



Università Politecnica delle Marche
Scuola di Dottorato di Ricerca in Scienze dell'Ingegneria
Corso di Dottorato in Ingegneria Industriale

Ottimizzazione e durabilità di miscele UHPC (Ultra High Performance Concrete)

Ph.D. Dissertation of:
Nicola Generosi

Supervisor:

Prof. Valeria Corinaldesi

Ph.D. Course coordinator:

Prof. Giovanni Di Nicola

XXV edition - new series



Università Politecnica delle Marche
Scuola di Dottorato di Ricerca in Scienze dell'Ingegneria
Corso di Dottorato in Ingegneria Industriale

Ottimizzazione e durabilità di miscele UHPC (Ultra High Performance Concrete)

Ph.D. Dissertation of:
Nicola Generosi

Supervisor:
Prof. Valeria Corinaldesi

Ph.D. Course coordinator:
Prof. Giovanni Di Nicola

XXV edition - new series

Università Politecnica delle Marche
Dipartimento di Scienze e Ingegneria della Materia, dell'Ambiente ed Urbanistica
Via Brecce Bianche — 60131 - Ancona, Italy

Abstract

The birth of Ultra High Performance Concrete (UHPC), is very recent and their first use dates back to the end of the 90s. This material was created to overcome the problems associated with the use of ordinary concretes, especially in terms of poor ductility and poor durability. The acronym UHPC defines a new class of concrete that can be described as a fiber-reinforced cement-based material which has not only an increased mechanical response to compression (with strengths systematically higher than 150 MPa) but also a good tensile strength (of the order of 15 MPa) and above all a remarkable ductility.

These characteristics derive from particular precautions adopted in the design phase of the cement mixture such as:

- reduced water/cement ratio thanks to the use of water-reducing superplasticizers;
- use of mineral additions, alone or in combination, with high pozzolanic activity and/or high specific surface area such as silica fume or blast furnace slag;
- use of aggregates of selected dimensions capable of ensuring high adhesion at the interface between the stone element and the cement matrix.

While the endurance of a UHPC is impressive compared to a traditional one, it is its durability that further exceeds expectations. The material, due to its improved composition, has a microstructure free of imperfections and impurities, capable of allowing a durability never seen before on ordinary cementitious materials, capable of drastically reducing the maintenance costs of the structures and mitigating the environmental impacts of the normal life cycle of an ordinary concrete product (from concrete production, to maintenance, to decommissioning).

UHPC is a material that has an expected life span of 100 years with exceptional strength, durability, flexibility and longevity.

The major applications of this material were initially intended for infrastructural engineering works particularly stressed by static and dynamic loads in service or by aggressive actions by a particularly hostile environment. However, there is a trend to use UHPC concrete also in less stressed architectural or civil engineering works to exploit the mechanical characteristics through a different design to produce more durable concretes as a result of the low water/cement ratio, and finally, to exploit the production speed both in the casting phase for the high workability of the mixtures, and in the execution phase for a very rapid development of the mechanical strength.

In the introduction, this study aims to define the state of the art regarding the technology that underlies the birth and development of the material, investigating its composition and the main characteristics of its components.

The results of various experimental campaigns undertaken over the three years of research concerning the characterization of the mechanical and durability properties that distinguish UHPC concretes are reported below.

The first study concerns the analysis of the results of mechanical characterization tests in compression, bending and traction performed on traditional UHPC mixes and others with reduced cement content, emphasizing the effectiveness of the steel fiber content on the performance of UHPC concretes.

The second study concerned the investigation of the chemical-physical characteristics of the material. While the strength of UHPC is impressive compared to ordinary concrete, it is its durability that further exceeds expectations. In this regard, the durability of the composite was first evaluated in terms of shrinkage and then in terms of resistance under extreme conditions such as, for example, exposure to chloride ions or freeze-thaw cycles. Finally, laboratory analyzes were performed to investigate the characteristics related to the microstructure of the material.

The third and last study instead focused on the mechanical analysis under static and cyclic conditions of UHPC specimens as a function of the percentage of fibrous reinforcement. Particular attention was paid to the post-cracking behavior of the analyzed specimens and to the progress of the damage state during the execution of mechanical tests.

Sommario

La nascita dei calcestruzzi ad elevatissime prestazioni, noto in inglese come UHPC (Ultra High Performance Concrete), è molto recente ed il loro primo impiego è da datarsi alla fine degli anni '90. Tale materiale nasce per ovviare alle problematiche connesse all'impiego dei calcestruzzi ordinari soprattutto in termini di scarsa duttilità e di pessima durabilità.

Con l'acronimo UHPC si definisce una nuova classe di calcestruzzo descrivibile come un materiale a base cementizia fibro-rinforzato che presenta non solo un'accresciuta risposta meccanica a compressione (con resistenze sistematicamente superiori ai 150 MPa) ma anche una buona resistenza a trazione (dell'ordine dei 15 MPa) e soprattutto una notevole duttilità. Tali caratteristiche derivano da particolari accortezze adottate in fase di progettazione della miscela cementizia quali :

- ridotto rapporto acqua/cemento possibile grazie all'impiego di additivi superfluidificanti riduttori di acqua;
- impiego di aggiunte minerali, da sole o in combinazione tra loro, ad alta attività pozzolanica e/o elevata area superficiale specifica come fumo di silice o loppa d'altoforno;
- utilizzo di inerti di dimensioni selezionate capaci di assicurare un'elevata adesione all'interfaccia tra elemento lapideo e matrice cementizia.

Sebbene la resistenza di un UHPC sia impressionante rispetto a un tradizionale, è la sua durabilità a superare ulteriormente le aspettative. Il materiale, causa la sua migliorata composizione, presenta una microstruttura priva di imperfezioni e impurità, in grado di consentire una durabilità mai riscontrata prima sui materiali cementizi ordinari, in grado di ridurre drasticamente i costi di manutenzione delle strutture e mitigando gli impatti ambientali propri del normale ciclo vitale di un manufatto in calcestruzzo ordinario (dalla produzione del calcestruzzo, alla manutenzione, alla dismissione).

L'UHPC è un materiale che ha una durata prevista di 100 anni con eccezionale resistenza, durata, flessibilità e longevità.

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

Nella parte introduttiva il presente studio punta a definire lo stato dell'arte in merito alla tecnologia che sottende la nascita e lo sviluppo del materiale, indagando la sua composizione e le principali caratteristiche dei suoi componenti.

Di seguito si riportano i risultati di diverse campagne sperimentali intraprese nell'arco dei tre anni di ricerca inerenti alla caratterizzazione delle proprietà meccaniche e di durabilità che contraddistinguono i calcestruzzi UHPC.

Il primo studio riguarda l'analisi dei risultati di prove di caratterizzazione meccanica a compressione, flessione e trazione eseguite su miscele UHPC tradizionali e altre aventi contenuto ridotto di cemento, sottolineando l'efficacia del contenuto del rinforzo fibroso metallico sulle prestazioni dei calcestruzzi UHPC.

Il secondo studio ha riguardato invece lo studio delle caratteristiche chimico-fisiche del materiale. Sebbene la resistenza di un UHPC sia impressionante rispetto ad un calcestruzzo ordinario, è la sua durabilità a superare ulteriormente le aspettative. A tal riguardo la durabilità del composito è stata valutata dapprima in termini di ritiro ed in seguito in termini di resistenza in condizioni estreme quali ad esempio l'esposizione agli ioni cloruro o a cicli di gelo-disgelo. Infine sono state eseguite analisi in laboratorio per indagare le caratteristiche legate alla microstruttura del materiale.

Il terzo ed ultimo studio invece è stato incentrato sull'analisi meccanica in regime statico e ciclico di provini UHPC in funzione della percentuale di rinforzo fibroso. Particolare attenzione è stata posta sul comportamento post-fessurativo dei provini analizzati e sull'avanzamento dello stato di danno durante l'esecuzione di test meccanici.

Indice

1. Introduzione	1
1.1 Sviluppo dei materiali UHPC.	1
1.1.1 Il calcestruzzo: cenni storici	1
1.1.2 Materiali cementizi innovativi	3
1.1.3 Definizione degli UHPC.	7
1.1.4 UHPC presenti in commercio.	7
1.1.5 Esempi di applicazione	10
1.2 Obiettivi ed organizzazione della tesi	15
2. Stato dell'arte	16
2.1 Principi generali degli UHPC	16
2.2 Microstruttura.	18
2.3 Componenti principali	21
2.3.1 Cemento.	21
2.3.2 Fumo di silice.	21
2.3.3 Supplementary cementitious materials (SCM)	22
2.3.3.1 Ground granulated blast-furnace slag (GBBS)	22
2.3.3.2 Cenere volante.	23
2.3.3.3 Rice Husk Ash.	24
2.3.3.4 Limestone powder.	25
2.3.3.5 Nanomateriali	25
2.3.4 Aggregati	26

2.3.5 Superfluidificanti	27
2.3.6 Fibre.	28
2.4 Preparazione della miscela	32
2.5 Metodo di stagionatura.	34

3. Proprietà degli UHPC 35

3.1 Proprietà meccaniche.	35
3.1.1 Comportamento a compressione.	35
3.1.2 Comportamento a trazione	37
3.2 Proprietà chimico - fisiche.	38
3.2.1 Ritiro	38
3.2.2 Durabilità	40

Attività Sperimentale

4. Caratterizzazione meccanica di miscele UHPC “eco-friendly” 41

4.1 UHPC eco-friendly	42
4.1.1 Materiali	42
4.1.2 Confezionamento dei provini	43
4.1.3 Risultati	45
4.1.3.1 Prove di compressione	45
4.1.3.2 Prove di flessione	46
4.2 Comportamento meccanico alle lunghe stagionature	48
4.2.1 Materiali e preparazione dei provini	48
4.2.2 Risultati.	49

4.3 Conclusioni.	53
5. Caratterizzazione meccanica: studio del comportamento a trazione	54
5.1 Materiali e composizione delle miscele	55
5.2 Preparazione dei provini.	57
5.3 Analisi della distribuzione delle fibre	57
5.4 Setup di prova.	60
5.4.1 Digital Image Correlation	60
5.5 Risultati delle prove di trazione	62
6. Durabilità delle miscele UHPC	65
6.1 Prove di ritiro igrometrico.	66
6.1.1 Materiali e preparazione dei provini	66
6.1.2 Discussione dei risultati.	68
6.2 Prove di caratterizzazione chimico-fisica.	71
6.2.1 Preparazione dei campioni.	71
6.2.2 Prove colorimetriche per la determinazione della penetrabilità dello ione cloruro	72
6.2.2.1 Discussione dei risultati	76
6.2.3 Analisi visiva al microscopio ottico	78
6.2.4 Analisi porosimetrica.	81
6.2.4.1 Discussione dei risultati	87
6.2.5 Prove di assorbimento.	89
6.2.6 Prove di resistenza ai cicli gelo-disgelo.	89

7. Studio del comportamento meccanico di miscele UHPC sottoposte a carichi statici e ciclici	92
7.1 Materiali e preparazione dei provini.	93
7.2 Setup di prova.	94
7.3 Risultati sperimentali	96
7.3.1 Prove statiche.	96
7.3.2 Prove cicliche	102
7.4 Discussione dei risultati.	106
8. Conclusioni	109
Bibliografia	112

