzo nella zona tesa non è più trascurabile né allo stato limite di esercizio né allo stato limite ultimo);



- Comportamento post-fessurativo incrudente che garantisce una notevole tenacità a rottura ed un ottimo comportamento a fatica;
- Riduzione della sezione degli elementi strutturali e quindi alleggerimento complessivo della struttura con risparmi ingenti specialmente in fase di trasporto ed assemblaggio. La competitività economica legata agli spessori inferiori può essere rafforzata anche passando da materiali premiscelati e confezionati in sacchi, e quindi con un costo di trasporto inferiore. Tale approccio, oltre ad aumentare la competitività, può aiutare anche la diffusione e l'impiego più capillare di tale tecnologia;
- Minore impiego di armature metalliche, con conseguente risparmio economico, in particolare per l'eliminazione delle staffe (minori costi nell'acquisto del materiale ma anche processo produttivo semplificato, con ulteriori risparmi di manodopera e di tempi di realizzazione);
- Riduzione dell'impatto ambientale, grazie all'impiego di sottoprodotti industriali per promuovere l'attivazione chimica della matrice cementizia. L'utilizzo di aggiunte minerali, come fumo di silice, ceneri volanti e loppa microfine, rifiuti solidi recuperati da processi industriali, riduce il consumo energetico e le emissioni legate alla produzione di clinker;

## **1.4 Applicazioni degli UHPC**

Nella seconda metà degli anni '90, parallelamente agli studi in merito alle caratteristiche meccaniche del materiale, iniziano a realizzarsi alcune applicazioni pratiche nel settore dell'ingegneria civile, volte a sfruttare a pieno le proprietà di leggerezza, resistenza e durabilità degli UHPC, portando a un differente approccio alla progettazione con i materiali cementizi.

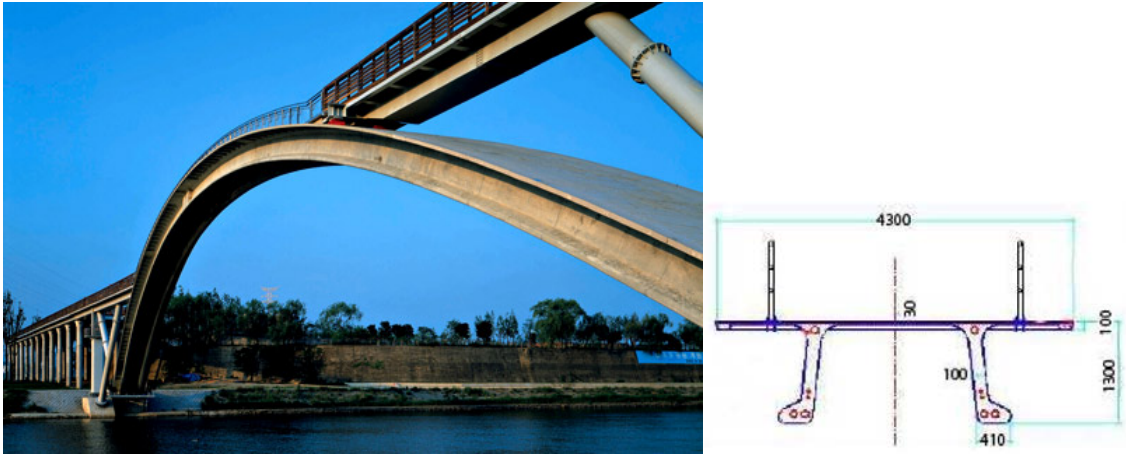
Il primo utilizzo è stato quello per il ponte pedonale di Sherbrooke in Canada, che ha garantito un'elevata durabilità in condizioni di esercizio gravose (sali marini, acqua di condensa, cicli gelo-disgelo, elevati sbalzi termici, presenza di sostanze chimiche pericolose e di rifiuti organici) e rendendo possibile una straordinaria libertà architettonica ed estetica per il progettista.



Figura 1. La "Passerelle" di Sherbrooke

L'opera è una "passerelle" pedonale a campata unica di 60m di luce che attraversa il fiume Magog, formata da una trave reticolare e una soletta, dello spessore di 30mm, in calcestruzzo a polvere reattiva. La trave è composta da elementi prefabbricati in RPC, privi di armature all'interno e assemblati in opera mediante post-tensione. Le parti fibro-rinforzate, invece, vedono l'uso di fibre in acciaio annegate all'interno dell'impasto.

A seguito di questa prima realizzazione, sono iniziati diversi studi ad opera principalmente delle industrie francesi Bouygues e Lafarge, sulle differenti sezioni possibili da utilizzare nella realizzazione di ponti pedonali e ciclabili in grado di sfruttare al meglio le proprietà del calcestruzzo fibro-rinforzato ed approfondirne l'influenza dell'orientamento delle fibre al momento del getto. Tali risultati hanno condotto alla realizzazione della sezione a  $\pi$ , utilizzata per la prima volta nel "Peace Footbridge" costruito a Seoul, Corea del Sud, nel 2002 e progettato dall'architetto francese Rudy Ricciotti.



*Figura 2. Ponte di Seonyudo, Seol, Corea Del Sud.*

Quest'opera presenta proporzioni estremamente slanciate impossibili da realizzare con le resistenze di un calcestruzzo tradizionale, oltre all'elevata resistenza all'abrasione, aggressione dell'inquinamento e agli agenti atmosferici.

Tali realizzazioni hanno aperto la strada a nuovi progetti con tipologie strutturali sempre più innovative e artistiche.

Oltre a questi applicazioni però gli UHPC possono essere utilizzati in diversi modi, la possibilità di avere un materiale altamente resistente, modellabile e con dimensioni in sezione notevolmente ridotte, ha reso realizzabile per gli architetti e i designer una nuova serie di forme e volumi precedentemente inaspettati, con una grande varietà estetica. Si ricordano tra le altre, il "Flying carpet" dell'Ungerer Museum a Strasburgo, le coperture di "Maison Navarra" e la copertura dello stadio Jean-Bouin a Parigi di R. Ricciotti.





Figura 3. Da in alto a sinistra l'Ungerer Museum di Strasburgo, la Maison Navarra e lo stadio Jean-Bouin in Francia.

## 1.5 Quadro normativo

Con il D.M. 17/01/2018, aggiornamento delle “Norme Tecniche per le Costruzioni, e la successiva circolare esplicativa del 21/01/2019, i calcestruzzi fibrorinforzati entrano ufficialmente a far parte dei “materiali da costruzione” da impiegare per usi strutturali. Al capitolo 11.2.12 la normativa definisce FRC un materiale *“caratterizzato dalla presenza di fibre discontinue nella matrice cementizia; tali fibre possono essere realizzate in acciaio o materiale polimerico, e devono essere marcate CE in accordo alle norme europee armonizzate, quali la UNI EN14889-1 ed UNI EN 14889-2 per le fibre realizzate in acciaio o materiale polimerico”*.

Come indicato inoltre nella circolare, un calcestruzzo fibrorinforzato ad uso strutturale per essere definito tale, oltre a determinati requisiti minimi prestazionali, deve essere caratterizzato da un dosaggio minimo di fibre al suo interno. La normativa del CNR-DT204/2006, *“Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di strutture di calcestruzzo fibrorinforzato”*, quantifica tale dosaggio come non inferiore allo 0,3% in volume, distinguendo in base alla percentuale di fibre nell'impasto un comportamento degradante (circa 0,2-2%) da quello incrudente (2-8%).

Per la qualificazione e progettazione per mezzo dei calcestruzzi fibrorinforzati, la normativa rimanda infine alle specifiche emanate dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, che, con il decreto n. 208/2019 *“Linee Guida per l'identificazione, la qualificazione, la certificazione di valutazione tecnica ed il controllo dei calcestruzzi*

*fibrorinforzati*”, definisce anche i limiti dei controlli di accettazione sul materiale sia per miscele formate in cantiere, sia per l’utilizzo di prodotti premiscelati.

Per quanto riguarda le fibre, in accordo con la normativa del Centro Nazionale di Ricerca, devono recare con la marcature CE e possono essere sia in acciaio, regolate dalla EN 14889-1, sia in materiale polimerico, EN 14889-2. La normativa specifica inoltre quali sono i parametri che devono caratterizzare le fibre (Lunghezza delle fibre, diametro equivalente, rapporto d’aspetto, resistenza a trazione, modulo di elasticità, forma, materiale, allungamento a rottura ...)

## 2. Proprietà meccaniche e chimico-fisiche degli UHPC

### 2.1 Comportamento a compressione

Le prestazioni meccaniche a compressione dei calcestruzzi fibrorinforzati presentano caratteristiche molto analoghe agli HPC, pertanto è opportuno analizzare dapprima il comportamento meccanico di una matrice senza fibre.

A differenza dei calcestruzzi ordinari, gli HPC sono caratterizzati da un comportamento ancora più spiccatamente elasto-fragile. Come riportato dal CNR-DT 209/2013, “Istruzioni per l’impiego di calcestruzzi ad alte prestazioni”, il legame sforzo-deformazione (Figura 4) presenta in particolare:

- Un legame 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.

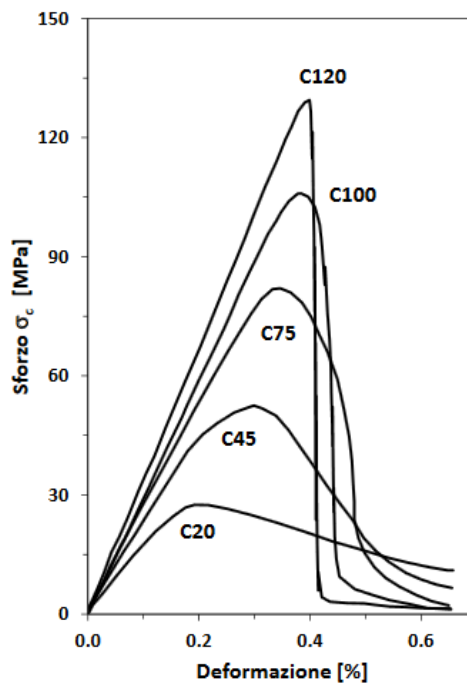


Figura 4. Legame sforzo deformazione in compressione uniaassiale per diverse classi di calce-struzzo.

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, 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. Un UHPC senza fibre è in grado di garantire una resistenza a compressione a 28 giorni pari o superiore a 150 MPa, contro i 30/50 MPa dei calcestruzzi ordinari.

L'aggiunta di fibre non influenza sensibilmente il comportamento a compressione del materiale lasciando pressoché inalterato il ramo ascendente della curva. L'effettivo vantaggio dell'inserimento delle fibre nella matrice cementizia si riscontra nella fase post fessurativa del materiale, andando ad aumentarne la duttilità e riducendone il comportamento fragile. Ciò determina la comparsa di un ramo discendente post-picco, la cui inclinazione dipende da numerosi fattori (Fehling et al. 2004), tra i quali:

- il contenuto di fibre;
- il fattore di forma (e quindi la geometria delle fibre);
- la lunghezza delle fibre in relazione alla dimensione massima dell'aggregato;
- l'orientamento delle fibre.

In generale, l'incremento dato dalle fibre sul valore della resistenza a compressione, per contenuti di fibre pari al 2.5%, è di circa il 15%, mentre l'incremento di duttilità può portare a deformazioni ultime di circa lo 0,5%, contro lo 0,35% del calcestruzzo ordinario.

## 2.2 Comportamento a trazione

Analogamente a quanto già visto per il comportamento a compressione, l'inserimento di fibre all'interno della matrice cementizia di un UHPC, non va tanto ad aumentare la resistenza di prima fessurazione del materiale, quanto a migliorarne il tratto post fessurativo. Il CNR 204/2006 (C.2.5.2.2) afferma che la resistenza a trazione uniassiale di prima fessurazione del conglomerato fibrorinforzato può essere assunta pari a quella della matrice, che da numerose evidenze scientifiche riportate in letteratura, si aggira intorno a valori tra 7 e 10 MPa. La normativa identifica due possibili comportamenti post fessurativi degli UHPC in base alla percentuale di fibre all'interno della matrice (figura 5). Per contenuti non elevati (inferiori al 2%) si avrà un comportamento di tipo degradante, caratterizzato dallo sviluppo di un'unica fessurazione, che va ad aumentare il comportamento duttile del materiale senza superare però la resistenza di prima plasticizzazione. Nel caso in cui il contenuto di fibra sia invece elevato (superiore al 2%), la resistenza può essere superiore a quella della matrice per effetto di un comportamento incrudente, legato ad un fenomeno di multifessurazione.