Lista delle Figure

Figura 1 - Schematizzazione dei materiali cementizi innovativi	4
Figura 2 - Ponte pedonale di Sherbrooke, Canada	10
Figura 3 - Aeroporto di Haneda, Giappone	12
Figura 4 - Progetti con UHPC nel mondo	14
Figura 5 - Composizione tipica di un UHPC	17
Figura 6 - Idratazione schematica del C3S o C2S: subito dopo il mescolamento con acqua (A), inizio della presa (B) e durante l'indurimento (C)	19
Figura 7 - Immagini della zona di transizione nei calcestruzzi ordinari e negli UHPC ottenute con Microscopia Elettronica a Scansione (SEM) [33]	20
Figura 8 - Immagine SEM di una particella RHA	24
Figura 9 - Dimensione e area superficiale specifica delle particelle dei materiali costituenti materiali UHPC [45]	26
Figura 10 - Effetto del contenuto e della forma delle fibre di acciaio sulla lavorabilità di miscele UHPC	30
Figura 11 - (a) Comportamento di pullout della singola fibra; Schema del processo di pull-out di (b) fibre dritte e (c) uncinata.	31
Figura 12 - Legame costitutivo a compressione di un UHPC senza fibre (a) - fibro-rinforzato (b)	36
Figura 13 - Comportamento ideale di un UHPC sottoposto ad una prova di trazione diretta	37
Figura 14 - Curva di espansione-ritiro di un calcestruzzo a ritiro compensato con agente espansivo a base di ossido di calcio (CaO) con e senza SRA	39
Figura 15 - Prove di: (a) Flessione su tre punti, (b) compressione su provini 4x4x16 cm ³	44
Figura 16 - Resistenza media a compressione a 28 giorni di stagionatura umida	45
Figura 17 - Curve Resistenza a flessione - Spostamento a 28 giorni di stagionatura di: (a) miscele UHPC con dosaggio di cemento pari a 1000 kg; (b) miscele UHPC con dosaggio di cemento pari a 700 kg.	47
Figura 18 - Resistenza a compressione media dopo 28, 84, 140 e 196 giorni di stagionatura	49
Figura 19 - Resistenza a flessione-Spostamento dopo 28 e 84 giorni di stagionatura	51
Figura 20 - Resistenza a flessione-Spostamento dopo 140 e 196 giorni di stagionatura	52
Figura 21 - Fibre metalliche uncinata di lunghezza 30mm	56
Figura 22 - Provini UHPC ad "osso di cane"	57
Figura 23 - Setup di prova per i test di trazione uniassiale e area di acquisizione della DIC	60
Figura 24 - Superfici verniciate con una griglia virtuale sovrapposta necessaria per l'analisi DIC	61
Figura 25 - Curve Sforzo-Deformazione relative alle prove di trazione diretta eseguite sui provini ad osso di cane	63
Figura 26 - Mappa della deformazione frontale di campioni a forma di osso di cane in diversi passaggi della curva sforzo-deformazione: (a) UHPC_100, (b) UHPC_200.	64
Figura 27 - Free (Unrestrained) drying shrinkage - tempo di esposizione	68

Figura 28 - Rappresentazione schematica dell'influenza dell'SRA sul ritiro del calcestruzzo	69
Figura 29 - Resistenza a compressione - Tempo di stagionatura	70
Figura 30 - Resistenza a flessione - Tempo di stagionatura	70
Figura 31 - Cubetti spruzzati con la fluoresceina (a); reazione al sole della fluoresceina (b); reazione con nitrato d'argento (c)	73
Figura 32 - Fronte di avanzamento dello ione cloruro	74
Figura 33 - Provino suddiviso a scacchiera per la determinazione della profondità dello ione cloruro	74
Figura 34 - Spessore di calcestruzzo penetrato dal cloruro (x) in funzione del tempo (t) di esposizione alla soluzione acqua-cloruro	75
Figura 35 - Resistenza a compressione - tempo di stagionatura (Provini 10x10x10 cm ³)	77
Figura 36 - Analisi al microscopio ottico dei campioni UHPC prelevati a: (a) 1cm dalla faccia superiore, (b) 5cm dalla faccia superiore - 1 mese di stagionatura	78
Figura 37 - Analisi al microscopio ottico dei campioni UHPC prelevati a: (a) 1cm dalla faccia superiore, (b) 5cm dalla faccia superiore - 2 mesi di stagionatura.	80
Figura 38 - Analisi al microscopio ottico dei campioni UHPC prelevati a: (a) 1cm dalla faccia superiore, (b) 5cm dalla faccia superiore - 3 mesi di stagionatura.	80
Figura 39 - Comportamento di un solido nei confronti del mercurio.	81
Figura 40 - Prelievo campioni da sottoporre ad analisi porosimetrica	82
Figura 41 - Porosimetro ad intrusione di mercurio	83
Figura 42 - Volume (mm ³ /g) in funzione del diametro dei pori e della pressione applicata in MPa: campioni prelevati a: (a) 5cm dalla faccia superiore, (b) 1cm dalla faccia superiore - 1 mese di stagionatura	84
Figura 43 - Volume (mm ³ /g) in funzione del diametro dei pori e della pressione applicata in MPa: campioni prelevati a: (a) 5cm dalla faccia superiore, (b) 1cm dalla faccia superiore - 2 mesi di stagionatura	85
Figura 44 - Volume (mm ³ /g) in funzione del diametro dei pori e della pressione applicata in MPa: campioni prelevati a: (a) 5cm dalla faccia superiore, (b) 1cm dalla faccia superiore - 3 mesi di stagionatura	85
Figura 45 Risultati della porosimetria a intrusione di mercurio dopo 1,2 e 3 mesi di stagionatura	88
Figura 46 Setup di prova: (a) provini 30x70x280mm ³ ; (b) provini 70x70x280mm ³ ; (c) vista generale	95
Figura 47 - Prove a flessione su 4 punti: (a) 70 x 70 x 280 mm, (b) 30 x 70 x 280 mm	96
Figura 48 - Curve Resistenza a flessione - Spostamento (Prove statiche)	98
Figura 49 - Curva Resistenza - Spostamento con relative mappe di danno - Provino 30x70x280mm ³ - 1% Fibre Metalliche	100
Figura 50 - Curva Resistenza - Spostamento con relative mappe di danno - Provino 30x70x280mm ³ - 2.5% Fibre Metalliche	101
Figura 51 - Curve Resistenza a flessione - Spostamento (Prove cicliche)	103
Figura 52 - Curva Sforzo - Deformazione con relative mappe di danno - Provino 70x70x280mm ³ - 2.5% Fibre Metalliche	104
Figura 53 - Confronto curve Sforzo-Spostamento tra provini sottoposti a carico statico (tratteggiate) e carico ciclico (in grigio)	107
Figura 54 - Quadro fessurativo provini UHPC contenuto di fibre pari a: (a) 1%; (b) 2,5%	108

Lista delle Tabelle

Tabella 1 - Confronto in termini di composizione e di prestazioni dei calcestruzzi DSP e RPC 200	6
Tabella 2 - Proprietà meccaniche e tipica composizione del materiale RPC 200	6
Tabella 3 - Composizione della miscela DUCTAL [6]	8
Tabella 4 - Esempio di composizione di un calcestruzzo ordinario - UHPC	16
Tabella 5 - Principali proprietà delle fibre più comuni [33]	29
Tabella 6 - Differenti tipologie di fibre di acciaio	30
Tabella 7 - Composizione CEM I 52,5R utilizzato	42
Tabella 8 - Composizione miscele UHPC oggetto di studio	43
Tabella 9 - Composizione miscele oggetto di studio (kg/m ³)	48
Tabella 10 - Proporzioni miscele UHPC (kg/m ³)	56
Tabella 11 - Caratteristiche fibre metalliche uncinata utilizzate	56
Tabella 12 - Distribuzione delle fibre nelle sezioni trasversali dei provini a forma di osso di cane	59
Tabella 13 - Risultati sperimentale delle prove di trazione diretta sui provini ad ossi di cane	62
Tabella 14 - Composizione miscele per prove di ritiro	67
Tabella 15 - Composizione miscela oggetto di studio	71
Tabella 16 - Coefficienti di diffusione del cloruro ottenuti dai test colorimetrici eseguiti	76
Tabella 17 - Coefficienti di diffusione del cloruro (D) in calcestruzzi (a/c = 0,50) con diversi cementi	76
Tabella 18 - Risultati prove porosimetriche	88
Tabella 19 - Assorbimento d'acqua di EE_UHPC	89
Tabella 20 - Resistenza di EE_UHPC ai cicli gelo-disgelo	90
Tabella 21 - Composizione UHPC oggetto di studio	93
Tabella 22 - Risultati sperimentali delle prove quasi-statiche a flessione su 4 punti	97
Tabella 23 - Risultati sperimentali delle prove cicliche a flessione su 4 punti	102
Tabella 24 - Modulo elastico flessionale	105

Lista delle Abbreviazioni

UHPC	Ultra High Performance Concrete
CBC	Chemically Bonded Ceramics
MDF	Macro-Defect Free
DSP	Densified with Small Particle
HPC	High Performance Concrete
RPC	Reactive Powder Concrete
FHWA	Federal Highway Administration
AFGC	Association Francaise de Génie Civil
UHPCFRC	Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete
OPC	Ordinary Portland Concrete
FRC	Fiber Reinforced Concrete
SF	Fumo di Silice
OC	Calcestruzzo ordinario
C ₃ A	Alluminato tricalcico
SiO ₂	Silice
C _a O	Ossido di calcio
C-S-H	Silicato di calcio idrato
C ₃ S	Silicato tricalcico
C ₂ S	Silicato bicalcico
ITZ	Interfacial transition zone
SEM	Microscopia elettronica a scansione
SCM	Supplementary cementitious materials
FA	Fly Ash
GBBS	Granulated Blast Furnace Slag
RHA	Rice Husk Ash
LP	Limestone Powder
PNS	Poli-naftalin-solfonato
PMS	Poli-melammin-solfonato
PA	Poli-acrilati
PC	Poli-carbossilati
HSC	High Strength Concrete
HPC	High Performance Concrete
UR	Umidità relativa
SRA	Shrinkage reducing admixture
EA	Agente espansivo
DIC	Digital Image Correlation
NaCl	Cloruro di sodio
AgNO ₃	Nitrato di argento
Ca(OH) ₂	Idrossido di calcio
Ca[Zn(OH) ₃] ₂	Idrossizincato di calcio
Cu	Rame
Zn	Zinco
Zn(OH) ₂	Idrossido di zinco

1. Introduzione

1.1. Sviluppo dei materiali UHPC

1.1.1. Il calcestruzzo: cenni storici

Il calcestruzzo è un materiale conosciuto già dagli antichi romani. Il “Calcis structio” era la denominazione delle prime opere realizzate con una malta composta da calce, sabbie pozzolaniche, pietre e mattoni macinati e acqua. Esso nel corso dei secoli è stato sottoposto a svariate modifiche fino a divenire l’odierno calcestruzzo. Di particolare importanza fu la svolta che portò tra la fine del Diciottesimo e l’inizio del Diciannovesimo secolo alla messa a punto dei primi procedimenti per ricreare artificialmente il comportamento dei leganti naturali (calce e pozzolana). Nel calcestruzzo antico, il legante era costituito da calce e pozzolana o da calce idraulica avente proprietà peculiari simili a quelle del cemento grazie ad alcune impurità (silice e allumina). Nel calcestruzzo moderno, invece, il legante è sostituito dal cemento portland o da miscele di questo con scorie d’altoforno e pozzolana.

Alla fine del Diciannovesimo secolo si assiste alla scoperta del calcestruzzo armato grazie ai brevetti di Joseph Monier che prevedevano l’utilizzo di un’armatura metallica per rafforzare diverse strutture, tra cui manufatti in cemento.

L’affermazione del calcestruzzo come materiale da costruzione nel nostro paese risale alla ricostruzione successiva al devastante sisma che colpì Messina ed altre aree nel primo decennio del 1900. La necessità di fornire risposte immediate e di sicura solidità determinerà, per la prima volta, l’utilizzo su larga scala della tecnica costruttiva del calcestruzzo armato.

Ad oggi è il materiale principale per la realizzazione di numerose tipologie architettoniche e strutturali. Tale materiale rappresenta la soluzione ideale per progettisti, ingegneri e architetti per la realizzazione di una vasta gamma di manufatti destinati a durare nel tempo e resistente alle avversità naturali. Si stima che il consumo di calcestruzzo sia di circa 12 miliardi di tonnellate all’anno in tutto il mondo. Dopo l’acqua, esso è il materiale più utilizzato al mondo. Purtroppo però, a più di cent’anni dalla sua invenzione, accanto ai molteplici vantaggi correlati a tale materiale, quali il costo ridotto dei componenti, la facilità di esecuzione e la versatilità di utilizzo, riscontriamo importanti svantaggi relativi alla sostenibilità ambientale. L’industria cementifera mondiale è la responsabile da sola di circa il 5% delle emissioni totali di CO₂ mondiali. Allo stesso tempo, la quantità di energia necessaria alla produzione di questo materiale è davvero molto elevata. Per il settore stesso i costi energetici sono altamente incidenti, rappresentando più delle metà dei costi di produzione. A questo si sommano le grandi quantità di acqua necessaria per la produzione, nonché la sua scarsa riciclabilità. Questi fattori fanno spesso preferire all’utilizzo del calcestruzzo quello dell’acciaio, materiale maggiormente eco-compatibile, in quanto facilmente riciclabile e dal miglior comportamento strutturale, soprattutto in campo sismico.

Un’altra problematica di notevole importanza per le strutture in c.a. è quella della durabilità. La durabilità delle strutture in calcestruzzo armato, visti i noti eventi recenti, tra i quali il

crollò del ponte Morandi, è diventata uno degli argomenti di discussione di carattere nazionale. Diverse indagini condotte negli ultimi tempi su strutture in c.a. realizzate in Italia ha evidenziato che almeno la metà di queste ultime presenta condizioni di degrado avanzato. Le cause sono molteplici: dall'errata posa in opera, all'insufficiente copriferro così come la mancanza di manutenzione. Da ciò si evince che la durabilità di un manufatto in calcestruzzo armato dipende da numerose variabili: la qualità dei materiali utilizzati, i controlli in fase di esecuzione, l'ambiente in cui è inserita la struttura, il monitoraggio con conseguente continua e costante manutenzione.

Al fine di limitare le suddette problematiche e sotto la spinta di sempre più crescenti questioni di carattere ambientale, a partire dagli anni 90', si è assistito ad un notevole progresso nel settore della ricerca nell'ambito dei calcestruzzi. Grazie allo sviluppo della chimica minerale e organica e al miglioramento delle tecniche di produzione, negli ultimi anni sono stati sviluppati moltissimi calcestruzzi innovativi atti a rispondere alle più svariate domande di mercato. Il calcestruzzo "smart" è solitamente progettato per soddisfare esigenze specifiche adattando le proprietà per migliorare la sicurezza, la longevità e la funzionalità delle strutture, riducendone i costi, il consumo di risorse e l'inquinamento ambientale.

1.1.2. Materiali cementizi innovativi

Sulla base delle ricerche intraprese negli ultimi decenni dello scorso secolo nel settore degli additivi e di aggiunte minerali e non, accanto allo studio attento dei processi di stagionatura e del mix-design, si è configurata una vasta categoria di nuovi materiali cementizi identificati con diverse sigle. Sebbene ciascuno di questi materiali sia stato sviluppato autonomamente da vari ricercatori il principio generale che li accomuna tutti è quello di ridurre la presenza di pori o difetti nella microstruttura del materiale. In secondo luogo, questi nuovi materiali sono basati sull'utilizzo della reazione chimica dell'acqua con il cemento, con la formazione di prodotti di idratazione.

Il termine più generale per definire questi materiali cementizi, coniato da Roy [1], è "Chemically Bonded Ceramics" (CBC). Tale termine sta a sottolineare da una parte il carattere prevalentemente ceramico del materiale (inorganico non metallico) e dall'altra, l'aspetto chimico del legame che si sviluppa a seguito della reazione tra acqua e i prodotti di idratazione del cemento, così come avviene nei materiali cementizi ordinari. I materiali CBC includono varie tipologie di prodotti, tutti caratterizzati da super-prestazioni meccaniche correlate all'assenza o bassissima presenza di difetti o pori nella microstruttura. Essi possono essere sostanzialmente raggruppati in due grandi categorie (Fig. 1):

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

All'inizio degli anni '80 fu inventato il cemento senza micro-difetti (MDF) [2]. L'approccio MDF utilizzava polimeri completamente idrosolubili (polivinilcol, poliammide, idrossimetilcellulosa) per modificare la reologia dell'impasto cementizio in una sorta di materiale gommoso in modo da consentirne la formatura per estrusione o calandratura tra rulli. Tuttavia, la costosa materia prima, il complicato processo di preparazione e la fragilità ne avevano limitato le applicazioni.

Nel medesimo periodo si assiste anche alla nascita dei cosiddetti calcestruzzi DSP (*Densified with Small Particle*). Il primo contributo allo sviluppo dei materiali DSP è dovuto a Bache [3] che nel 1981 pubblicò gli eccellenti risultati conseguibili attraverso l'impiego del binomio fumo di silice-superfluidificante. I Fumi di Silice (Silica Fume) vengono impiegati per aumentare la densità del calcestruzzo in quanto le sferette di silice, ottenute come sottoprodotto del processo di fusione per la produzione di silicio metallico e leghe di ferro-silicio, tendono a disporsi nei vuoti interstiziali tra i granuli di cemento. Tale addensamento conferisce una maggiore resistenza meccanica rispetto ai calcestruzzi ordinari e una migliore resistenza agli agenti corrosivi, ma allo stesso tempo comporta un notevole aumento dell'acqua necessaria al confezionamento del conglomerato. Tale inconveniente viene aggirato grazie all'utilizzo dei superfluidificanti che favoriscono un basso rapporto a/c in favore di un migliore comportamento micro-strutturale.

La pasta cementizia che avvolge gli elementi lapidei – e che nei calcestruzzi ordinari rappresenta l'anello debole della miscela per la sua maggiore porosità - diviene meccanicamente più resistente dei comuni aggregati. Per sfruttare al meglio le caratteristiche

dovute alla densificazione del materiale diviene necessario utilizzare aggregati densi e compatti in grado di stabilire un miglior legame con la pasta cementizia.

“L’utilizzo congiunto di fumo di silice e superfluidificante ad alto dosaggio (2-4% sul cemento) consente di ottenere prestazioni ancora superiori se si sostituisce il comune aggregato calcareo con rocce di migliori prestazioni meccaniche e soprattutto con caratteristiche superficiali tali da migliorare il legame all’interfaccia aggregato-matrice cementizia” (Collepari, 2003).

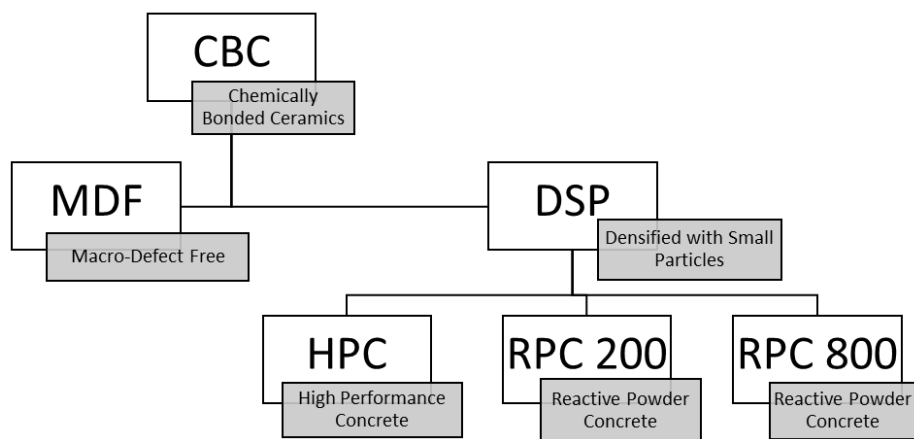


Figura 1 - Schematizzazione dei materiali cementizi innovativi

Accanto alle straordinarie prestazioni meccaniche e di resistenza alle aggressioni ambientali, i materiali DSP presentano alcuni limiti nel comportamento deformativo, dovuti per lo più alla natura estremamente fragile del materiale e “*strettamente connessi con la microstruttura densa del materiale DSP e non con la composizione chimica del composito*” (Collepari, 2003).

Per ovviare a tali limiti, all’inizio degli anni ’90, si è assistito alla nascita dei cosiddetti RPC (*Reactive Powder Concrete*). Gli studi effettuati in Francia da Richard e Cheryrezy [4] mostrano lo sviluppo di materiali con i quali è possibile raggiungere, anche in tempi molto brevi, il traguardo dei 200 Mpa per la resistenza meccanica a compressione migliorando radicalmente la resistenza flessionale e soprattutto la duttilità del materiale. Nella Tabella 1 sono sinteticamente riassunte le principali modifiche dell’RPC rispetto al calcestruzzo DSP in termini di ingredienti, di composizione e di prestazioni [5].

Rispetto alla microstruttura tipicamente porosa di una comune pasta di cemento, la matrice cementizia del materiale RPC 200 si presenta molto più densa e quasi completamente priva

di porosità capillare. Dal punto di vista meccanico, questi materiali sono in grado di raggiungere con stagionature normali (20°C), valori di 190 MPa di resistenza a compressione a 28 giorni. Aumentando la temperatura di stagionatura fino a 160°C, il materiale si porta immediatamente al di sopra del valore di 200 MPa alla fine del trattamento termico, senza subire ulteriori e significative variazioni alle stagionature successive. Una tipica composizione e caratterizzazione meccanica di materiale RPC è mostrata in Tabella 2. Ma l'aspetto sicuramente più caratterizzante dei calcestruzzi RPC rispetto ad un calcestruzzo DSP non è tanto la maggiore resistenza meccanica a compressione, quanto piuttosto la maggiore duttilità del materiale sollecitato a trazione o flessione.

Sulla scia degli studi effettuati soprattutto in suolo francese, negli anni sono state sviluppate e brevettate varie tipologie di RPC che sono stati contraddistinti con svariate sigle: HSC, HPC, FRC, UHPC, UHPFRC.