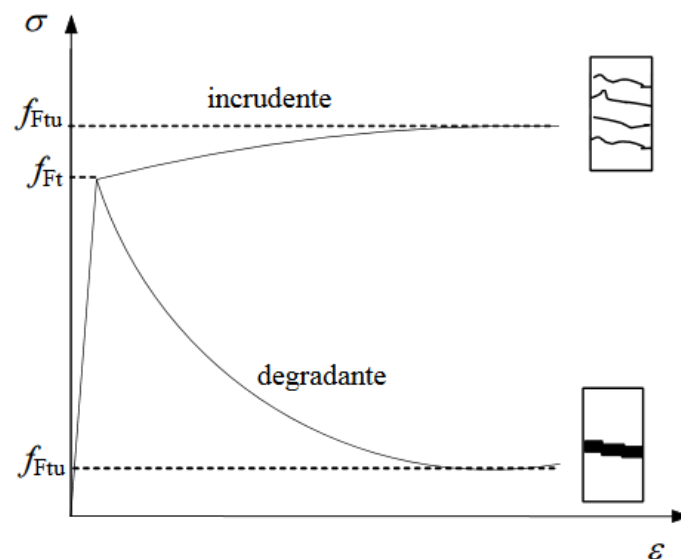


Figura 5. Differenti comportamenti a trazioni degli UHPC.

Il comportamento ideale a trazione di un calcestruzzo fibro rinforzato ad altissime prestazioni con elevato contenuto di fibre è rappresentato in figura 6. La resistenza a



trazione del materiale è fortemente influenzata dalla tipologia, orientamento, quantità e rapporto d'aspetto delle fibre, e può aumentare sensibilmente i valori di resistenza a trazione (fino a 15 MPa). In particolare vanno distinti tre diversi rami:

- Parte 1: ramo elastico, esteso dall'origine fino al valore  $\sigma_{cc}$ , definito come un punto fittizio che divide il comportamento elastico lineare iniziale dal comportamento plastico successivo.
- Parte 2: "ramo di hardening" che si estende dal valore  $\sigma_{cc}$  fino al valore di resistenza a trazione  $\sigma_{pc}$ . Tale tratto è caratterizzato dall'aumento dello sforzo  $\sigma$  all'aumentare della deformazione  $\varepsilon$ . Si verifica in questo tratto una multifessurazione che conferisce al materiale una resistenza post-fessurativa praticamente assente nella matrice senza fibre.
- Parte 3: "ramo di softening" avente andamento discendente fino all'annullarsi dello sforzo  $\sigma$ . In questo tratto la deformazione si concentra su una delle fessurazioni formatesi nei precedenti stadi fino ad arrivare a rottura.

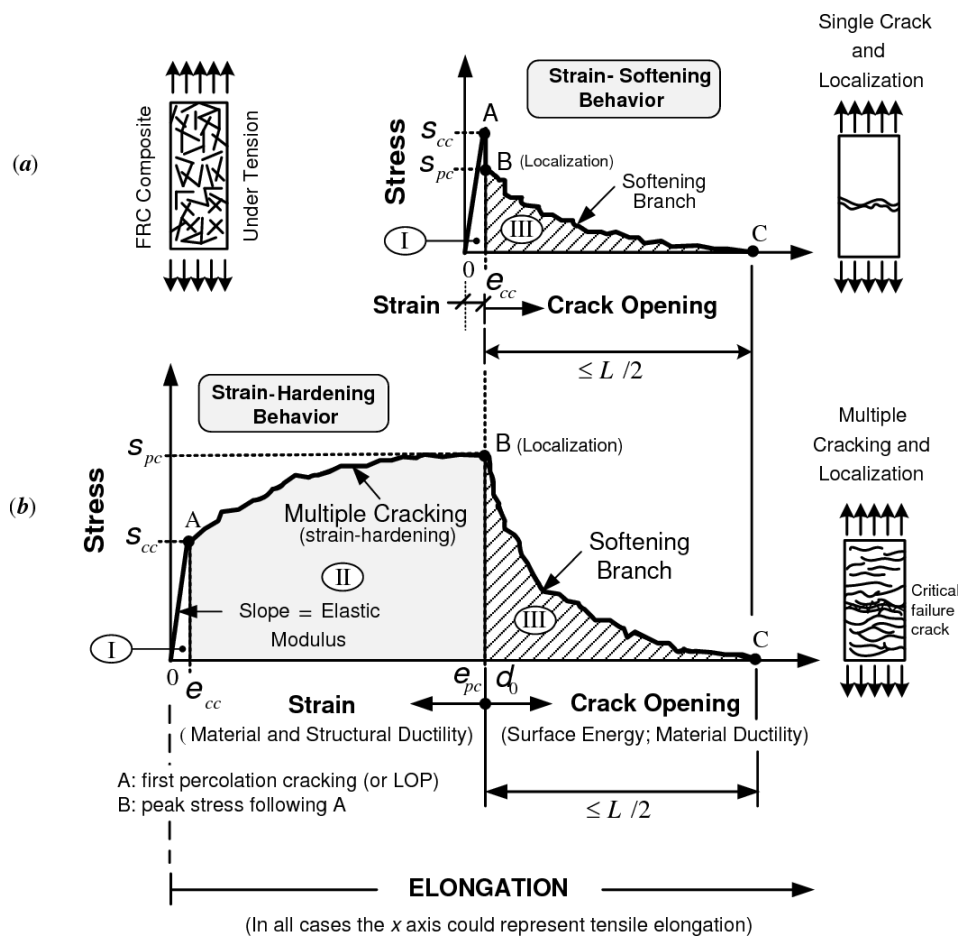


Figura 6. Comportamenti ideali a trazione degli UHPC a basso quantitativo di fibre (caso a) e alto quantitativo di fibre (caso b).

Analogamente alla trazione, anche il comportamento a flessione del materiale sarà fortemente influenzato dalla quantità di fibre, ma anche dalla loro direzione e tipologia. Più le fibre saranno numerose e orientate nella direzione ortogonale allo sviluppo delle fessurazioni, più il materiale presenterà un comportamento post-fessurativo accentuato, sia in termini di duttilità che di resistenza.

## 2.3 Ritiro degli UHPC

Il ritiro totale nel calcestruzzo è somma del ritiro *plastico*, *autogeno* e *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 ed è perciò inevitabile.

Il *ritiro plastico* e *quello igrometrico*, invece, sono causati dall'evaporazione dell'acqua dalla matrice cementizia verso l'ambiente esterno. Il primo si sviluppa nella fase di presa del getto ed è dovuto sia a una differenza di temperatura tra getto e ambiente, favorito dalle reazioni esotermiche che si sviluppano con la presa del calcestruzzo, sia da ambienti con umidità relativa inferiore al 95%. Questo tipo di ritiro è facilmente gestibile, mantenendo il getto in condizioni umide attraverso l'utilizzo di teli impermeabili o innaffiando il getto stesso, si può ridurre di molto l'effetto. Il ritiro igrometrico, invece, si sviluppa a causa di umidità relative inferiori al 95% nell'intero arco di vita utile del materiale, ma con valori più marcati nelle prime settimane.

Poiché gli aggregati si oppongono al ritiro della pasta cementizia, un maggior volume di aggregati nell'impasto e l'uso di aggregati caratterizzati da un modulo elastico maggiore comporta riduzioni del ritiro del calcestruzzo. Poiché negli UHPC, per le ragioni viste in precedenza, la dimensione massima degli aggregati e la loro quantità è molto ridotta, il ritiro, specialmente quello autogeno, è molto accentuato. L'uso di agenti espansivi e la presenza di fibre nell'impasto, si oppongono a questo processo dannoso per la buona qualità del materiale indurito, uno bilanciando il ritiro con un'iniziale espansione del

materiale, poi recuperata con il ritiro stesso, uno “trattenendo” l’impasto. Inoltre, poiché a parità di resistenza a compressione il rapporto acqua/cemento è minore in un UHPC, il ritiro igrometrico può risultare minore (European Guidelines for SCC, 2005; PCI Guidelines for SCC, 2004).

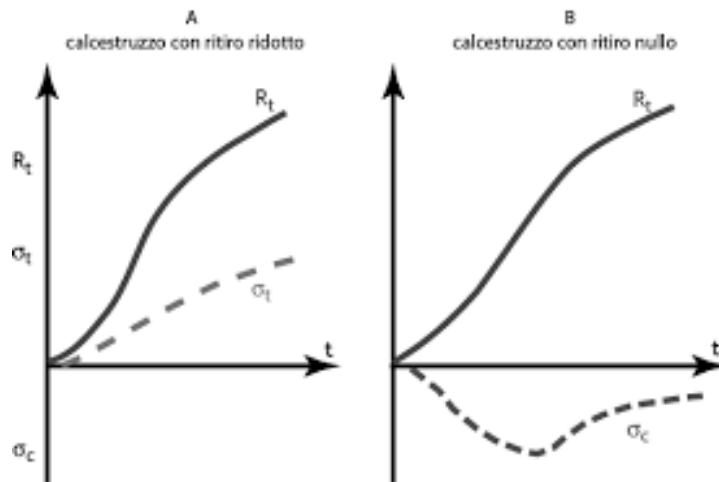


Figura 7. Andamento generale del ritiro, ridotto mediante corretta stagionatura (caso A) e mediante l’uso di espansivi (caso B)

## 2.4 Durabilità del materiale

Dall’osservazione avanzata sui materiali cementizi nel tempo, si è ampiamente dimostrata la diretta conseguenza della permeabilità del materiale con la sua durabilità. I principali meccanismi degradanti del materiale, quali carbonatazione, effetto solfatico, cicli gelo-disgelo, reazioni alcali-silicati, sono infatti la diretta conseguenza della porosità della matrice cementizia. Pur non avendo ancora riscontri pratici sugli UHPC, in quanto il loro primo utilizzo risale solo ai primi anni novanta, l’elevata compattezza di questo materiale, ne determina una bassissima porosità e permeabilità agli agenti esterni, potendo dunque affermare con sicurezza che è un materiale molto più durevole del suo predecessore. I principali accorgimenti che permettono a questo materiale di essere così compatto sono da attribuire al particolare mix design utilizzato. L’impiego di un elevato volume di finissimi, come filler calcarei e fumi di silice, che riempiono i vuoti creati dalle particelle di clinker di dimensioni maggiori, unito all’uso di

superfluidificanti ad alta efficacia, conferiscono un'ottima fluidità al conglomerato, mantenendo basso il rapporto acqua/cemento. La bassa porosità dei calcestruzzi UHPC è dunque un sinonimo di alte prestazioni, ovvero elevata resistenza a compressione, ma anche elevata durabilità.

Per quanto riguarda l'effetto dell'aggiunta di fibre nel calcestruzzo, come riporta il CNR 204/2006, allo stato attuale delle conoscenze non è ben noto l'effetto del rinforzo fibroso sui fenomeni diffusivi nel calcestruzzo, quali ad esempio penetrazione di ioni aggressivi o carbonatazione.

### **3. Composizione UHPC**

La miscela di un UHPC è normalmente composta da acqua, cemento, aggregati, aggiunte minerali, additivi e fibre. Non esiste una composizione univoca per la realizzazione di un calcestruzzo ad alte prestazioni, tuttavia generalmente si discosta sensibilmente da quella di un calcestruzzo ordinario per l'utilizzo di svariati additivi, nella selezione degli aggregati, per l'elevato contenuto di cemento e il basso rapporto a/c, oltre che ovviamente dall'uso delle fibre.

L'utilizzo di additivi superfluidificanti consente di ottenere un'elevata lavorabilità dell'impasto mantenendo comunque un basso rapporto a/c. La matrice cementizia richiede tuttavia una selezione più fina degli aggregati, per non andare a vanificare l'elevata resistenza ottenuta dalla combinazione del rapporto a/c con l'utilizzo di filler come il fumo di silice, che vanno a riempire i vuoti interstiziali tra i granuli di cemento garantendo compattezza all'impasto.

I materiali costituenti devono essere proporzionati attraverso uno specifico mix design che bilanci tipologia e dimensione degli inerti, contenuto d'acqua, fibre, aggiunte minerali e additivi, al fine di ottenere una miscela a matrice cementizia a trama finissima e altamente omogenea.

#### **3.1 Cemento**

La 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. La normativa europea di riferimento è la UNI EN 197-1 (2011), che distingue tre differenti classi di resistenza (Figura 8) e cinque principali categorie di cemento (Figura 9), classificate in base alla percentuale di clinker e delle polveri ad esso aggiunte.

CLASSE	RESISTENZA ALLA COMPRESIONE N/mm <sup>2</sup>				TEMPO DI INIZIO PRESA	ESPANSIONE
	RESISTENZA INIZIALE		RESISTENZA NORMALIZZATA			
	2 giorni	7 giorni	28 giorni		min	min
32,5	-	≥ 16	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 60	≤ 10
32,5 R	≥ 10	-				
42,5	≥ 10	-	≥ 42,5	≤ 62,5		
42,5 R	≥ 20	-				
52,5	≥ 20	-	≥ 52,5	-		
52,5 R	≥ 30	-				

Figura 8. Classi di resistenza e compressione dei leganti idraulici, UNI EN 197-1.