Tabella 1 - Confronto in termini di composizione e di prestazioni dei calcestruzzi DSP e RPC 200

DSP	RPC 200
- superfluidificante tradizionale	- superfluidificante acrilico - cemento a basso tenore di C ₃ A
- fumo di silice	- fumo di silice selezionato (senza incombusti) - micro-fibre metalliche - assenza di aggregati grossolani
- stagionatura normale (20°C)	- stagionatura normale (20°C) e/o accelerata (90-160°C)
- alta resistenza a compressione (150MPa)	- alta resistenza a compressione (200 MPa) - alta resistenza a flessione (50 MPa)
- comportamento fragile	- comportamento duttile

Tabella 2 - Proprietà meccaniche e tipica composizione del materiale RPC 200

Componenti (kg/m³)	RPC 200
Cemento tipo V ASTM	955
Sabbia fine (150-600 µm)	1050
Fumo di silice	230
Superfluidificante acrilico	15
Micro-fibre in acciaio	180
Acqua	170
Trattamento termico	20°C - 160°C
Resistenza a compressione (MPa)	170 - 230
Resistenza a flessione (MPa)	25 - 60

1.1.3. Definizione degli UHPC

Con l'acronimo UHPC (*Ultra High Performance Concrete*) si definisce una nuova classe di calcestruzzo che è stata sviluppata negli ultimi decenni e presenta eccezionali proprietà di resistenza e durabilità. Si ha notizia che l'UHPC sia stato utilizzato per la prima volta dal Corpo degli ingegneri dell'esercito degli Stati Uniti alla fine degli anni '80 e che, grazie alle ricerche della Federal Highway Administration (FHWA), già negli anni duemila era ampiamente utilizzato nell'ambito delle infrastrutture autostradali.

In letteratura non esiste una definizione univoca del materiale UHPC. Molti ricercatori in tutto il mondo hanno sviluppato calcestruzzi che potrebbero essere classificati come UHPC. L'Association Francaise de Génie Civil (AFGC) ha definito UHPC, o il suo sinonimo UHPFRC (*Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete*), come un materiale a matrice cementizia avente resistenza a compressione maggiore di 150 MPa e contenente fibre di acciaio, le quali sono in grado di garantire un comportamento duttile del composito. In generale, gli UHPC differiscono dalla prima generazione di calcestruzzi ad alte prestazioni RPC per [6]:

- Resistenza a compressione sistematicamente maggiore di 150 MPa;
- Utilizzo di un alto contenuto di cemento e componenti di granulometrie appositamente selezionate;
- Minimo contenuto di acqua;
- Uso di fibre metalliche per migliorare il comportamento post-fessurativo del materiale.

Il composito così definito è un materiale avente straordinarie proprietà meccaniche e allo stesso tempo in grado di ovviare alle problematiche dei calcestruzzi ordinari quali la durabilità e la fragilità in campo post-fessurativo.

1.1.4. UHPC presenti in commercio

All'interno del mercato italiano gli UHPC sono ancora scarsamente presenti, soprattutto a causa dell'attuale prescrizione normativa che penalizza l'uso di calcestruzzi con resistenza a compressione superiore ai 55 MPa. Le norme tecniche considerano calcestruzzi ordinari quelli fino alla classe C90/105, ma per quelli con resistenza superiore a C45/55 tutte le prestazioni devono essere verificate in fase di prequalifica e devono essere definite delle procedure speciali di controllo, e per i C70/85 ci sono delle prescrizioni ulteriori sui controlli.

In ambito internazionale invece i primi UHPC sono stati commercializzati a partire dalla fine degli '90. Due grandi gruppi francesi, Eiffage Group e Bouygues Construction, con l'aiuto di Sika Corporation e Lafarge Corporation, hanno sviluppato due diversi UHPC aventi proprietà simili. Il gruppo Eiffage con Sika Corporation ha creato BSI-Ceracem (BSI®) e la partnership tra la costruzione di Bouygues e Lafarge Corporation ha prodotto Ductal®. Quest'ultimo si è posto da subito all'avanguardia nel settore, grazie al bassissimo rapporto

a/c e del ridotto coefficiente di creep. La composizione della miscela Ductal® è riportata in Tabella 3.

Tabella 3 - Composizione della miscela DUCTAL [6]

Componente	Dosaggio (kg/m ³)	Percentuale sul peso
Cemento Portland	712	28.5
Sabbia fine	1020	40.8
Quarzo	211	8.4
Fumo di silice	231	9.3
Superfluidificante	30.7	1.2
Fibre metalliche	156	6.2
Acqua	109	4.4
Acceleratore di presa	30.0	1.2

Dal brevetto iniziale Ductal® sono state poi sviluppate diverse nuove miscele UHPC [7]. Negli anni 2000 la cementeria Vicat con il supporto del gruppo Vinci ha sviluppato il BCV® (Beton Composite Vicat) [8]. Il prodotto BCV® è stato ottenuto ottimizzando diversi parametri:

- basso rapporto acqua/cemento pari a 0,25;
- alto contenuto di superfluidificante;
- granulometria degli inerti ottimizzata ($d_{max} = 2-3$ mm).

Grazie alla sua matrice molto compatta, tale materiale gode di un'elevata impermeabilità, proprietà antigelo e buona resistenza agli ioni cloruro.

Il gruppo Buzzi Unicem-Dyckerhoff ha sviluppato due miscele. La prima, Flowstone®, è un legante cementizio ad alte prestazioni che è stato scientificamente sviluppato a partire da cemento di prima qualità. Attraverso l'ottimizzazione della distribuzione granulometrica (granulometria $\leq 0,5$ mm) e l'uso di additivi ad alte prestazioni, si ottengono malte e calcestruzzi con qualità e proprietà eccezionali. La seconda miscela, Nanodur®, è un UHPC esente da silice, la cui composizione ha permesso la realizzazione di elementi portanti ultrasottili. Nel 2011 sono state realizzate le prime scale in calcestruzzo ad altissime prestazioni con Nanodur®. Questa innovativa tecnologia UHPC ha permesso di ridurre lo spessore dei gradini e del pianerottolo a uno scarso 29 mm e di rinforzarlo con solo un 1,1% di volume di microfibra. In termini di proprietà meccaniche, il calcestruzzo ha una resistenza a compressione di circa 150 MPa e una resistenza a flessione di circa 20 MPa [9]. La prima applicazione in Italia del materiale UHPC nel settore dell'arredo urbano (una lastra circolare con sopra un profilo umano, tre volte in altorilievo e una panca di una struttura scultorea) è stata realizzata nella città di Torino per il Parco Peccei [10]. L'uso di questi due prodotti speciali, Nanodur® e Flowstone®, è stato determinante per garantire il successo del progetto.

La prima azienda spagnola a produrre nuovi manufatti in calcestruzzo UHPC per il settore dell'architettura è Escofet. La sua formula Slimconcrete® sta dando vita a straordinarie innovazioni in complicità con i principali architetti e designer. Slimconcrete® è un altro caso di ricerca e trasferimento tecnologico, con la collaborazione tra aziende, centri di ricerca e strutture universitarie. La sua formulazione, che incorpora in massa fibre di vetro inorganiche, permette la produzione di elementi molto resistenti e leggeri.

Oggi molti UHPC si possono trovare anche nel mercato italiano. Un esempio è Effix Design® di Italcementi-Ciments Calcia. Si tratta di una malta con elevate prestazioni meccaniche ed estetiche paragonabili all'UHPC, comprensiva di additivi in fibra di vetro resistenti agli alcali [11]. La filosofia di base è la facilità d'uso: viene commercializzato come premiscelato secco con additivi e inerti, che richiede solo l'aggiunta di acqua. Il suo sviluppo sul mercato ha riguardato i prototipi di produzione in lotti personalizzati per l'arredo urbano.

Tra i prodotti lanciati di recente, c'è HERACLEX®, brevettato dallo spin-off italiano INNOVAcete dell'Università Politecnica delle Marche. È progettato per ottenere bassi costi di produzione e trasporto, con una maggiore performance di sostenibilità ecologica degli aggregati, conforme sia alla filiera cosiddetta “casting” che alla fornitura di stampa 3D. Nei materiali cementizi preparati con la tecnologia HERACLEX®, la matrice cementizia, attivata chimicamente, tende ad espandersi e la sua espansione è trattenuta dalle fibre di rinforzo. Questa interazione produce un'azione reciproca tra fibra e matrice (auto-precompressione), che consente di ottenere maggiori resistenze a trazione e flessione.

1.1.5. Esempi di applicazione

A partire dagli ultimi anni del secolo scorso, iniziano già a diffondersi le prime applicazioni di UHPC nel settore dell'ingegneria civile volte a sfruttare le incredibili proprietà meccaniche e di durabilità di cui gode il materiale. In accordo con Blais et al. [12], il primo utilizzo è stato quello per il ponte pedonale di Sherbrooke, Canada, nel 1997.

Trattasi di una passerella con una campata di 60mt sul Magog River nel Quebec, avente struttura portante realizzata con una trave reticolare, tipologia solitamente usata per le strutture in acciaio al fine di garantire un'elevata inerzia della sezione riducendo al contempo i carichi permanenti. La soletta presenta uno spessore di soli 3cm per una larghezza di 3,30mt.



Figura 2 - Ponte pedonale di Sherbrooke, Canada

A seguito di questa prima realizzazione, gli UHPC hanno attirato l'attenzione di ricercatori, ingegneri e molti dipartimenti governativi in tutto il mondo. Le principali applicazioni di UHPC riguardano ponti, rinforzo strutturale e retrofitting di edifici esistenti e alcune applicazioni speciali. Alcuni esempi specifici verranno forniti nei paragrafi seguenti (vedi Figura 4).

Le proprietà meccaniche e di durabilità avanzate dell'UHPC consentono di riconsiderare i metodi di progettazione convenzionali per molti componenti di ponti comuni. La prima passerella completamente UHPC al mondo di 120 metri è stata costruita a Seoul, in Corea del Sud nel 2002 [13]. La realizzazione della struttura della passerella del ponte Peace Footbridge ha richiesto solo circa la metà della quantità di materiale che sarebbe stato

utilizzato nella costruzione tradizionale in cemento armato, fornendo proprietà di resistenza equivalenti [14].

I primi ponti stradali ad essere costruiti utilizzando la tecnologia UHPC fanno la loro presenza nel 2005. Quattro ponti sono stati costruiti nello stesso periodo: Shepherd's Gully Creek in Australia [15], il ponte Bourd-les-Valence in Francia (Figura 4) [16], Mars Hill Bridge a Wapello Country Iowa, USA (Figura 4) [17] e Horikoshi C-camp bridge in Giappone. Secondo il rapporto della Federal Highway Administration (FHWA) degli Stati Uniti pubblicato nel 2013, negli Stati Uniti e in Canada sono stati costruiti un totale di 55 ponti mediante tecnologia UHPC. Inoltre sono stati realizzati circa 22 ponti UHPC in Europa e 27 in Asia e Australia [18]. Recentemente è da evidenziare l'esecuzione del ponte pedonale nell'Università Nazionale della Colombia a Manizales (Colombia), che collega diverse aree educative all'interno dell'istituto. È composto da 14 segmenti prefabbricati in UHPC uniti da tre cavi post-tesi. Il progetto iniziale prevedeva l'utilizzo di una struttura metallica ma la scelta di optare per questo materiale ha rappresentato un risparmio del 33% sul costo totale dell'opera [19]. Negli ultimi anni, quattro moderne costruzioni di ponti in UHPC sono state progettate e costruite con successo in Repubblica Ceca [20]. Allo stesso tempo, in Belgio sono state condotte campagne di ricerca sulla progettazione di un mix di UHPC rinforzato con fibre utilizzando materiali locali. Ciò ha portato alla progettazione e costruzione del primo ponte pedonale/ciclabile prefabbricato belga in UHPC [21].

Finora gli UHPC sono stati impiegati per applicazioni strutturali principalmente nel campo di ponti e di passerelle, in edifici industriali o in elementi di ancoraggio. Oltre a queste tipologie di applicazione gli UHPC sono stati selezionati per la produzione di strutture snelle, leggere, resistenti ed estetiche. Uno degli edifici più recenti in cui è stato utilizzato tale materiale è la Fondation Louis Vuitton pour la Creation a Parigi (Figura 4) [22]. Il progetto si caratterizza per l'elevata complessità geometrica. Il rivestimento è creato da 19.000 pannelli prefabbricati in Ductal® bianco da Lafarge. Ogni pannello è diverso dall'altro, modellato singolarmente e installato tramite un giunto di testa.

Una delle sue applicazioni architettoniche più affascinanti è quella dei pannelli di facciata del Museo delle civiltà dell'Europa e del Mediterraneo (detto MUCEM) di Marsiglia [23]. L'architetto Rudy Ricciotti ha scelto di realizzare i pannelli di facciata con UHPFRC proprio per l'adattabilità del materiale a delle casserature di forma complessa (grazie alla presenza di soli aggregati fini, alla consistenza molto fluida allo stato fresco e alla elevata resistenza allo stato indurito).

Un'applicazione simile è l'impianto di trattamento delle acque reflue costruito sempre in Francia, a Achères, vicino Parigi [24]. Per le sue proprietà meccaniche e di durabilità avanzate, l'UHPFRC è stato scelto per la progettazione di strutture architettoniche sottili in un ambiente così aggressivo.

Grazie alla sua microstruttura così densa, l'UHPC è stato utilizzato anche nelle aree marine per la sua grande resistenza agli agenti aggressivi. Diverse turbine eoliche offshore in mare sono state progettate con successo [25–27] e il ripristino di alcune strutture di segnalazione marittima in calcestruzzo ad alte prestazioni si è dimostrato molto efficace [28]. In Giappone uno strato di *Ductal* è stato utilizzato per la pista di atterraggio dell'aeroporto Haneda a

Tokyo – struttura realizzata interamente su un’isola artificiale – con un notevole risparmio in termini di peso complessivo [29].



Figura 3 - Aeroporto di Haneda, Giappone

Un promettente campo di applicazione è il risanamento e/o rafforzamento delle strutture esistenti in cemento armato, in cui un nuovo strato di UHPC sostituisce il calcestruzzo deteriorato (fessurato, carbonatato ecc.). L'applicazione di UHPC come strato protettivo fornisce un modo semplice ed efficiente per aumentare la durata, la rigidità e la capacità di resistenza strutturale al manufatto mantenendo sezioni trasversali compatte.

In tal senso la prima applicazione è stata messa in atto per rafforzare un ponte sul fiume La Morge, Wallis, Svizzera [30]. Inizialmente, l'impalcato del ponte non aveva la membrana impermeabilizzante e i cordoli sono stati gravemente danneggiati dalla corrosione indotta dal cloruro. Il progetto ha riguardato il cordolo di valle, il cordolo di monte e la superficie superiore dell'impalcato del ponte che sono stati sostituiti con UHPC. A distanza di un anno dall'intervento non sono state riscontrate fessure sulle superfici del cordolo prefabbricato in UHPC. Beschi et al. [31] hanno riportato risultati sperimentali interessanti ottenuti da una

campagna di prove cicliche eseguite su quattro campioni di nodi trave-pilastro d'angolo in scala reale (due non rinforzati e due rinforzati con incamiciatura in UHPFRC). I risultati sperimentali hanno confermato un miglioramento delle prestazioni sismiche dei campioni con incamiciatura in UHPFRC, che non hanno mostrato un danneggiamento apprezzabile del pannello nodale come è avvenuto invece per i campioni non rinforzati. L'applicazione di una camicia in UHPFRC permette inoltre di aumentare la duttilità del nodo: la capacità di dissipazione energetica è superiore in media del 30% rispetto ai nodi non rinforzati, testimoniando un significativo miglioramento delle prestazioni nel caso di azioni sismiche. Inoltre vale la pena prestare attenzione al fatto che il comportamento del nodo si è rivelato approssimativamente simmetrico in direzione positiva e negativa, con un evidente vantaggio nel caso in cui il nodo sia soggetto a inversione del carico come accade durante un evento sismico.





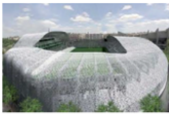
Location	Application	Year	Advantages	Image
Sherbrooke, Canada	Pedestrian bridge	1997	<ul style="list-style-type: none"> • 1st UHPC structure 	
Bourg-les-Valence, France	Road bridge	2005	<ul style="list-style-type: none"> • 90 % reduction on steel reinforcement • Lighter structure with 66 % weight reduction than CC 	
Seonyu, Seoul, South Korea	Footbridge	2004	<ul style="list-style-type: none"> • Arch bridge with reduced segments 	
Mars Hill Bridge, United States	Road bridge	2006	<ul style="list-style-type: none"> • 1st UHPC highway bridge in US • Simple construction • No shear reinforcement 	
Foundation Louis Vuitton, France	Cladding UHPC panels	2014	<ul style="list-style-type: none"> • Innovative design 	
MUCEM, Marseille, France	Column & Façade	2013	<ul style="list-style-type: none"> • Unique design • Y-shaped column • 'Transparent' façade 	
Shawnessy LRT Station, Canada	Roof	2004	<ul style="list-style-type: none"> • Little maintenance • Light weight • Easy construction 	
Jean Bouin Stadium, Paris	Roof & Façade	2013	<ul style="list-style-type: none"> • Precast UHPC elements • Waterproof roof and façade • Slender structure with unique design 	

Figura 4 - Progetti con UHPC nel mondo

1.2. Obiettivi ed organizzazione della tesi

Il calcestruzzo ad alte prestazioni, in inglese Ultra High Performance Concrete (UHPC) è un materiale innovativo caratterizzato da prestazioni molto elevate rispetto ai calcestruzzi ordinari. Tale materiale è disponibile ormai da tempo ma le sue applicazioni sono state limitate per ora soltanto a qualche nicchia, cercando nel frattempo di raccogliere dati, costruire esperienza e confidenza in una tecnica così innovativa.

L'obiettivo del presente lavoro è quello di comprendere al meglio le potenzialità che questo materiale presenta, studiando e chiarendo quali sono le caratteristiche chimico-fisiche e meccaniche che lo contraddistinguono. In modo particolare si definirà dapprima lo stato dell'arte in merito alle tecnologie attuali in termini di composizione, materiali, mix-design e tecniche di produzione dei calcestruzzi ad alte prestazioni. In seguito si descriveranno le principali proprietà meccaniche e fisico-chimiche che caratterizzano tale materiale sottolineando gli apporti benefici del rinforzo fibroso metallico nei confronti del composito. Nella seconda parte del lavoro si riporteranno i risultati di svariati test meccanici e di caratterizzazione chimico-fisica eseguiti su miscele UHPC. La campagna di indagini sperimentali ha previsto lo sviluppo di tre fasi distinte.

La prima fase è stata rivolta allo studio del comportamento meccanico di miscele UHPC. Nel dettaglio sono stati confrontati i risultati di prove meccaniche di compressione e flessione eseguite su miscele UHPC aventi composizione tradizionale e su altre aventi contenuto ridotto di cemento; nella seconda parte del suddetto capitolo è stato valutato l'effetto del contenuto del rinforzo fibroso metallico sulle prestazioni meccaniche di miscele UHPC alle lunghe stagionature. Nell'ultima parte si riportano i risultati di prove di trazione eseguite su provini a forma di osso di cane aventi diversi contenuti di fibre metalliche uncinata.

La seconda fase ha riguardato l'analisi delle caratteristiche chimico-fisiche del materiale. Sebbene la resistenza di un UHPC sia impressionante rispetto ad un calcestruzzo ordinario, è la sua durabilità a superare ulteriormente le aspettative. A tal riguardo la durabilità del composito è stata valutata dapprima in termini di ritiro ed in seguito in termini di resistenza in condizioni estreme quali ad esempio l'esposizione agli ioni cloruro o a cicli di gelo-disgelo. Infine sono state eseguite analisi in laboratorio per indagare le caratteristiche legate alla microstruttura del materiale.

La terza e ultima fase delle ricerche è stata incentrata sulla valutazione sperimentale del comportamento del composito sottoposto a carichi di tipo statico e di tipo dinamico (carico-scarico). Particolare attenzione è stata posta sul comportamento post-fessurativo dei provini analizzati e sull'avanzamento dello stato di danno durante l'esecuzione di test meccanici.

2. Stato dell'arte

2.1. Principi generali degli UHPC

Come delineato nel capitolo introduttivo, gli UHPC sono una nuova classe di materiali compositi cementizi nata in Europa quasi 50 anni fa. Alcune delle odierne implementazioni UHPC riflettono il progresso nella scienza e nella conoscenza dei materiali da costruzione cementizi negli ultimi decenni. UHPC è l'ultima evoluzione nella storia di quasi 200 anni del materiale da costruzione a base di cemento Portland ordinario (OPC) noto come calcestruzzo. Se volessimo attribuire una definizione a tale materiale, sarebbe possibile considerare l'UHPC un materiale composito, costituito da una matrice cementizia e un rinforzo a fibra corta in fibre polimeriche o metalliche non orientate, che contribuiscono al miglioramento delle proprietà meccaniche e della durabilità. I materiali utilizzati in genere per realizzare gli UHPC sono:

- Cemento Portland
- Fumi di silice
- Filler
- Additivo superfluidificante
- Fibre
- Acqua

che sono i componenti anche di molti calcestruzzi tradizionali. La composizione finale dell'impasto, tuttavia, differisce in maniera sensibile da quella di un calcestruzzo convenzionale. In Tabella 4 si riporta un esempio di composizione di un calcestruzzo ordinario e di un UHPC [6].

Tabella 4 - Esempio di composizione di un calcestruzzo ordinario – UHPC [6].

Componenti [kg/m ³]	Calcestruzzo ordinario	UHPC
Cemento Portland	< 400	700-1000
Aggregato grosso	≈ 1000	-
Aggregato fine, Sabbia	≈ 700	1000-2000
Fumo di silice	-	200-300
Superfluidificante	-	10-40
Fibre metalliche	-	50-200
Acqua	> 200	110-200

Parlando di UHPC ci riferiamo ad un materiale ad altissima densità: la ridotta dimensione degli inerti contribuisce a rendere omogeneo e compatto l'impasto, mentre filler e fumo di silice consentono una riduzione della porosità e quindi un incremento delle resistenze meccaniche. A differenza dei calcestruzzi ordinari, i calcestruzzi ad altissime prestazioni prevedono un utilizzo massiccio di cemento. Allo stesso tempo il rapporto acqua-cemento viene mantenuto al minimo grazie all'utilizzo di additivi superfluidificanti.