Tipi principali	Denominazione dei 27 prodotti (tipi di cemento comune)	Composizione (percentuale in massa <sup>a)</sup> )												
		Costituenti principali										Costituenti secondari		
		Clinker	Loppa di alfoforno	Fumo di silice	Pozzolana naturale	Pozzolana naturale calcinata	Cenere volante silicea	calcareo	Scisto calcinato	Calcare				
K	S	D <sup>b)</sup>	P	Q	V	W	T	L	LL					
CEM I	Cemento Portland	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM II	Cemento Portland alla loppa	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland ai fumi di silice	CEM II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland alla pozzolana	CEM II/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland alle ceneri volanti	CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland allo scisto calcinato	CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5
		CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5
	Cemento Portland al calcare	CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5
		CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5
		CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5
		CEM II/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5
	Cemento Portland composito <sup>c)</sup>	CEM II/A-M	80-88	←----- 12-20 -----→							-	-	0-5	
		CEM II/B-M	65-79	←----- 21-35 -----→							-	-	0-5	
CEM III	Cemento d'altoforno	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM IV	Cemento pozzolanico <sup>c)</sup>	CEM IV/A	65-89	-	←----- 11-35 -----→				-	-	-	-	0-5	
		CEM IV/B	45-64	-	←----- 36-55 -----→				-	-	-	-	0-5	
CEM V	Cemento composito <sup>c)</sup>	CEM V/A	40-64	18-30	-	←----- 18-30 -----→		-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM V/B	20-38	31-49	-	←----- 31-49 -----→		-	-	-	-	-	-	0-5

a) I valori del prospetto si riferiscono alla somma dei costituenti principali e secondari.  
b) La proporzione di fumi di silice è limitata al 10%.  
c) Nei cementi Portland composti CEM II/A-M e CEM II/B-M, nei cementi pozzolanici CEM IV/A e CEM IV/B e nei cementi composti CEM V/A e CEM V/B i costituenti principali diversi dal clinker devono essere dichiarati mediante la designazione del cemento (per esempio vedere punto 8).

Figura 9. Classificazione dei cementi, tipologie e composizioni, UNI EN 197-1.

Al fine di una corretta progettazione di un UHPC, la classe di resistenza più adeguata risulta la 52,5 MPa, garantendo già di base delle elevate resistenze meccaniche della matrice. Per quanto concerne la tipologia del cemento, non vi è una vera e propria limitazione. In analogia a quanto avviene per i calcestruzzi ordinari, la corretta scelta

del tipo di cemento è normalmente dettata da richieste legate alle specifiche applicazioni e considerando le 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. Va tuttavia tenuto in conto che l'elevata percentuale di cemento nell'impasto, unita a possibili getti massivi del materiale, posso portare allo sviluppo di forti reazioni esotermiche di idratazione, portando a fenomeni di fessurazione di origine termica, compromettendo quindi l'omogeneità e la monoliticità del getto, con gravi ripercussioni sulla durabilità dei manufatti e con costosi interventi di riparazione. Per scongiurare tali comportamenti è quindi opportuno l'utilizzo di cementi a basso tenore di alluminato tricalcico o celite ( $C_3A$ ), uno dei componenti mineralogici del cemento, caratterizzato dal maggiore sviluppo di calore durante le fasi di indurimento del calcestruzzo.

### **3.2 Aggregati**

L'aumento della resistenza meccanica e del modulo di elasticità della matrice cementizia degli UHPC, ottenuta mediante l'abbassamento dei rapporti acqua/cemento ( $a/c$ ) e tutte le altre peculiarità viste finora, richiede parallelamente anche un aumento delle proprietà fisico-meccaniche dell'aggregato impiegato, dato che l'elemento debole della catena non è più la pasta cementizia bensì l'aggregato stesso.

La scelta dei materiali lapidei da utilizzare dovrà perciò tenere conto non solo della loro curva granulometrica, come avviene anche per i calcestruzzi ordinari, ma anche della loro natura e resistenza meccanica. Gli aggregati dovranno comunque essere conformi, con relativa certificazione CE, alla UNI EN 12620 (2008), "*Aggregati per calcestruzzo*", e ai requisiti richiesti dalla UNI 8520-1(2015) e UNI 8520-2 (2016), unitamente alla UNI 8520-22 (2017) per la valutazione delle potenziali reattività alcali-silice degli aggregati, al fine di prevenire fenomeni di espansione deleteria del calcestruzzo.

La zona di transizione, identificata come quella parte della micro struttura in cui vi è l'adesione tra matrice cementizia e superficie esterna degli aggregati, rappresenta 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 cementizia, si deve fare impiego di filler e di aggiunte minerali, unitamente all'utilizzo di diametri massimi contenuti, che vanno, in genere, dai 12 ai 20 mm.

In linea generale, si può affermare che la resistenza dell'aggregato limita la resistenza del calcestruzzo a compressione e flessione, mentre la zona di transizione influenza e limita la resistenza a compressione.

Attraverso numerosi studi (Kýlýc et al. 2008) è stata dimostrata una correlazione tra le caratteristiche meccaniche finali degli UHPC e l'utilizzo di differenti tipologie di aggregato. Confrontando più varietà di rocce (gabbro, basalto, quarzite, calcare, arenaria), si è visto che la resistenza a compressione del calcestruzzo cresce con il crescere di quella delle rocce e che aggregati con un alto valore di resistenza all'abrasione producono un calcestruzzo con alta resistenza all'abrasione.

In modo particolare la migliore resistenza a compressione è ottenuta per calcestruzzi realizzati con basalto, dato che la rottura avviene sia nella matrice cementizia sia nella roccia. I calcestruzzi realizzati con calcare ed arenaria presentano invece una resistenza equivalente a quella delle rocce per cui la rottura avviene nell'aggregato e non viene utilizzato al massimo la resistenza della pasta. Il calcestruzzo realizzato con il basalto invece è limitato dalla resistenza a compressione della pasta, e non attinge a tutto il potenziale dell'aggregato. Caso a parte per il calcestruzzo realizzato con la quarzite: data la superficie levigata, non vi è perfetta aderenza tra pasta ed aggregato e quindi la resistenza complessiva risulta essere inferiore sia alla resistenza dell'aggregato sia a quella della pasta.

La resistenza a compressione migliora quando il rapporto tra aggregati (in modo particolare sabbie) e cemento è pari a 1.1 e che l'utilizzo combinato di aggregati di taglia differente migliora notevolmente le prestazioni di un UHPC rispetto all'uso di un solo componenti (Park et al. 2008).

Una delle combinazioni ottimali vede la presenza di 70% di polvere di quarzo dal diametro di 0.3-0.5 mm abbinata a 30% di sabbia dalle dimensioni di 0.17-0.3

Mm, accanto, ovviamente, all'uso di polveri finissime.



In particolare, la lunghezza delle fibre e la dimensione massima dell'aggregato devono essere correlate tra loro per garantire una uniforme ed efficiente distribuzione delle fibre. A tal fine la dimensione massima dell'aggregato non deve essere superiore a 0.5 volte la lunghezza delle fibre.

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.

### **3.3 Additivi**

#### **3.3.1 Superfluidificanti**

Dagli anni '70 in poi, la nascita dei fluidificanti e superfluidificanti, ha portato un notevole sviluppo dei materiali cementizi. Grazie a questi additivi è infatti possibile mantenere un basso rapporto a/c, senza inficiare sulla lavorabilità dell'impasto, requisito fondamentale per la corretta posa in opera e lo sviluppo di una adeguata compattezza del materiale indurito. Il loro utilizzo è ancora più essenziale con l'uso dei filler come il fumo di silice, i quali, per via delle loro dimensioni finissime ed elevata area superficiale, aumentano la richiesta di acqua nell'impasto.

Il meccanismo con cui agiscono i superfluidificanti (formati da polimeri sintetici idrosolubili quali poli-naftalen-solfonati, poli-melammin-solfati, poli-acrilati, poli-carbossilati, etc.) consiste nel cosiddetto effetto deflocculante (Figura 10). I granuli di cemento nell'impasto ancora fluido, si presentano infatti come grossi agglomerati di granuli separati dall'acqua. Tale fenomeno, detto flocculazione, è causato dall'attrazione elettrostatica tra i vari granuli che si presentano con le superfici caricate elettrostaticamente per effetto della macinazione e della rottura dei legami ionici presenti nei costituenti del clinker.

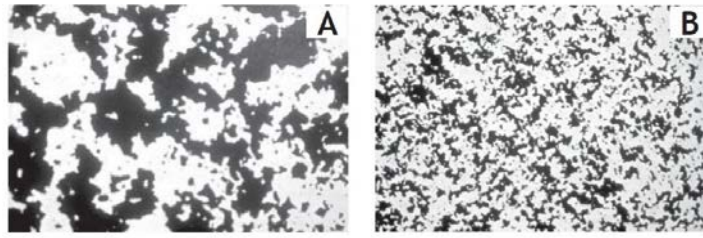


Figura 10. Vista al microscopio dell'impasto di calcestruzzo senza l'uso di superfluidificanti (caso A) e con l'uso di superfluidificanti (caso B).

I superfluidificanti agiscono disperdendo le particelle solide attraverso due possibili fenomeni:

- Repulsione elettrostatica: mediante l'assorbimento sulla superficie dei granuli di cemento delle molecole di superfluidificante, si formano delle cariche elettrostatiche (*zeta potential*) dello stesso segno con il conseguente allontanamento delle molecole di cemento (Figura 11).
- Impedimento sterico: i gruppi carbossilici dei superfluidificante vanno a legarsi con le molecole di cemento e per mezzo di rami laterali neutri, costituiscono un ingombro all'aggregazione dei granuli di cemento (Figura 12).

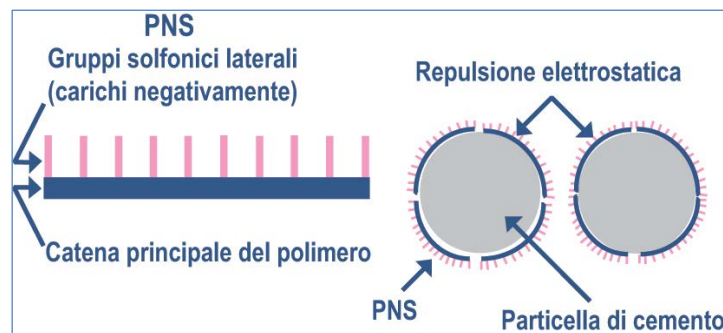


Figura 11. Effetto di repulsione statica dei superfluidificanti.

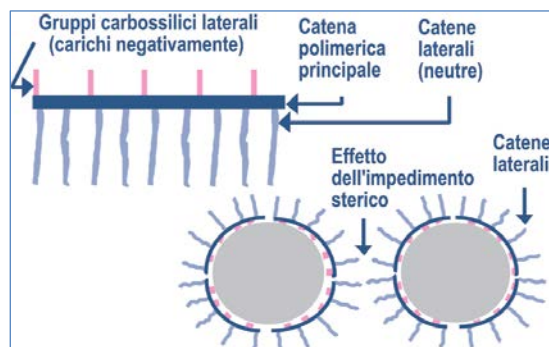


Figura 12. Effetto di impedimento sterico dei superfluidificanti.

### 3.3.2 Espansivi e SRA

Come illustrato in precedenza, il calcestruzzo è soggetto a vari fenomeni di ritiro, sia durante l'iniziale fase plastica, sia durante quella di indurimento. Se non correttamente trattato, il ritiro può portare a una fessurazione della matrice cementizia con un conseguente indebolimento delle qualità meccaniche finali del materiale. Per ridurre questi fenomeni sono possibili due diverse strade:

- L'uso di superfluidificanti per diminuire le quantità di acqua e cemento dell'impasto, a favore di una maggiore percentuale di aggregato, riducendo così il ritiro igrometrico;
- L'utilizzo di additivi SRA (Shrinkage-Reducing Admixtures) ed espansivi nell'impasto.

Gli SRA sono additivi a base di poliglicoli (come il polipropilene-glicol, il neopentil-glicol o il poliossipropilene-glicol) che provocano una significativa riduzione del ritiro igrometrico. Tuttavia, una completa eliminazione del ritiro può essere realizzata solo combinando l'SRA (dosato circa all'1% sul peso del cemento) con un agente espansivo a base di ossido di calcio, solfalluminato di calcio o solfato di calcio (circa al 10% del peso del cemento). I due additivi influenzano il ritiro durante differenti fasi, il primo agisce principalmente a lungo termine, l'altro durante la stagionatura umida del calcestruzzo. L'ossido di calcio infatti, a seguito dell'idratazione, produce un'espansione della matrice cementizia che, impedita dalle fibre annegate nel materiale, fa nascere delle tensioni di compressione nel calcestruzzo. Si crea quindi uno stato di precompressione chimica indotta dall'espansivo. In seguito all'indurimento, nella struttura si avranno tensioni di trazione ridotte o annullate e la corrispondente riduzione o annullamento delle fessure (Figura 13).

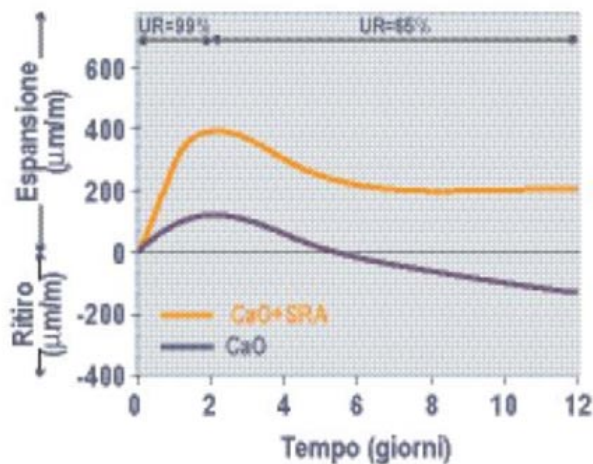


Figura 13. Curva di espansione-ritiro di un calcestruzzo a ritiro compensato con agente espansivo a base di ossido di calcio (CaO) con e senza SRA.

### 3.4 Fumi di silice

Un contributo importante alle eccezionali prestazioni degli UHPC è fornito dall'uso del fumo di silice nell'impasto. Questo si ottiene come sottoprodotto dell'industria del silicio, del ferro-silicio e di altre leghe metalliche a base di silicio. I sottoprodotti che si vengono a formare dal raffreddamento delle varie lavorazioni, portano alla creazione di diversi tipi di fumo.

Chimicamente il fumo di silice è in prevalenza costituito da silice amorfa ( $\text{SiO}_2$ ), la cui percentuale può variare da circa l'85% fino al 98%, il che lo rende un ottimo materiale pozzolanico (reazione con la calce libera, crea C-S-H maggiormente resistente). Gli altri costituenti minori (ossidi di alluminio, ferro, calcio, magnesio, ecc.) possono essere presenti in quantità più o meno trascurabili a seconda del tipo di lega prodotta, variando però il colore finale del prodotto.

In generale comunque, si presenta sotto forma di una polvere bianco/grigia, con particelle comprese all'incirca tra 0,05 e 0,5  $\mu\text{m}$  e con un diametro medio di 0.1-0.2  $\mu\text{m}$ . Per ogni tonnellata di silicio metallico prodotto si ottengono circa 300 kg di fumo. La quantità disponibile è quindi relativamente modesta, motivo per il quale il prezzo ha

raggiunto valori che superano di molto quelli del cemento (da due a otto volte di più a seconda della qualità e dei trattamenti subiti).

I primi esperimenti sull'impiego del fumo di silice nel calcestruzzo sono stati fatti in Norvegia all'inizio degli anni '50, ma solo dalla metà degli anni '70 se ne riscontrano le prime applicazioni pratiche.

L'aggiunta del fumo di silice trasforma l'impasto in un calcestruzzo tixotropico, capace cioè di essere molto fluido in movimento e viscoso a riposo. Questo fenomeno permette di ridurre l'effetto di bleeding del getto e lo rende anche impiagabile nelle applicazioni a spruzzo su pareti verticali.

Come già accennato in precedenza, la ridotta dimensione delle particelle conferisce al fumo di silice notevoli proprietà fillerizzanti, consentendo alle sue particelle di allocarsi nei vuoti interstiziali esistenti tra i granuli di cemento riducendo la microporosità tipica della pasta di cemento, aumentandone densità e resistenza. Questa caratteristica rende il fumo di silice un materiale indispensabile per produrre calcestruzzi ad elevatissime prestazioni meccaniche.

La finezza del materiale, tuttavia, si traduce anche in un elevato sviluppo superficiale del fumo di silice. Questo porta a un aumento della richiesta d'acqua nell'impasto, che necessita di essere bilanciato con l'uso di superfluidificanti, per non andare a inficiare troppo sulla resistenza finale del calcestruzzo indurito. A seconda del tipo di superfluidificante utilizzato tuttavia, la percentuale ottimale di fumo di silice da impiegare nella miscela cambia, onde evitare possibili effetti ritardanti nella presa.

### **3.5 Fibre**

Mediante l'impiego di fibre all'interno dell'impasto, è possibile modificare sensibilmente alcune proprietà del calcestruzzo, che possono differire in maniera importante rispetto a quelle dei calcestruzzi ordinari.

Esistono diversi tipi di fibre impiegate nel rinforzo dei sistemi cementizi. Quelle maggiormente utilizzate sono di tipo metallico, polimerico, in vetro, in carbonio o in materiale naturale (cellulosa, legno ecc...). L'influenza delle fibre sulle proprietà

meccaniche di un conglomerato cementizio dipende dalle proprietà materiale di cui sono costituite, in particolare dalla tenacità e dal modulo elastico a trazione, e da alcuni parametri geometrici quali: la forma, la lunghezza, il diametro equivalente e il rapporto d'aspetto. Quest'ultimo viene definito come il rapporto tra la lunghezza della fibra e il suo diametro equivalente. A parità di composizione e di dosaggio, l'efficacia delle fibre migliora se aumenta il rapporto d'aspetto e se la forma assume un contorno irregolare che favorisca l'adesione alla matrice cementizia. Accanto alle fibre semplicemente rettilinee infatti, esistono quelle fibre ondulate, uncinata, nervate, o a estremità schiacciate.

Le fibre che hanno trovato il maggior impiego nella composizione di UHPC sono quelle d'acciaio. Tali fibre hanno una lunghezza generalmente compresa tra i 6 mm e 70mm ed un diametro equivalente compreso tra 0,1 mm e 1,20 mm. La resistenza a trazione raggiunge quindi normalmente i 2400 MPa e talvolta supera i 3000 Mpa.

L'utilizzo delle fibre in acciaio contrasta l'apertura progressiva delle fessure, conferendo al calcestruzzo, dopo la fessurazione, una significativa resistenza residua a trazione (detta anche tenacità) e sono quindi in grado di incrementare significativamente l'energia assorbita nel processo di frattura. Lo scopo delle fibre è quindi quello di "cucire" il materiale dopo la fessurazione, garantendo una tenacità, e a volte anche resistenza, maggiore al calcestruzzo.

In particolar modo se le fibre si rompono o si estraggono (pull-out) durante la fase iniziale della formazione della prima fessura, non si avrà un incremento della resistenza di prima fessurazione, ma solo un aumento della fase plastica del materiale. Questo comportamento è indicato con il termine "softening" o comportamento degradante (Figura 14a). Se, diversamente, le fibre sono in grado di sopportare ulteriore carico dopo la formazione della prima fessura, allora si assisterà ad una micro-fessurazione diffusa del composito con un conseguente comportamento di "hardening", ovvero incrudente (Figura 14b). Il volume di fibre che determina il passaggio da un comportamento all'altro è definito "volume critico" e dipende anche dal rapporto d'aspetto delle fibre

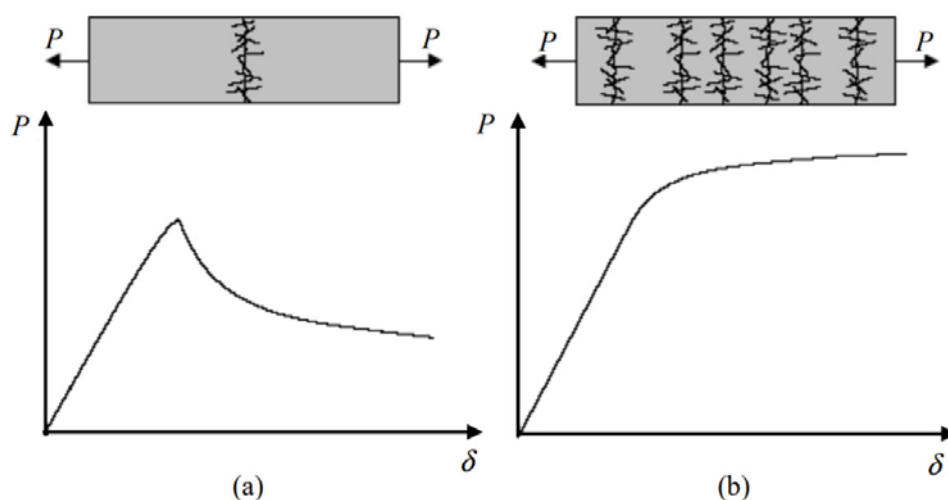


Figura 14 – Comportamento sforzo deformazione UHPC, caso “softening” (a) e “hardening” (b).

Il rapporto d'aspetto è definito come il rapporto tra la lunghezza della fibra e il suo diametro equivalente. Tale parametro è il principale responsabile all'azione di cucitura delle fibre. A parità di composizione e di dosaggio, infatti, all'aumentare del rapporto, cresce l'efficacia delle fibre, rendendo più difficile lo sfilamento in fase fessurata. L'adesione, inoltre, aumenta ulteriormente se si utilizzano fibre uncinato o piegate.

Nella maggior parte dei casi, alla matrice vengono aggiunte fibre dello stesso materiale (in tal caso si parla di “mono FRC”), anche se recentemente sono stati sviluppati FRC che vedono la presenza di differenti tipologie di fibre realizzate con lo stesso materiale (Multi Scale Cement Composites) o di due o più tipologie di fibre (acciaio e vetro, acciaio e polipropilene, ecc.), detti Hybrid FRC, in grado di combinare al meglio le proprietà meccaniche e fisiche di ogni tipo di fibra (Di Prisco et al., 2009; Park et al., 2011).

### 3.5.1 Fibre in acciaio ottonato

Nell' studio effettuato, sono state utilizzate fibre in acciaio ottonato. Queste presentano alcuni pregi rapportate alle altre tipologie presenti sul mercato, tra cui una limitata ossidazione, ma soprattutto una miglior aderenza alla matrice cementizia.

Durante la presa e l'indurimento del getto, con l'utilizzo di espansivi a base di ossido di calcio (CaO), si sviluppano delle reazioni chimiche interne al materiale tra la pasta di

cemento e il rivestimento in ottone delle fibre. L'ambiente alcalino del calcestruzzo, promuove infatti la formazione di cristalli di idrossido di zinco e calcio a contornare le fibre, che risultano quindi legate chimicamente, oltre che per attrito, alla matrice cementizia.



## 4. Attività sperimentale

Per l'attività sperimentale condotta, sono state svolte diverse prove sul materiale, tra cui:

- Slump test per la misura della lavorabilità;
- Monitoraggio del ritiro;
- Prove a flessione;
- Prove a compressione.

Tutte le prove sono state svolte all'interno del laboratorio materiali del Dipartimento di Scienze e Ingegneria della Materia, dell'Ambiente ed Urbanistica (SIMAU) dell'Università Politecnica delle Marche di Ancona.

La caratterizzazione meccanica è stata svolta in accordo alla norma UNI EN 1015-11:2019 e al DM 03/06/1968, attraverso il confezionamento di provini 40 x 40 x 160 mm, confezionati in numero di 3 per ogni scadenza.

Per le misurazioni del ritiro, invece, si è fatto riferimento alla norma UNI 6687:1973, *“Determinazione del ritiro idraulico. Prova di laboratorio”*.

### 4.1 Materiali utilizzati

Di seguito un elenco dettagliato dei materiali utilizzati per il confezionamento dei provini.

- Come cemento si è utilizzato il CEM I 52,5 R. Cemento di natura prevalentemente Portland, conforme alla norma EN 197-1:2011, *“Composizione, specifiche e criteri di conformità per cementi comuni”*, caratterizzato dalla composizione riportata nella tabella seguente.

CEM I 52,5 R	
Clinker	91,5%
Calcare	3,3%
Gesso	3,2%
Materie prime artificiali (Solfato ferroso, additivi inorganici, solfato di calcio)	0,7%
Materie prime seconde (Ceneri, gesso recuperato)	1,4%

Tabella 1. Composizione cemento utilizzato

- L'espansivo utilizzato è un additivo in polvere di natura inorganica composto da ossidi alcalino terrosi e conforme alla norma UNI 8148, sugli espansivi per impasti cementizi.
- Come superfluidificante è stato utilizzato un additivo in polvere a base polycarbossilica.
- L'antischiuma utilizzato è un additivo in polvere costituito da una miscela di oli siliconici, fosfato di triisobutile e polimeri tensioattivi su supporto. L'utilizzo di tale additivo serve a ridurre e ostacolare la formazione di schiuma durante la miscelazione.
- Come SRA è stato utilizzato un additivo composto da una miscela di alcoli alifatici polifunzionali e minerali di calcio trattati.
- Gli aggregati utilizzati sono:
  - Sabbia 0/1 Po, con granulometria compresa tra 0-1 mm;
  - Sabbia media essiccata, con il 75,62% di silicio ( $\text{SiO}_2$ ) e granulometria tra 0,1 e 1,1 mm.



Figura 15. Sabbia 0/1 Po (a sinistra) e sabbia media essiccata (a destra).

- Come fumo di silice utilizzato deriva da un processo di riduzione della quarzite in forni di tipo elettrico ad arco ad alte temperature (2000 °C) per la produzione di leghe metalliche di silicio.



*Figura 16. Fumo di silice.*

- Le fibre utilizzate sono di tipo lisce in acciaio ottonato della lunghezza di 13 mm con un rapporto d'aspetto di 65, conformi alla UNI EN 14889-1.