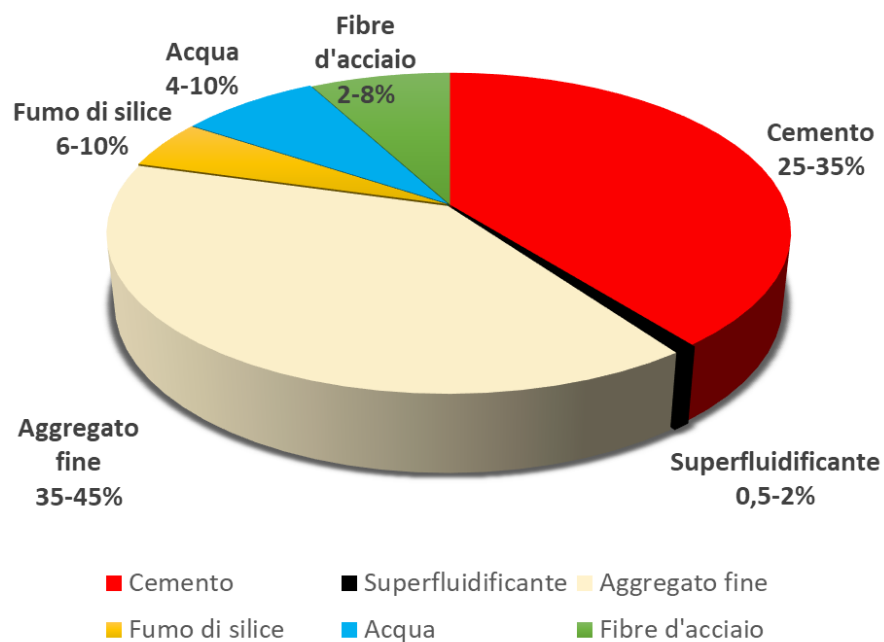


Figura 5 - Composizione tipica di un UHPC

In modo particolare i materiali costituenti vengono proporzionati – attraverso uno specifico mix-design che bilancia tipologia e dimensione degli inerti, acqua, aggiunte minerali e fluidificanti – per ottimizzare la miscela granulare che determina così una matrice cementizia a trama finissima e altamente omogenea. Dal punto di vista dimensionale i grani più grandi sono quelli della sabbia fine (compresi tra i 150 e i 600 μm). A seguire si ha il cemento (diametro medio dei grani prossimo ai 15 μm), il quarzo frantumato (diametro medio di 10 μm) ed infine i fumi di silice (diametro delle sfere tra 0,01 e 1 μm) che, grazie al loro ridotto diametro, riescono a riempire i vuoti interstiziali presenti tra il cemento e gli aggregati.

2.2. Microstruttura

Nonostante i materiali cementizi siano così diffusi, i meccanismi fondamentali che ne regolano il comportamento sono acquisiti in maniera ancora limitata nella comune prassi progettuale e costruttiva. I criteri di progettazione delle strutture in c.a. sono in gran parte desunti dai comportamenti osservati, secondo un approccio tradizionalmente empirico piuttosto che orientato dal punto di vista scientifico. La maggior parte delle reazioni chimiche che regolano le proprietà finali dei materiali cementizi avvengono infatti alla scala nanometrica mentre, paradossalmente, la ricerca si è sempre concentrata al livello macroscopico. Essendo il cemento un materiale fortemente influenzato dalle “nano-proprietà” espresse dalla sua struttura cristallina, i processi chimici che si innescano sin dal momento della reazione del cemento con l’acqua possono influire sulla micro e nanostruttura del conglomerato e, di conseguenza, sulle prestazioni del materiale. Lo sviluppo degli UHPC è stato reso possibile, oltre che dall’evoluzione nel campo degli additivi, principalmente dalla possibilità di osservare il comportamento delle nanostrutture responsabili del processo di idratazione del cemento.

Il processo di idratazione della matrice cementizia degli UHPC è simile a quella del calcestruzzo ordinario (OC). Dapprima i silicati di calcio contenuti nel cemento Portland reagiscono con l’acqua, formando silicato di calcio idrato (indicato con la sigla C-S-H) e idrossido di calcio Ca(OH)_2 (indicato anche con la formula CH). In realtà, tra i due prodotti della reazione, solo il C-S-H è determinante per l’indurimento, mentre la calce contribuisce in modo trascurabile a questo processo. Il C-S-H, ancorché si presenti in forme particellari diverse, è di natura prevalentemente fibrosa. Con il progredire della reazione, le fibre di C-S-H formatesi sui granuli di C_3S o C_2S adiacenti, prima si toccano e poi si intrecciano tra loro. Nella Fig. 6 sono schematicamente illustrati tre stadi del processo di idratazione: subito dopo il mescolamento, quando la reazione non è ancora sostanzialmente partita ed il sistema è relativamente fluido (A); l’inizio della presa quando le fibre cominciano a toccarsi tra loro ed il sistema perde la sua plasticità iniziale (B); l’indurimento in atto quando le fibre, allungate per la progressiva idratazione dei silicati, si intrecciano tra loro e determinano l’irrigidimento del sistema.

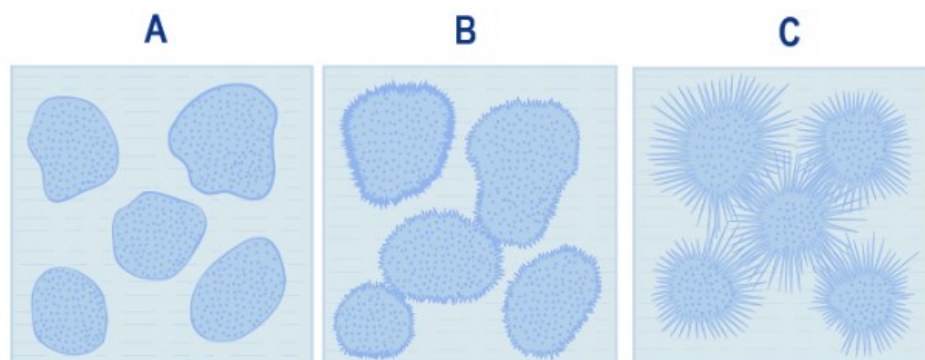


Figura 6 - Idratazione schematica del C_3S o C_2S : subito dopo il mescolamento con acqua (A), inizio della presa (B) e durante l'indurimento (C) [Il Nuovo Calcestruzzo, Colleparidi]

Si può notare, come tra le fibre esistano micro-cavità diffuse (denominate “pori capillari”) che influiscono negativamente tanto sulla resistenza meccanica quanto sulla durabilità del materiale: maggiore porosità significa maggiore permeabilità, e quindi maggiore penetrabilità del sistema cementizio da parte degli agenti aggressivi (*Il Nuovo calcestruzzo, Colleparidi*). A livello dimensionale, osservando la matrice cementizia ad una scala microscopica, si nota che la dimensione dei cristalli di C-S-H è molto piccola (< 2 nm) mentre quella dei CH è alquanto grande (larghezza di circa 1000 nm). In tale contesto, la dimensione dei pori capillari tra i vari cristalli ed aggregazioni varia notevolmente, in funzione soprattutto del rapporto a/c ed a tale scala influenza significativamente le proprietà meccaniche della matrice, dato che le tensioni imposte dai carichi applicati tendono a concentrarsi nell'intorno dei vuoti, dando luogo a micro-fessurazioni. Le proprietà meccaniche risentono pertanto dell'eterogeneità del materiale dovuta alla presenza di grandi cristalli di CH e di pori e vuoti interstiziali intorno ad essi. Partendo da tali considerazioni di carattere generale sulla natura dei calcestruzzi ordinari, gli studi condotti per rendere più omogenea la matrice cementizia hanno mostrato che il modo migliore per ottenere tale risultato è quello di aumentare la densità dell'impasto grazie all'ottimizzazione di un mix-design che porti alla maggior compattazione tra aggregati e grani di cemento [32].

Tale scopo è stato raggiunto con gli UHPC mediante prima l'eliminazione degli aggregati grossi in favore di aggregati fini, l'utilizzo di un basso rapporto a/c reso possibile dall'aggiunta di additivi superfluidificanti, ma soprattutto mediante l'aggiunta di fumi di silice. I Microsilicati, definiti spesso in letteratura con il termine di “Silica Fume” o Fumo di silice, sono dei co- prodotti ottenuti nel processo di riduzione della quarzite ad elevate temperature, durante la produzione di leghe di silicio con ferro o altri metalli. Sono essenzialmente due le azioni apportate da questo componente nelle miscele cementizie:

- i. Maggiore impermeabilità e significativo aumento delle prestazioni meccaniche e della durabilità, per effetto delle dimensioni delle particelle, che vanno a colmare i vuoti lasciati dal cemento;
- ii. Possibilità di far contribuire anche la calce (CH) al processo di indurimento della pasta cementizia. Infatti l'elevato tenore di silice amorfa è capace di reagire con la

calce, prodotta per idratazione dei silicati, e di formare ulteriore C-S-H*: Il C-S-H* formatosi per la reazione pozzolanica (e qui contraddistinto con un asterisco) è cronologicamente “secondario”, rispetto a quello “primario” (C-S-H) che si produce direttamente mediante l'idratazione dei silicati. Esso si forma in tempi più lunghi, perché la reazione pozzolanica è più lenta del processo di idratazione, ma anche perché la sua formazione richiede che prima si accumuli un po' di calce attraverso la reazione primaria. A seguito della duplice formazione di C-S-H (“primario”) e di C-S-H* (e “secondario”) il sistema risulta più ricco in materiale fibroso e quindi meno poroso rispetto ad una pasta di cemento Portland a parità di rapporto a/c.

Se osservata al microscopio elettronico, la matrice cementizia così ottenuta mostra una microstruttura molto densa e priva di porosità capillare. La zona di transizione (*Interfacial transition zone ITZ*), tra aggregati e pasta o è sottilissima o è assente, indicando un legame ottimale tra i vari componenti in grado di permettere un efficiente trasferimento dei carichi tra la pasta di cemento e gli aggregati (Figura 7).

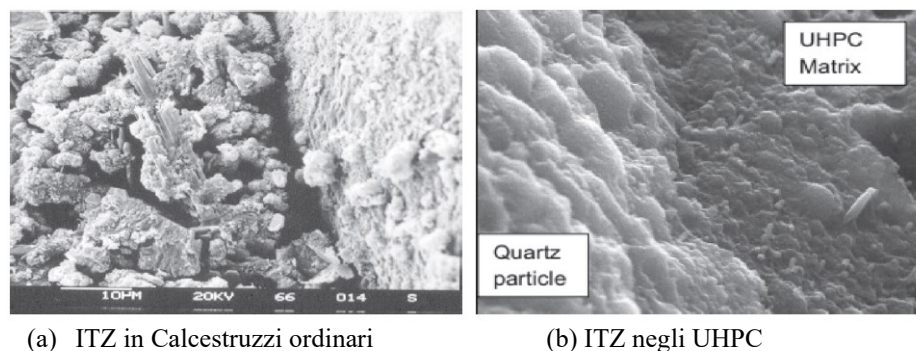


Figura 7 - Immagini della zona di transizione nei calcestruzzi ordinari e negli UHPC ottenute con Microscopia Elettronica a Scansione (SEM) [33]

2.3. Componenti principali degli UHPC

Come anticipato nel capitolo precedente, i materiali utilizzati per realizzare calcestruzzi ad altissime prestazioni comprendono, oltre ai componenti cementizi, anche aggregati, additivi di varia natura e fibre. Nelle sezioni seguenti vengono discussi nel dettaglio i vari componenti.

2.3.1. Cemento

Gli UHPC contengono circa il doppio della quantità di cemento di un calcestruzzo convenzionale. Il contenuto di cemento è normalmente compreso tra 700-1000 kg/m³. Per quanto riguarda il tipo di cemento, si consigliano cementi Portland a basso contenuto di C₃A (alluminato tricalcico). La celite o C₃A è uno dei componenti più reattivi del clinker ed è responsabile del conferimento di resistenza alla matrice cementizia nelle prime fasi di indurimento. Per questo motivo è consigliato limitarne il quantitativo al fine di consentire le operazioni di miscelazione, di trasporto, e di getto del calcestruzzo in tutta tranquillità. In sostanza per i calcestruzzi ad altissime prestazioni si consiglia di utilizzare i cementi CEM I 52.5 R, ASTM tipo I o II e GB P.I. Poiché non tutte le particelle di cemento possono partecipare al processo di idratazione a causa del basso rapporto a/c, le particelle di cemento non idratate agiscono come aggregati nell'impasto.

2.3.2. Fumo di silice

Molti dei vantaggi degli UHPC sono dovuti all'uso del Fumo di Silice SF. Questo è un sottoprodotto del processo di fusione utilizzato per produrre silicio e leghe di ferrosilicio. È costituito principalmente da biossido di silicio amorfo (non cristallino) (SiO₂). È un materiale ultrafine con particelle sferiche di diametro inferiore a 1 μm. Questo lo rende circa 100 volte più piccolo della particella di cemento media.

I fumi di silice sono una parte essenziale dell' UHPC grazie per le seguenti funzioni:

- filler effect per effetto delle dimensioni delle particelle che vanno a colmare i vuoti lasciati dal cemento. Per ridurre la porosità della matrice, è importante infatti ottenere la massima densità possibile di tutti i componenti granulari;
- migliorano la lubrificazione della miscela grazie alle sue particelle perfettamente sferiche;
- per reazione pozzolanica, dovuta al loro elevato tenore di biossido di silicio amorfo, che reagendo con l'ossido di calcio (CaO) liberato durante l'idratazione del cemento, dà origine ad un silicato di calce idrato (C.S.H.), che provoca una sensibile diminuzione della porosità del calcestruzzo o della malta cementizia.

Per assolvere alla sua funzione di filler è necessaria una grande quantità di fumo di silice nella miscela. Park et al. [34] hanno riscontrato che il rapporto ottimale fumo di silice-cemento all'interno di una miscela UHPC era compreso tra il 20 e il 30%. Con percentuali

più elevate si notò una diminuzione delle proprietà meccaniche del composito. Ciò è dovuto al fatto che con quel contenuto, durante le reazioni pozzolaniche, il fumo di silice consuma tutta la quantità di CH nella miscela. Con un contenuto maggiore, le polveri potrebbero rimanere inutilizzate, causando una caduta della resistenza a compressione. Anche Chan et al [35] sulla base dei risultati di prove sperimentali di adesione e di pull-out, dimostrano che il rapporto ottimale tra il contenuto di fumi di silice e quello del cemento è compreso tra il 20 e il 30%. Con questo dosaggio migliorano notevolmente sia la resistenza della matrice cementizia sia l'energia necessaria per causare il pull-out del rinforzo fibroso. In aggiunta, alte percentuali di SF aumentano significativamente sia il ritiro autogeno del calcestruzzo, dato che la diminuzione e compattezza della dimensione dei pori comporta un aumento della tensione capillare ed una relativa contrazione della pasta del cemento, sia il ritiro plastico mentre diminuiscono sostanzialmente la deformazione dovuta al creep [36].

2.3.3. Supplementary cementitious materials (SCM)

Accanto ai notevoli vantaggi descritti nei paragrafi precedenti, i fumi di silice presentano alcuni svantaggi, quali la scarsa disponibilità, il costo elevato e la colorazione grigio scura che danno alla matrice cementizia. Inoltre l'alto contenuto di cemento comporta alcuni problemi legati al calore di idratazione e al ritiro autogeno. Per ovviare a tali problematiche, negli ultimi anni si sono studiate diverse alternative, prendendo in considerazione la sostituzione sia delle SF sia del cemento con materiali cementizi supplementari SCM. Gli SCM comunemente usati sono le ceneri volanti (*Fly Ash, FA*), scorie di altoforno (*Ground Granulated Blast Furnace Slag, GBBS*), cenere di buccia di riso (*Rice Husk ASH, RHA*), Polvere di calce (*Limestone powder, LP*) e nanoparticelle.

2.3.3.1. Ground granulated blast-furnace slag (GBBS)

La loppa o scoria d'altoforno è un sottoprodotto del processo di produzione della ghisa, durante il quale si formano grandi quantità di scoria di composizione simile a quella del cemento Portland. La scoria acquista caratteristiche idrauliche se all'uscita dall'altoforno viene raffreddata bruscamente e trasformata in granuli porosi a struttura vetrosa (silice amorfa). Tale prodotto viene poi essiccato e macinato in una polvere fine e prende il nome di *Ground Granulated Blast-Furnace Slag (GGBS)*.

Esso può essere utilizzato in combinazione con cemento Portland e/o altri materiali pozzolanici. Rispetto ai materiali con attività pozzolanica, ha il potere di indurire, anche se con molta lentezza, se mescolata con acqua anche in assenza di idrossido di calcio. Sono state condotte diverse campagne sperimentali sulle prestazioni di calcestruzzi ad altissime prestazioni ottenuti utilizzando il GBBS come sostituto del cemento. Ganesh et al. [37] hanno dimostrato che la fluidità della miscela UHPC è migliorata in modo significativo aumentando la percentuale di sostituzione del cemento con il GGBS a causa della migliore dispersione delle particelle cementizie e delle caratteristiche superficiali delle particelle GBBS. La resistenza alla compressione è notevolmente migliorata con l'aumento del contenuto di GGBS, fino ad un 40% nel caso della stagionatura con trattamento termico, e del 20% con

una stagionatura umida standard. L'incorporazione di volumi elevati di GGBS nel mix UHPC ha migliorato significativamente l'energia di frattura fino al 60% rispetto alla miscela di riferimento. Il migliorato assorbimento di energia può essere attribuito a un legame potenziato tra rinforzo fibroso e matrice.

Dal punto di vista della durabilità, la sostituzione del cemento Portland ordinario con la scoria d'altoforno determina i seguenti vantaggi:

- maggiore resistenza all'attacco solfatico: essendo presente un minore quantitativo di clinker risulta inferiore il tenore di alluminato tricalcico, che è l'elemento del cemento sensibile all'azione dei solfati.
- maggiore resistenza al dilavamento: essendo presente un minore quantitativo di clinker risulta inferiore il tenore di calce. L'idrossido di calcio in presenza di acque aggressive viene dilavato creando una struttura porosa e pertanto più accessibile agli agenti esterni; pertanto, un minor tenore di calce determina una matrice cementizia più compatta e un calcestruzzo più durevole.

2.3.3.2. Cenere volante

La cenere volante, nota comunemente anche con il termine inglese *Fly Ash*, è un materiale derivante dal processo di produzione dell'energia termoelettrica e visivamente molto simile al comune cemento Portland. La forma particolarmente regolare delle sue particelle, associata alla loro natura chimica, essenzialmente silico- alluminosa, fanno di questo materiale un ingrediente di prim'ordine nel confezionamento di conglomerati cementizi, con specifico riguardo al calcestruzzo. Chimicamente è stato dimostrato come la cenere volante sia, di fatto, una vera e propria "pozzolana artificiale", avendo una composizione chimica del tutto analoga alle classiche pozzolane naturali.

I benefici apportati dalla cenere volante alle proprietà del calcestruzzo sono testimoniati da una consolidata ed ultra-decennale esperienza sperimentale nazionale e internazionale. Tali benefici riguardano sia il calcestruzzo allo stato fresco che quello allo stato indurito. Il loro uso come aggregato all'interno di un mix comporta:

- la riduzione del peso proprio delle strutture (peso specifico inferiore a quello del cemento);
- la riduzione della richiesta d'acqua di impasto e mantenimento di lavorabilità. Le particelle di cenere volante vanno a collocarsi tra le particelle di cemento. Esse si comportano come veri e propri "cuscinetti a sfera" tra i granuli di cemento e questo facilita la mobilità del materiale allo stato fresco;
- la riduzione del volume degli interstizi tra gli altri componenti e con esso il volume di pasta (e quindi di acqua) necessario a riempirli, grazie all'effetto "fillerizzante" o effetto "impacchettamento" (Particle del packing effect) delle particelle di cenere;
- il miglioramento delle prestazioni ambientali a causa della possibilità del riciclo del materiale, la salvaguardia degli ambienti dove si interviene con le miniere, la riduzione delle emissioni inquinanti.

In letteratura è presente una serie di studi che confrontano ed affiancano all'uso delle FA come rimpiazzo del cemento le scorie di altoforno, analizzate in precedenza.

Per composti ternari (ovvero con presenza contemporanea di entrambe le aggiunte minerali) si ottengono ottimi risultati sostituendo circa il 40% di cemento con GGBS+FA, dato che oltre tale combinazione la resistenza a compressione sembra ridursi significativamente. L'uso di una combinazione ternaria è preferibile ed è molto efficace dato che fornisce proprietà meccaniche simili o migliori rispetto al solo uso di FA o GGBS [38].

2.3.3.3. Rice Husk Ash

Un'azienda Texana ha realizzato di recente un processo che permette di utilizzare gli scarti della lavorazione del riso nella produzione di calcestruzzo per l'edilizia. La pula di riso, o lolla, non è altro che quella pellicola che ricopre i chicchi quando sono sulla pianta e che viene eliminata durante la lavorazione del prodotto. Tale sostanza è ricca di ossido di silicio, una componente fondamentale del calcestruzzo. Un team di ricercatori del *ChK Group Inc*, uno studio di ingegneria con sede in Texas, ha recentemente sviluppato un processo di combustione che permette di ottenere ceneri di lolla (*Rice Husk Ash, RHA*) praticamente prive di carbonio. Quando la lolla è completamente incenerita in condizioni controllate, contiene il 90-96% di silice in forma amorfa e può essere considerata una pozzolana altamente attiva. Quando i campioni di RHA sono stati scansionati al microscopio elettronico (Fig. 8), le immagini hanno mostrato la superficie multistrato, angolare e microporosa dell' RHA, spiegando così la sua elevata superficie specifica [39].

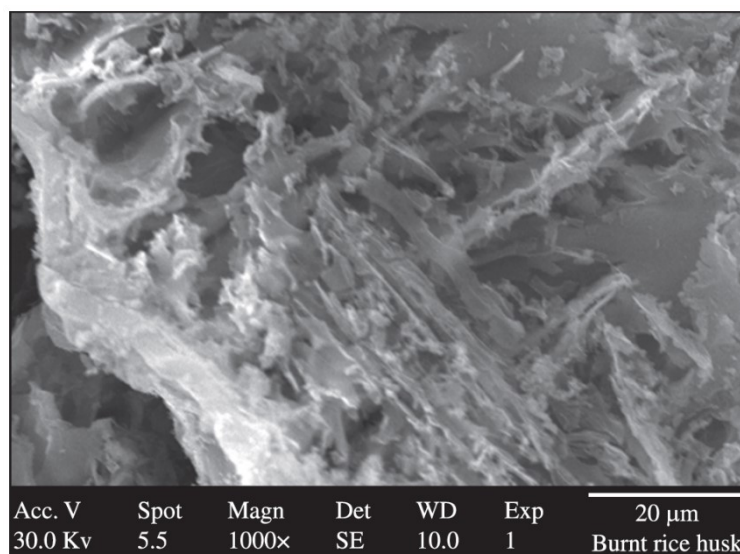


Figura 8 - Immagine SEM di una particella RHA [39]

Diversi ricercatori hanno concluso che tale prodotto può essere utilizzato come sostituto parziale o completo di alcuni componenti nella produzione di calcestruzzi UHPC. Kang et al. [40] hanno condotto una campagna sperimentale su miscele UHPC realizzate inglobando

l' RHA come sostituto parziale sia del fumo di silice sia del filler al quarzo. L'uso di RHA è stato efficace per migliorare la resistenza alla compressione degli UHPC specialmente a lungo termine. Tutti i campioni di UHPC realizzati che contengono RHA hanno superato la resistenza cubica minima di 145 MPa a 28 giorni. Il miglioramento della resistenza è stato particolarmente notevole quando la lolla di riso è stata usata come sostituto della polvere di quarzo piuttosto che il fumo di silice. Sostituendo metà o tutto il filler di quarzo con RHA, la forza è aumentata rispettivamente del 7,7% o del 18,5% a 91 giorni, mentre è aumentato dell'1,7% quando il fumo di silice è stato sostituito con RHA.