*Figura 17. Fibre in acciaio ottonate.*

## 4.2 Mix Design

Per “mix-design” si intende il progetto dei componenti da adoperare all’interno di una miscela in calcestruzzo, al fine di ottenere le prestazioni richieste (in termini di lavorabilità, resistenza meccanica, durabilità, ecc...). Le percentuali dei componenti da adoperare dipendono tanto dalle qualità che si vogliono ottenere, quanto dai tipi di materiali e additivi che si va ad utilizzare (tipo di cemento, inerte, additivi ecc...). Per tale motivo non esiste una combinazione univoca per il confezionamento dell’impasto, basando quindi il mix-design su correlazioni sperimentali esistenti o studi teorici sul materiale.

In particolare in questo studio si è cercato di trovare il corretto rapporto tra additivi espansivi e fibre all’interno dell’impasto, al fine di ottimizzare il ritiro del materiale e garantirne quindi migliori caratteristiche prestazionali.

Le miscele testate sono state otto, composte come riportate nelle tabelle seguenti.

Miscela →	GETTO 1	GETTO 2	GETTO 3	GETTO 4	GETTO 5	GETTO 6	GETTO 7	GETTO 8
Componenti ↓	Kg/m <sup>3</sup>	Kg/m <sup>3</sup>	Kg/m <sup>3</sup>	Kg/m <sup>3</sup>	Kg/m <sup>3</sup>	Kg/m <sup>3</sup>	Kg/m <sup>3</sup>	Kg/m <sup>3</sup>
Cemento 52,5 R	720	720	720	720	720	720	720	720
Sabbia Essiccata	945	945	945	945	945	945	945	945
Sabbia Po	410	410	410	410	410	410	410	410
Superfluidificante (policarbossilico)	10	10	10	10	10	10	10	10
Antibolle	3	3	3	3	3	3	3	3
SRA	9	9	9	9	9	9	9	9
Espansivo (Cao)	<b>25</b>	<b>25</b>	<b>35</b>	<b>35</b>	<b>30</b>	<b>30</b>	<b>40</b>	<b>40</b>
Fibre	<b>100</b>	<b>150</b>	<b>100</b>	<b>150</b>	<b>100</b>	<b>150</b>	<b>100</b>	<b>150</b>
Acqua	245	245	245	245	245	245	245	245
Fumo di silice	100	100	100	100	100	100	100	100
a/c	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34

Tabella 2. Composizione getti.

## 4.3 Fasi operative

Per il confezionamento dei provini si è seguita la procedura successivamente riportata.

1. Pesatura dei componenti secondo le tabelle precedentemente riportate.
2. Inserimento dei materiali asciutti in una miscelatrice da 5 litri, con successiva aggiunta d'acqua in maniera controllata. Una volta ottenuto un impasto omogeneo vengono aggiunte le fibre in maniera uniforme, onde evitare possibili grumi all'interno dell'impasto.



*Figura 18. Miscelazione dell'impasto.*

3. Esecuzione della prova di spandimento per la determinazione della lavorabilità.
4. Getto all'interno delle apposite casseformi precedentemente trattate con agente disarmante per facilitarne la scasseratura. Per ogni miscela sono stati fatti 9 provini per le prove di flessione e compressione (da testare a 3, 7 e 28 giorni) e 3 provini in casseforme speciali per la misura del ritiro.
5. Rasatura e compattazione tramite tavola vibrante.



*Figura 19. Getto e vibrazione della miscela.*

6. Per limitare l'evaporazione eccessiva d'acqua, i provini sono stati coperti con una pellicola impermeabile fino al momento della scasseratura.
7. Scasseratura a 7 ore dal getto per i provini a ritiro e a 24 ore per tutti gli altri.
8. Maturazione dei provini con metodi differenti tra quelli per le sole misure di ritiro e quelli da sottoporre a prove meccaniche.

## **4.4 Provini**

Come precedentemente accennato, per ogni tipologia di miscela sono stati realizzati 12 provini delle dimensioni di 40x40x160 mm, tre dei quali da sottoporre a periodiche misure di ritiro e i rimanenti da testare meccanicamente a 3, 7 e 28 giorni.

I provini da ritiro sono stati confezionati in particolari casseformi, al fine di poter annegare all'interno dell'impasto una coppia di viti per le misurazioni.

Per i provini da sottoporre alle prove meccaniche, la maturazione è avvenuta a temperatura di circa 20 °C e umidità relativa  $\geq 95\%$ , mediante il confezionamento con pellicola impermeabile e immersione in acqua fino al momento delle prove. I provini per il ritiro, invece, sono stati mantenuti nelle stesse condizioni dei precedenti fino a 3 giorni, successivamente sono stati posti in una camera isoterma alla temperatura di 20 °C con umidità relativa fissa al 50%, al fine di simulare in maniera più accurata le reali condizioni di stagionatura di un calcestruzzo.

## **4.5 Prove eseguite**

Di seguito sono riportate con maggiore dettaglio la strumentazione e le modalità di esecuzione delle prove eseguite.

## 4.5.1 Prova di spandimento

La prova è stata svolta in accordo con la normativa UNI EN 1015-3:2007 “*Determinazione della consistenza della malta fresca mediante tavola a scosse*”, utilizzando l’apposito macchinario in figura 20.

La procedura consiste nel riempire il bicchierino troncoconico al di sopra della piastra subito dopo aver completato la miscelazione del getto. Una volta pulito e rettificato il contenuto della cassaforma, questa va alzata lentamente e il macchinario assesta 15 colpi con ritmo e intensità standardizzati. Alla fine del processo si misura la diagonale dell’impasto lungo due direzioni ortogonali e la media tra i valori, se la loro differenza non è maggiore del 10%, fornisce la lavorabilità del materiale.



Figura 20. Strumento per la misurazione dello spandimento.

La lavorabilità è uno dei requisiti fondamentali per il calcestruzzo. Da questa dipendono sia la mobilità del calcestruzzo, principalmente le attività di posa in opera del materiale fresco, sia la sua compattabilità, ovvero la facilità con la quale, mediante la vibrazione, è possibile espellere l’aria intrappolata nell’impasto. Una elevata lavorabilità, unita ad una corretta vibrazione, garantisce al materiale indurito un minor numero di imperfezioni nella matrice cementizia e una maggior aderenza alla barre di armatura,

portando a un materiale finale più resistente e meno soggetto al degrado da agenti esterni.

#### 4.5.2 Monitoraggio ritiro

Lo scopo di questa prova è stato quello di capire come varia nel tempo la deformazione da ritiro, analizzando le grandezze a breve termine (indicative del ritiro plastico) e a lungo termine (per il ritiro igrometrico). Monitorando la deformazione per le diverse miscele e comparandole tra loro, è stato possibile ricavare la combinazione più stabile dal punto di vista del ritiro, caratterizzata da una deformazione finale più prossima allo zero e quindi da un minor numero di imperfezioni nella matrice.

La norma UNI 6687:1973 stabilisce le modalità per la determinazione del ritiro assiale di provini con dimensioni 40x40x160 mm. Il ritiro è definito come la variazione di lunghezza espressa in micrometri, riferita al metro di lunghezza. Lo strumento traduce le misure del ritiro su un comparatore millesimale (minima suddivisione= 0,01 mm). La prova consiste nel misurare, volta per volta, la dimensione di una barra di riferimento in acciaio e successivamente si registra la misura del provino, ponendolo sotto il comparatore. Per differenza con il riferimento iniziale ci si determina l'entità del ritiro.



Figura 21. Misurazione del ritiro assiale.



### 4.5.3 Prove a flessione

In accordo con la norma UNI EN 1015-11:2019 “*Determinazione della resistenza a flessione e a compressione della malta indurita*”, si sono svolte le prove di flessione su tre punti di provini 40x40x160 mm. La resistenza è stata misurata utilizzando una pressa idraulica munita di cella di carico, collegata ad un terminale presso il Laboratorio Materiali del Dipartimento di Scienze e Ingegneria della Materia, dell’Ambiente ed Urbanistica (SIMAU). Il provino, appoggiato alle due estremità e disposto longitudinalmente, viene sottoposto a un carico concentrato applicato al centro della faccia superiore. Il carico poi viene fatto aumentare monotamente e lentamente, fino a determinare la resistenza di prima fessurazione a flessione.

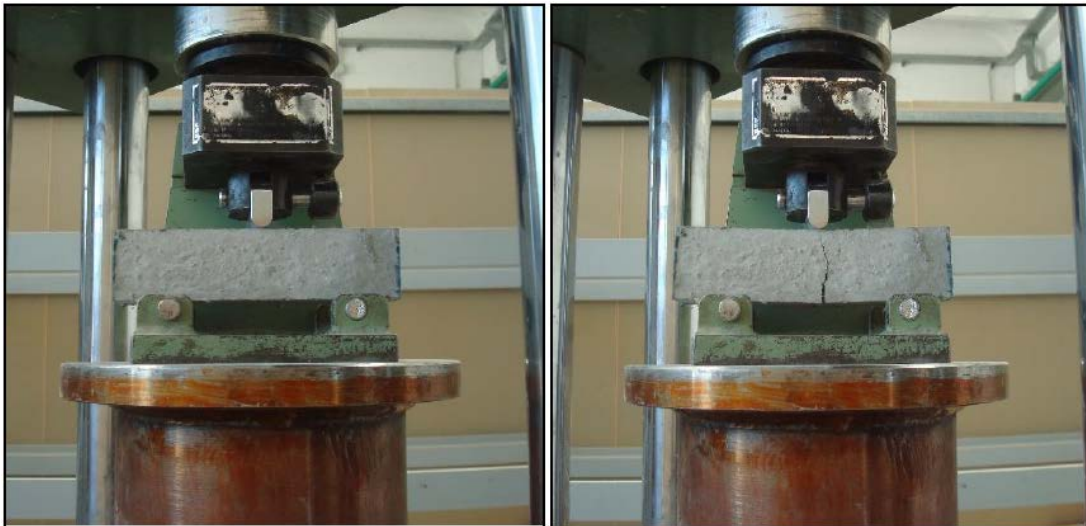


Figura 22. Prova a flessione provini 40x40x160 mm.

### 4.5.4 Prove di compressione

Sulle due parti di provino che si creano dopo la prova di flessione, vengono svolte le prove di compressione, in accordo con la norma UNI EN 1015-11:2019. La prova, svolta per mezzo di una pressa idraulica munita di cella di carico e collegata ad un terminale, consente di stabilire la tensione di rottura a compressione. Non si è analizzato il comportamento delle tensioni post fessurazione, andando a relazionare la variazione

di espansivo e quantitativo di fibre nella miscela, solo con la resistenza massima elastica a compressione.



*Figura 23. Prova compressione provini 40x40x160 mm.*

## 5. Risultati e discussione

### 5.1 Risultati slump test

Nella tabella 3 vengono riportati i valori delle prove di spandimento. Si può osservare come, aumentando la quantità di espansivo nell'impasto, la lavorabilità a breve termine ne risulti influenzata negativamente.

Anche l'incremento di fibre, passando da 100 a 150 kg/m<sup>3</sup>, comporta una leggera riduzione della lavorabilità. La differenza non è molto marcata ma, coerentemente con quanto riscontrabile in letteratura, l'aumento delle fibre costituisce comunque un impedimento alla fluidità del getto.

Miscela	D1	D2	Dmedio	Deviazione ≤ 10%
Getto 1 (25 esp. 100 fibre)	17,6	19,1	18,35	4,1
Getto 2 (25 esp. 150 fibre)	17,8	18,9	18,35	3,0
Getto 5 (30 esp. 100 fibre)	17	17,5	17,25	1,4
Getto 6 (30 esp. 150 fibre)	15	17	16	6,3
Getto 3 (35 esp. 100 fibre)	15	15,8	15,4	2,6
Getto 4 (35 esp. 150 fibre)	14,7	15,3	15	2,0
Getto 7 (40 esp. 100 fibre)	13	14,3	13,65	4,5
Getto 8 (40 esp. 150 fibre)	12,8	14	13,4	4,8

Tabella 3. Risultati prove di spandimento.

## 5.2 Risultati ritiro

Di seguito sono riportati i risultati sul monitoraggio del ritiro condotto sui provini con le miscele precedentemente elencate, ad una distanza dal getto di: 7h, 1g, 2g, 3g, 7g, 14g, 21g, 28g.

Come già dimostrato in letteratura, l'effetto degli espansivi a base di ossido di calcio (CaO) unito alla presenza di additivi SRA, porta allo sviluppo di una buona dilatazione iniziale del calcestruzzo, utile a bilanciare il ritiro dato dalla progressiva idratazione del materiale, ulteriormente ridotto dalla presenza di additivi SRA.

In questo caso si è analizzato il comportamento del ritiro, in base al variare della quantità di espansivo e di fibre, mantenendo fissa la quantità di SRA (1.25% SRA/cemento). Dai grafici riportati si può notare come l'aumento della quantità di fibre nell'impasto abbia portato, in quasi tutti i casi, ad una espansione maggiore nei primi tre giorni, rapportato alle rispettive miscele a 100 kg/m<sup>3</sup>.

Gli studi presenti in letteratura indicano che, rispetto a un UHPC senza fibre, i calcestruzzi fibro-rinforzati sono caratterizzati da un'espansione iniziale minore, dovuta all'effetto di "contenimento" delle fibre sulla matrice cementizia. In questi casi, l'espansione innescata dall'additivo a base di ossido di calcio, porta ad uno stato di pretensione interna che si ripercuote sia sulle prestazioni meccaniche del materiale, meglio analizzate nel paragrafo successivo, sia sull'espansione iniziale, andando a ridurla notevolmente (*Study of Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete with Expansive and Shrinkage Reducing Agents*, V. Corinaldesi, A. Nardinocchi).

L'ipotesi avanzata inizialmente era che, aumentando il quantitativo di fibre da 100 a 150 kg/m<sup>3</sup>, l'effetto "contenitivo" delle fibre aumentasse, registrando una diminuzione ulteriore dell'espansione iniziale, come avvenuto per getti 3 e 4 (figura 24).

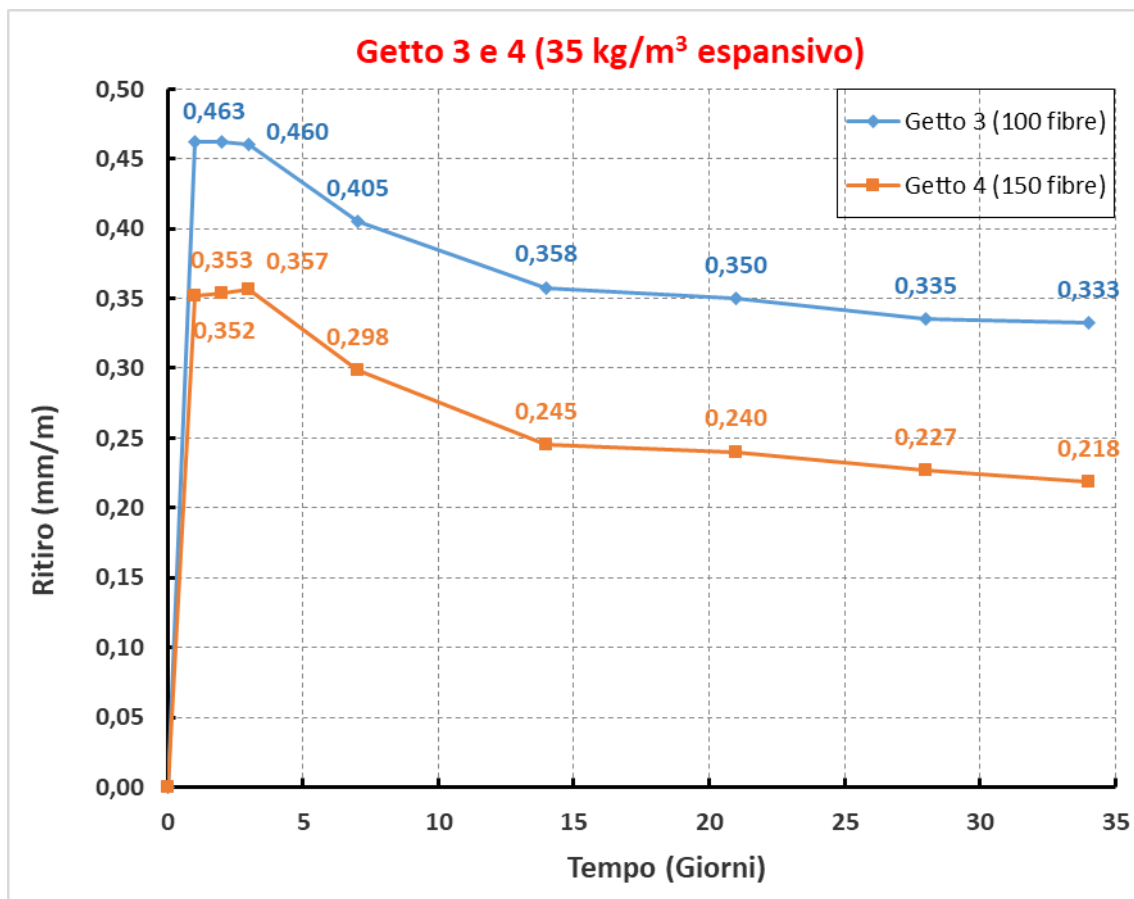
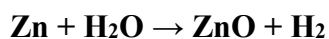


Figura 24. Monitoraggio ritiro su miscele 3 e 4.

Tuttavia in tutti gli altri casi, il comportamento riscontrato è stato l'esatto opposto. Come si può vedere nelle tabelle riportate in seguito, nelle altre combinazioni di miscele, i getti con 150 kg/m<sup>3</sup> hanno avuto un'espansione maggiore a breve termine rispetto ai corrispondenti getti a 100 kg/m<sup>3</sup> di fibre.

Tale comportamento è da attribuirsi alla reazione dello zinco, presente nel rivestimento in ottone delle fibre, con l'acqua interna all'impasto. Questa reazione, riportata di seguito, vede la formazione di ossido di zinco e di idrogeno gassoso, responsabile dell'incremento dell'espansione della matrice nei primi 3 giorni di maturazione.



Di seguito verrà analizzato come tale processo si ripercuote anche sulle prestazioni meccaniche del calcestruzzo.

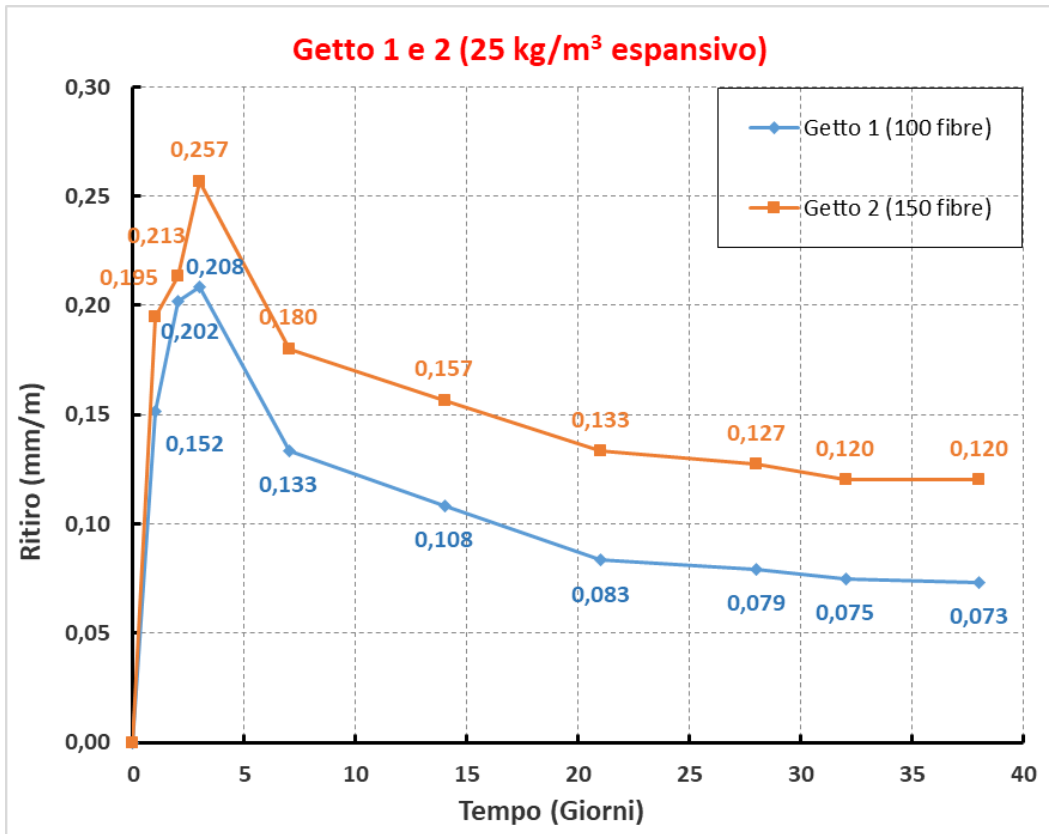


Figura 25. Monitoraggio ritiro su miscela 1 e 2.

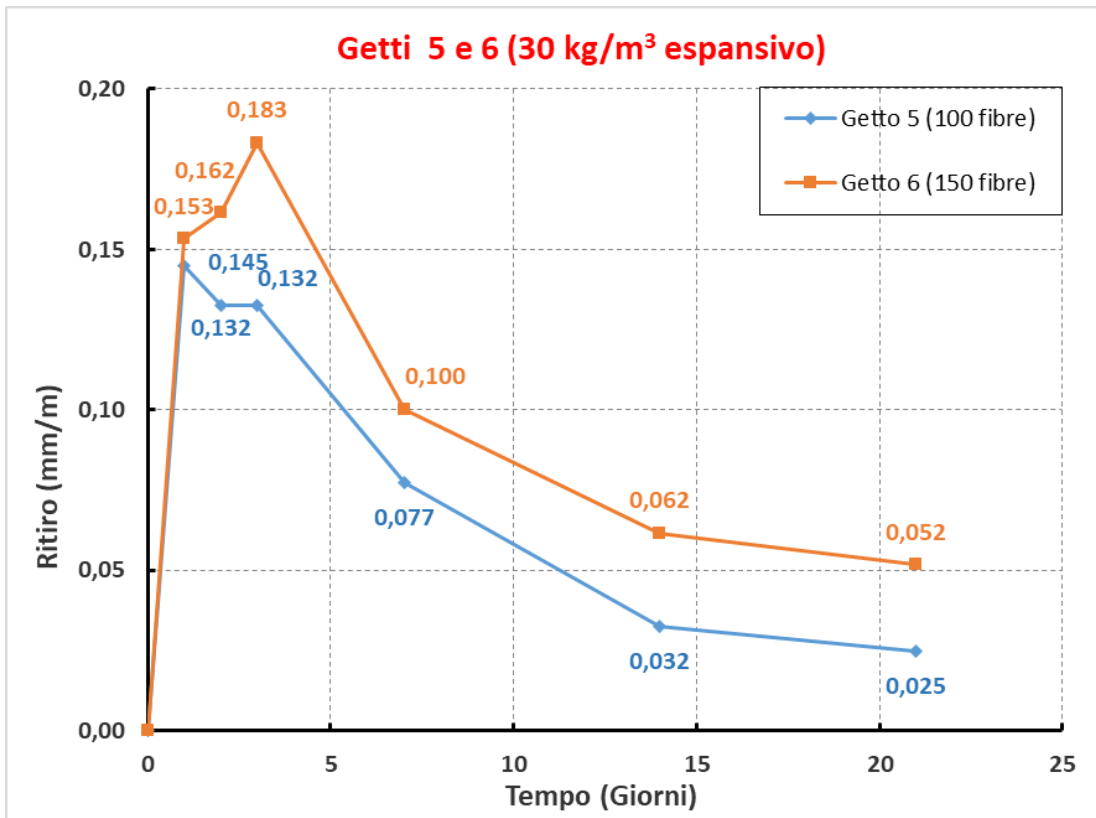


Figura 26. Monitoraggio ritiro su miscela 5 e 6.

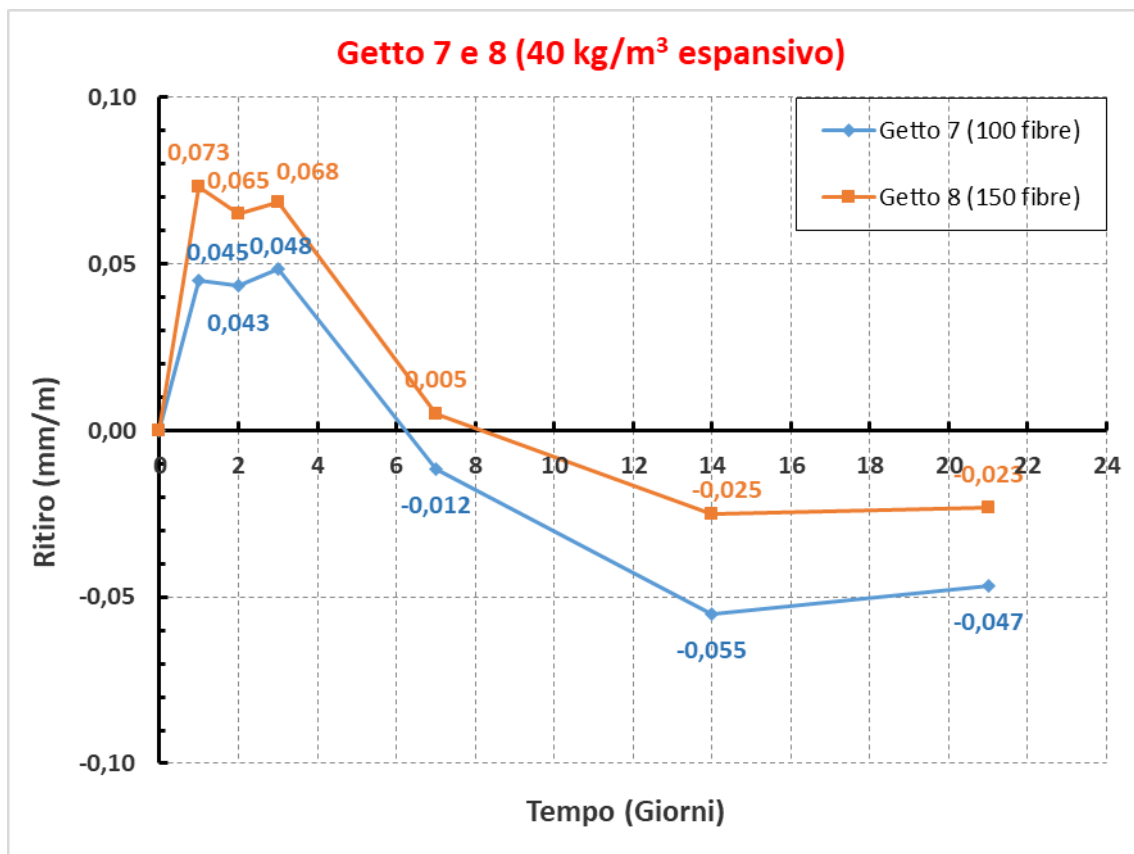


Figura 27. Monitoraggio ritiro su miscele 7 e 8.

Dopo 28 giorni, il calcestruzzo presenta solitamente prestazioni costanti. Non disponendo ancora di tutti le misure fino a tale periodo, dall'analisi dei dati finora disponibili si può affermare che i provini con una deformazione finale più prossima allo zero sono quelli con 30 kg/m<sup>3</sup> di espansivo e 100 kg/m<sup>3</sup> di fibre (getto 5).

### 5.3 Risultati prove a flessione

I risultati ottenuti con le prove di flessione, evidenziano un aumento della resistenza della matrice cementizia sia rispetto ad un normale calcestruzzo ma anche rispetto ad un HPC non fibro rinforzato. Tale fenomeno, in accordo con quanto presente in letteratura, è dovuto a due fattori: la presenza di espansivo unito all'SRA e la presenza di fibre nella matrice cementizia. La presenza dei due additivi fa sì che la matrice cementizia risulti molto meno porosa rispetto a un calcestruzzo ordinario, aumentando già di per sé le

prestazioni del materiale. Un ulteriore incremento della resistenza è dato dalle fibre, che garantiscono al materiale anche una buona resistenza post fessurativa, come si può vedere dal seguente grafico. In questo caso il contributo delle fibre ha garantito un effetto incrudente post-fessurativo, sviluppando quindi una resistenza post-elastica maggiore della tensione di snervamento.

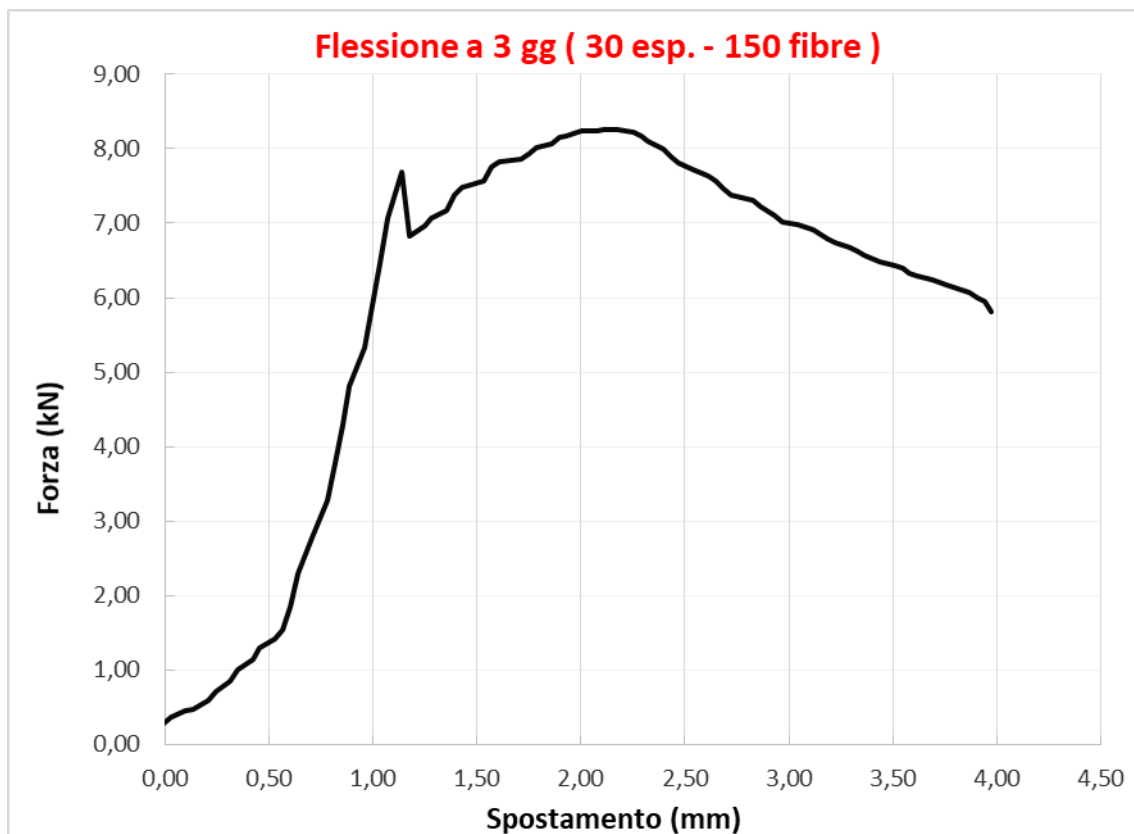


Figura 28. Prova a flessione a 3 giorni miscela 6.

In questo caso sono state usate fibre ottonate che, in presenza di un espansivo a base di ossido di calcio (CaO) e in ambiente alcalino, innescano un processo di dezincificazione. Tale reazione vede la scissione degli atomi di zinco presenti nella lega di ottone (formata da zinco e rame) e la formazione di idrossido di zinco  $[Zn(OH)_2]$ . Quest'ultimo, unito all'idrossido di calcio presente nella matrice cementizia, crea uno strato superficiale tra le parti che va ad aumentare la resistenza della zona di transizione fibre-pasta cementizia.





Questo processo, sviluppandosi alle brevi stagionature, crea uno stato di tensione interno del calcestruzzo, dato dal tentativo di espansione dell'impasto con l'effetto contenitivo delle fibre. Come si può vedere dai grafici, tale reazione conferisce al materiale una buona resistenza già alle brevi stagionature rispetto ad altri materiali cementizi. In particolar modo a 7 giorni si può notare l'effetto benefico della combinazione espansivo-fibre. In figura 30 è particolarmente evidente come, all'aumentare dell'espansivo, aumentino anche le prestazioni meccaniche. Tuttavia considerando anche i valori ottenuti con un contenuto di fibre di 100 kg/m<sup>3</sup> (figura 29), la miscela più vantaggiosa risulta essere quella con 30 kg/m<sup>3</sup> di espansivo. Tale impasto, infatti, presenta un netto miglioramento rispetto al caso precedente (25 kg/m<sup>3</sup> di espansivo) e consente di ottenere valori di poco minori rispetto ad un contenuto di espansivo di 35 o 40 kg/m<sup>3</sup>.



Figura 29. Risultati prove a flessione miscele 1, 3, 5, 7.



Figura 30. Risultati prove a flessione miscela 2, 4, 6, 8.

## 5.4 Risultati prove di compressione

I dati ricavati con le prove a compressione risultano in linea con quanto presente in letteratura e con quanto detto per la flessione. Il comportamento benefico dell'espansivo è meno accentuato rispetto quest'ultima, ma specialmente nei casi con un contenuto di fibre di 100 kg/m<sup>3</sup> (figura 32) si riscontra comunque un leggero aumento delle prestazioni all'aumentare del contenuto di espansivo, segno che lo stato di "stress interno" ha avuto anche in questi casi un effetto migliorativo.

Analogamente alla flessione inoltre, l'incremento del quantitativo di fibre nell'impasto ha portato in quasi tutti i casi ad un aumento della resistenza a rottura, seppur molto meno accentuato rispetto al caso della flessione. Questo comportamento è causato dal fatto che le fibre, lavorando meglio a trazione, riescono ad essere più collaborative ed efficaci nella flessione. Sotto l'azione di compressione, il contributo delle fibre è dato dal loro effetto confinante della matrice cementizia, analogo al lavoro delle staffe nei

calcestruzzi ordinari, il quale però è fortemente influenzato dal loro orientamento all'interno dei provini.

La resistenza a rottura ottenuta a 28 giorni è comunque di gran lunga superiore rispetto a quella di un calcestruzzo ordinario. A tale periodo è stato possibile analizzare solo i provini con le miscele corrispondenti a 25 e 35 kg/m<sup>3</sup> di espansivo, i quali riportano resistenze ultime dell'ordine di 240-250 kN, che corrispondono a circa 150 MPa.

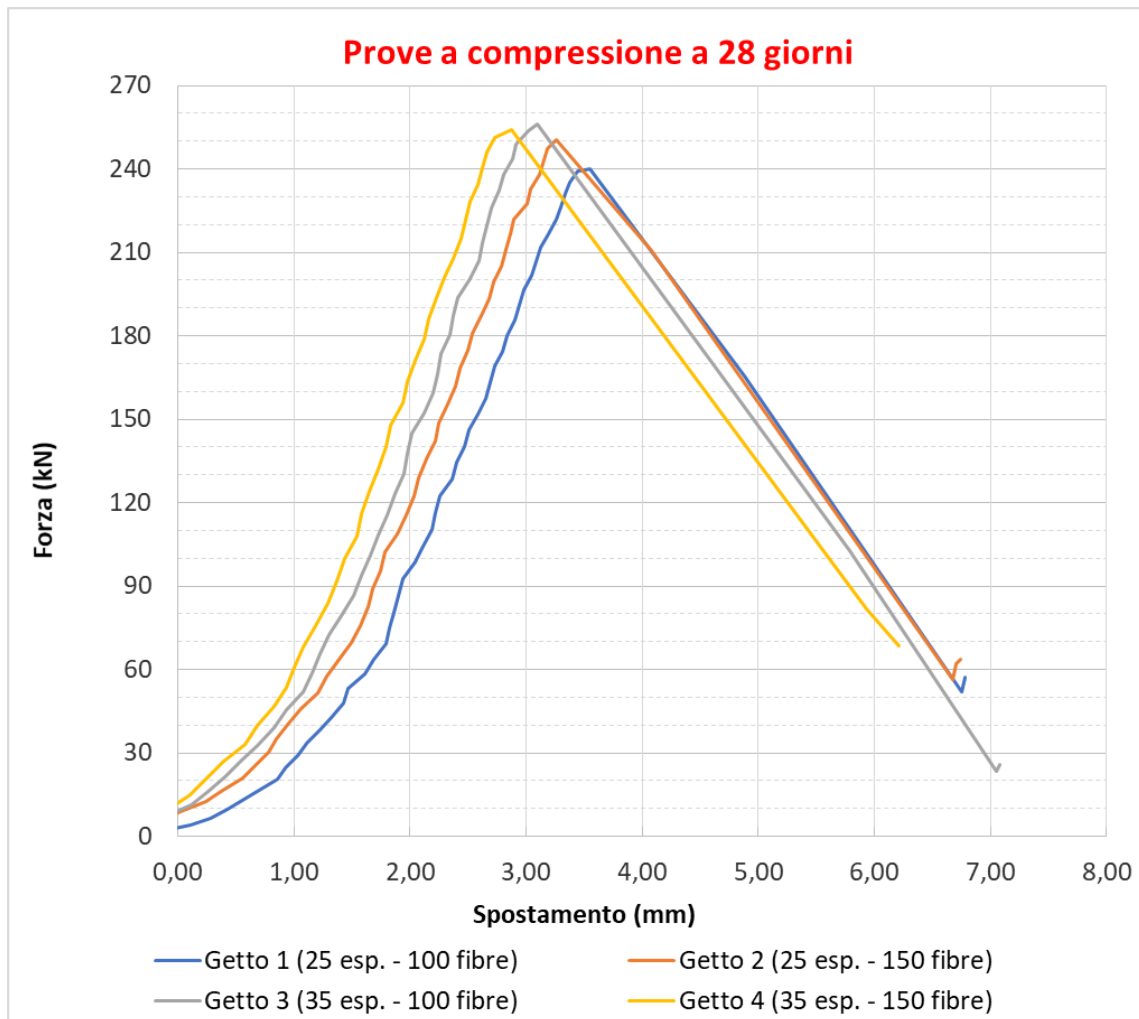


Figura 31. Risultati prove a compressione miscele 1, 2, 3, 4.

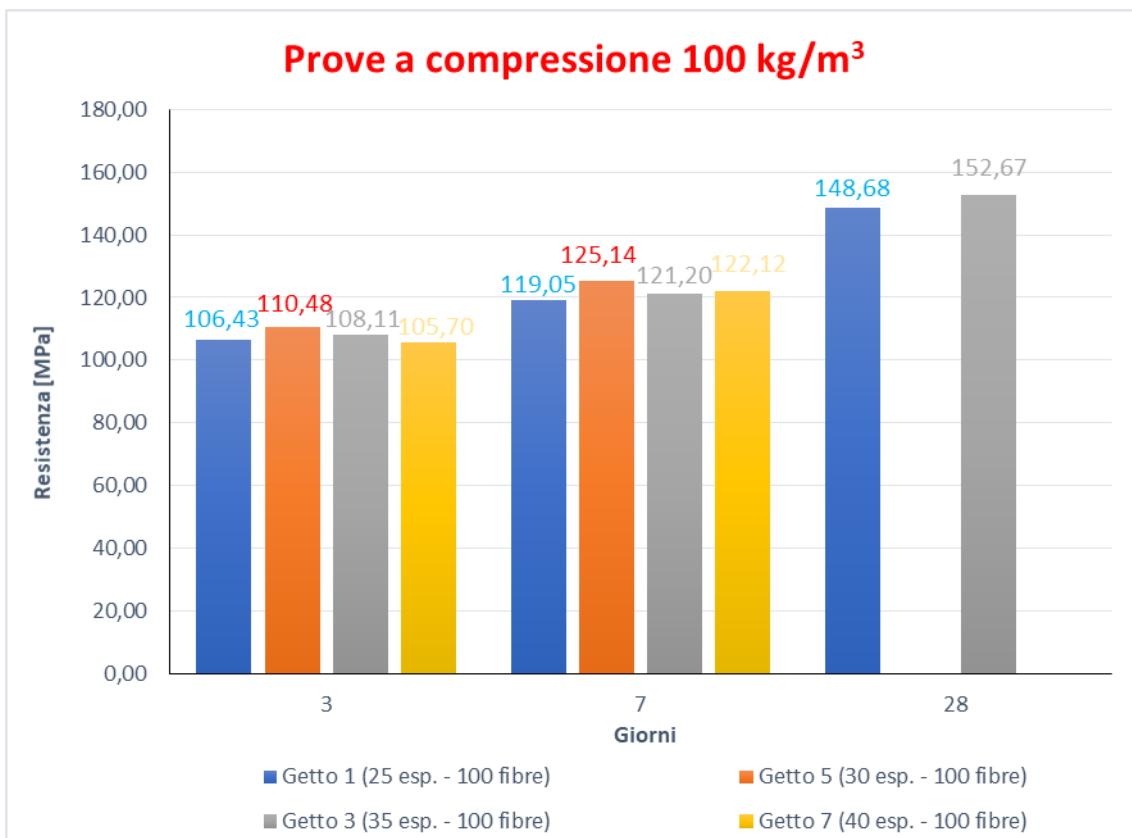


Figura 32. Risultati prove a compressione miscela 1, 3, 5, 7.

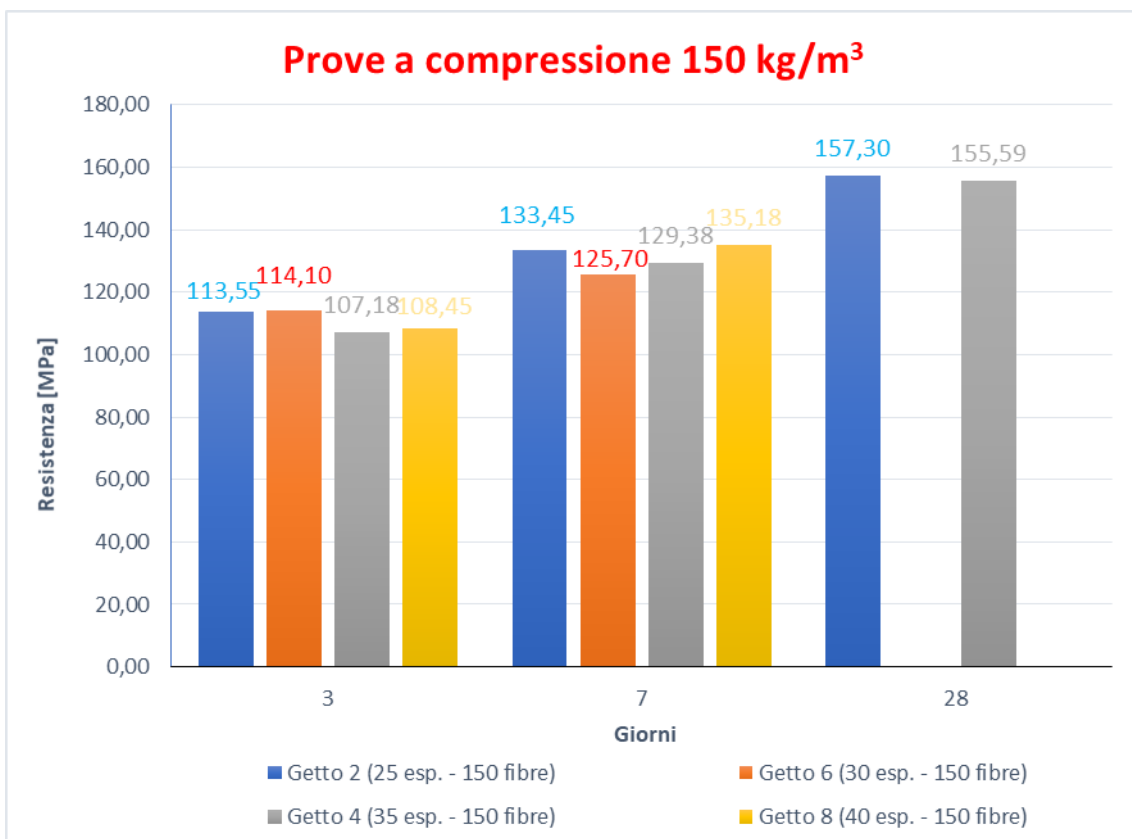


Figura 33. Risultati prove a compressione miscela 2, 4, 6, 8.

## 6. Conclusioni

L'obiettivo di questo studio è stato quello di valutare i comportamenti meccanici e deformativi di miscele Ultra High Performance Concrete con fibre in acciaio ottonate, alle diverse stagionature, variando le percentuali di fibre e additivi espansivi.

A tal fine sono stati quindi analizzati 8 differenti miscele, stagionate in condizioni umide per i provini destinati alle prove meccaniche (U.R.  $\geq 95\%$ ) e in condizioni insature quelli destinati alle prove di ritiro, i quali per rappresentare un comportamento più realistico della stagionatura in cantiere, sono stati mantenuti in condizioni di umidità  $\geq 95\%$  per i primi tre giorni e in condizioni standard per il resto del tempo (temp. =  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  e U.R.  $\approx 50\%$ ).

Dal punto di vista delle deformazioni si è riscontrato un aumento dell'espansione per i getti contenenti  $150 \text{ kg/m}^3$  di fibre, rapportati alle corrispondenti miscele con  $100 \text{ kg/m}^3$ . Tale comportamento è da imputare alle reazioni che avvengono tra lo strato di zinco a copertura delle fibre e l'acqua presente nell'impasto. Questo processo porta infatti alla formazione di molecole gassose di idrogeno che tendono ad aumentare l'espansione a breve termine (in particolare nei primi 3 giorni).

Malgrado l'aumento di deformazione, incrementare il quantitativo di espansivo nell'impasto si è riscontrato quasi sempre migliorativo, parimenti all'aumento di fibre. Anche se non si è indagato il comportamento post-fessurativo, l'aumento di fibre ha portato comunque ad un effetto benefico nei materiali, incrementando i valori a rottura, specialmente nelle prove a flessione. I dati sono tuttavia coerenti con quanto presente in letteratura, confermando che, sebbene l'aumento di fibre sia più preponderante nel tratto plastico, anche durante la fase elastica si ha un leggero aumento delle prestazioni.

Come già accennato, anche aumentare l'espansivo si è riscontrato vantaggioso nel caso delle resistenze a breve termine. Il beneficio maggiore, tuttavia, si è verificato passando da un quantitativo di  $25 \text{ kg/m}^3$  a  $30 \text{ kg/m}^3$ . Aumentare la percentuale fino a  $40 \text{ kg/m}^3$  porterebbe comunque ad un incremento di prestazioni, ma non tali da giustificare anche l'aumento di costo.

In conclusione l'utilizzo di espansivo a base di ossidi di calcio, unito all'SRA e a fibre ottonate, porta a dei calcestruzzi con buonissime prestazioni sia in termini di resistenze meccaniche, sia in termini di stabilità di deformazione. Facendo però un bilancio tra le prestazioni ottenute e la quantità di materiale utilizzato, il mix-design più vantaggioso è stato quello con  $30 \text{ kg/m}^3$  di espansivo e  $100 \text{ kg/m}^3$  di fibre.

## Riferimenti

CNR-DT204/2006, *“Istruzioni per la Progettazione, l’Esecuzione ed il Controllo di Strutture di Calcestruzzo Fibrorinforzato”*;

CNR-DT 209/2013, *“Studi preliminari finalizzati alla redazione di Istruzioni per l’impiego di calcestruzzi ad alte prestazioni”*;

*“I calcestruzzi ad altissima resistenza, proprietà e comportamento meccanico”*, Marotti de Sciarra Francesco, Enrico Russo;

*“Calcestruzzo, il materiale delle grandi opere”* Federbeton;

*“Calcestruzzi ad altissime prestazioni contenenti materie prime seconde (UHPFRC)”*, Vinciguerra Anna Lisa, Bignozzi Maria Chiara, Mazzotti Claudio;

*“Un ponte verso il 2000, La prima opera al mondo in Reactive Powder Concrete”*, Luigi Coppola;

*“L’influenza del rapporto acqua/cemento sull’adsorbimento dei superfluidificanti, sulla variazione potenziale zeta e sulla fluidità della pasta di cemento”*, S. Monosi, G. Moriconi e M. Pauri e M. Colleparidi;

*“The influence of polymerization of sulfonated naphtalene condensated and its interaction with cement concrete”*, M. Colleparidi, M. Corradi e M. Valente;

*“Impiego degli additivi per ridurre il ritiro igrometrico”*, (Cap.11), Enco, Engineering Concrete;

*“Use of expansive admixtures to minimize thermal shrinkage cracking”*, V. Alunno Rossetti, A. Ferraro, G.Ranzo, F. Zenone, S. Zampaletta

*“Dizionario enciclopedico del calcestruzzo”*, sezione 13, Enco, Engineering Concrete;

*“Il nuovo calcestruzzo”*, di Mario Colleparidi, Silvia Colleparidi, Roberto Troli

*“Influenza del volume di fibre sul comportamento post-fessurativo del calcestruzzo fibrorinforzato” di V. Corinaldesi e G. Moriconi, Enco journal numero 60;*

*“Influence of type of fibers on the properties of high performance cement-based composites” di Valeria Corinaldesi, Alessandro Nardinocchi;*

*UNI 6687:1973, “Determinazione del ritiro idraulico. Prova di laboratorio”;*

*UNI EN 1015-3:2007 “Determinazione della consistenza della malta fresca mediante tavola a scosse”;*

*UNI EN 1015-11:2019, “Metodi di prova per malte per opere murarie” - Parte 11: Determinazione della resistenza a flessione e a compressione della malta indurita;*

*“Combined effect of expansive, shrinkage reducing and hydrophobic admixtures for durable self compacting concrete”, V. Corinaldesi;*

*“Study of Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete with Expansive and Shrinkage Reducing Agents”, V. Corinaldesi, A. Nardinocchi;*

*“The influence of calcium oxide addition on properties of fiber reinforced cement-based composites” Valeria Corinaldesi, Jacopo Donnini, Alessandro Nardinocchi;*

*“The influence of expansive agent on the performance of fibre reinforced cement-based composites”, Valeria Corinaldesi, Alessandro Nardinocchi, Jacopo Donnini;*

*“Restrained Shrinkage Mechanism of Ultra High Performance Concrete” Jun-Yan Wang, Chen Bian, Ru-Cheng Xiao, and Biao Ma;*



## **Ringraziamenti**

In questo piccolo spazio vorrei ringraziare le persone che nel tempo mi hanno permesso di raggiungere questo traguardo.

Vorrei quindi ringraziare la professoressa Corinaldesi Valeria e il dottorando Generosi Nicola per avermi dato la possibilità di intraprendere questo studio e avermi accompagnato nell'interessante mondo della ricerca.

Un ringraziamento anche a Carlo, Marco e Valerio che hanno condiviso con me questi anni di studio rendendoli molto più divertenti e leggeri da affrontare.

Ringrazio anche tutti i miei amici, i quali con il loro tempo mi hanno permesso di distrarmi e di ricaricarmi durante i momenti passati fuori dallo studio.

Un particolare grazie va a mamma, che oltre a permettermi di studiare mi ha dato l'importante possibilità di fare le mie scelte rimanendo comunque al mio fianco.

Infine un ringraziamento speciale va a Giulia, che mi è sempre stata vicino quando ne avevo più bisogno, dandomi la forza di andare avanti quando le mie energie non bastavano.