Anche la parziale sostituzione del cemento con RHA, fino al 20% del peso del cemento, ha provocato effetti benefici sulle proprietà del composito, in particolare dal punto di vista del ritiro autogeno [41]. Si presume che la riduzione del ritiro autogeno sia causata da un meccanismo di stagionatura interno del quale è responsabile l'acqua contenuta nei pori delle particelle di RHA. Queste ultime sono caratterizzate da un'elevata superficie specifica per cui sono preparate al meglio per assorbire l'acqua che potrebbe essere rilasciata durante il processo di indurimento delle miscele UHPC aventi tipicamente basso contenuto di acqua.

2.3.3.4. Limestone Powder

La polvere di calcare (*Limestone Powder, LP*) può essere utilizzata come materiale di riempimento (filler) per migliorare la lavorabilità e la stabilità del calcestruzzo allo stato fresco. Alcuni ricercatori hanno dimostrato che è ragionevole sostituire parte del cemento con LP perché è un inerte ecologico ed economico con dimensioni simili [42,43]. L'utilizzo di polvere di calcare in sostituzione parziale del cemento e sostituzione parziale o totale dei fumi di silice ha ridotto leggermente il tempo di miscelazione necessario per produrre UHPC e ha un forte effetto positivo sulla lavorabilità del composito, senza sacrificare la resistenza alla compressione. Pertanto, la polvere di calcare sembra essere un buon sostituto di una quantità parziale di cemento, perché ridurrebbe il costo totale e le emissioni di CO₂ associate alla produzione di UHPC, senza avere ripercussioni negative dal punto di vista delle prestazioni meccaniche.

2.3.3.5. Nanomateriali

Accanto alle più conosciute ceneri volanti e scorie di altoforno, recentemente è stato studiato l'impiego di nanomateriali. Questi sono materiali aventi dimensioni microscopiche, da 0,1 a 100 nm [44]. I nanomateriali componenti sono caratterizzati da particelle di granulometria finissima ed un'elevata area superficiale rispetto ad altri componenti del calcestruzzo, come mostrato in Fig. 9 [45]. Essi possono contribuire al miglioramento della densità della matrice cementizia dato che queste nanoparticelle sono abbastanza piccole da riempire i vuoti tra le particelle di cemento e di fumo silice. Ad oggi diversi ricercatori hanno studiato gli effetti dell'utilizzo di nanoparticelle, tra cui nano-silice (nano-SiO₂), nano-CaCO₃, nano-ossido di titanio (nano-TiO₂), nanotubi di carbonio (CNT) e nanofibre di carbonio (CNF), come sostituti del cemento o altri componenti degli UHPC [46]. L'applicazione dei nanomateriali

nel settore degli UHPC è ancora alle fasi iniziali, ma senza dubbio sarà una via di sviluppo importante per il futuro.

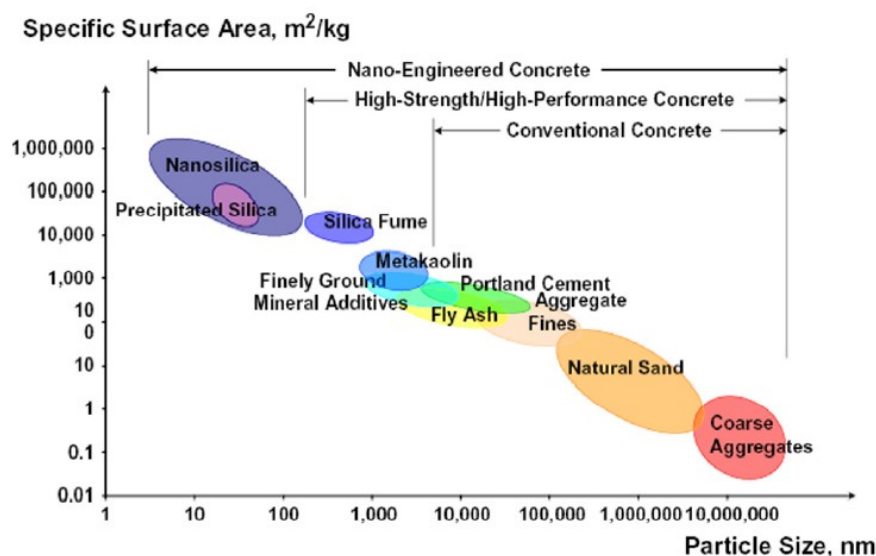


Figura 9 - Dimensione e area superficiale specifica delle particelle dei materiali costituenti materiali UHPC [45]

2.3.4. Aggregati

In base alle considerazioni riportate nei capitoli precedenti sulla microstruttura dei calcestruzzi ad altissime prestazioni, risulta chiaro che rispetto ad un calcestruzzo ordinario, l'elemento debole della catena non è più la matrice cementizia bensì l'aggregato. Al fine di migliorare il grado di compattezza del materiale è importante che gli aggregati utilizzati negli UHPC abbiano una distribuzione granulometrica ottimale per ottenere un'elevata densità di "impacchettamento". La maggior parte delle miscele UHPC esclude intenzionalmente gli aggregati grossolani per ottenere resistenze maggiori, riducendo al minimo la zona di transizione interfacciale e aumentando l'omogeneità del materiale. La dimensione media delle particelle è spesso inferiore a 1 mm.

Inoltre il comportamento degli UHPC è funzione anche di altri parametri connessi alla natura degli aggregati presenti nella miscela [47]. In modo particolare la migliore resistenza a compressione è stata ottenuta nei 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 sfruttata al massimo la resistenza della pasta cementizia. 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.

2.3.5. Superfluidificanti

Agli inizi degli anni 1970, la famiglia dei fluidificanti (a base di ligninsolfonato, un residuo dell'estrazione della cellulosa dal legno) fu tecnicamente sovrastata da superfluidificanti prodotti per sintesi chimica. Tutti i superfluidificanti sono basati su polimeri idrosolubili. I primi ad essere immessi sul mercato erano basati su poli-naftalin-solfonato (PNS) o su poli-melammin-solfonati (PMS). Più recentemente verso la fine del 1980 sono stati introdotti i poli-acrilati (PA) o poli-carbossilati (PC) che formano una famiglia molto vasta di nuovi polimeri tutti caratterizzati dall'assenza dei gruppi solfonici presenti nei PNS e PMS.

L'impiego degli additivi superfluidificanti è stato necessario a seguito dell'aggiunta del fumo di silice all'interno della matrice cementizia, poiché quest'ultimo aumenta la richiesta d'acqua della miscela a causa delle dimensioni finissime e dell'elevata area superficiale. I vantaggi dell'uso dei superfluidificanti risiedono sinteticamente nel ridurre il contenuto d'acqua di miscela, a parità di contenuto di cemento, ed a prefissata lavorabilità, al fine di abbassare il rapporto a/c e aumentare quindi resistenza e durabilità.

Il meccanismo su cui si basa il funzionamento dei superfluidificanti è il cosiddetto "effetto deflocculante" che l'additivo esercita sui granuli di cemento dispersi in mezzo acquoso. A causa dall'attrazione di natura elettrostatica tra i vari granuli di cemento, a seguito delle cariche elettrostatiche di segno opposto che si sono formate sulle superfici dei granuli per effetto della macinazione (e della rottura dei legami ionici presenti nei costituenti del clinker) durante il processo produttivo del cemento, la maggior parte dei granuli di cemento in un mezzo acquoso tende a formare agglomerati. Tale fenomeno, noto come flocculazione, viene contrastato con l'aggiunta nella miscela dell'additivo. La presenza dei superfluidificanti può permettere, a seconda della tipologia del polimero presente, o l'assorbimento di gruppi caricati negativamente (gruppi anionici negativi presenti in quelli a base di poli-naftalen-solfonati e polimelammin-solfati), che determinano una repulsione elettrostatica tra i granuli, o l'assorbimento sulla superficie dei granuli di cemento di molecole caratterizzate dalla presenza di catene laterali (come per quelli a base di poli-acrilati e policarbossilati), che impediscono ai granuli di cemento di avvicinarsi l'uno l'altro.

2.3.6. Fibre

Per le sue caratteristiche naturali, il calcestruzzo presenta alcuni difetti, come elevata fragilità, bassa resistenza alla trazione, scarsa resistenza alle crepe e capacità di deformazione. Per ovviare a questi inconvenienti, le fibre sono incorporate nel calcestruzzo per aumentarne la tenacità e la duttilità del materiale.

I calcestruzzi così composti, e tra questi anche gli UHPC, rientrano nella categoria dei calcestruzzi fibro-rinforzati (Fiber-Reinforced Concrete, FRC). A tal proposito è solito riscontrare in letteratura la dicitura UHPFRC come sinonimo di UHPC, anche se in alcuni casi, con il secondo termine, ci si riferisce a calcestruzzi dalle elevate prestazioni senza però l'aggiunta di fibre. Ad ogni modo, come già detto in precedenza, utilizzeremo nella presente dissertazione il termine UHPC come sinonimo di UHPFRC.

L'analisi delle materie prime necessarie per produrre UHPC dimostra che la maggior parte del costo in un comune UHPC è attribuibile al rinforzo fibroso. D'altra parte però, non è sicuro progettare strutture UHPC senza fibre poiché è richiesta una duttilità minima del materiale. In effetti, i calcestruzzi ad altissime prestazioni sono altamente fragili e la parte "altissime prestazioni" del suo nome si basa sull'aggiunta di fibre. Sono ben noti i vantaggi del rinforzo in fibra nel migliorare la resistenza alla frattura, la resistenza all'impatto, la resistenza alla fatica e la capacità di assorbimento di energia del calcestruzzo. Le fibre resistono allo sviluppo della cricca agendo come ponti di trasferimento dello stress e, una volta che le cricche si formano, le fibre limitano la loro propagazione fornendo una maggiore tenacità al composito [48].

Esistono molteplici tipologie di fibre (fibre di acciaio, fibre di vetro, fibre sintetiche, fibre naturali, ecc.) adottate per la realizzazione di calcestruzzi ad altissime prestazioni. Ovviamente, il tipo di fibra, il contenuto di fibre, la geometria delle fibre, l'orientamento delle fibre, sono tutti fattori che influenzano le prestazioni degli UHPC in termini di lavorabilità, microstruttura e durabilità. La tabella 5 riassume le principali proprietà delle fibre più comuni.

Tabella 5 - Principali proprietà delle fibre più comuni [33]

Tipo	Diametro (µm)	Densità relativa (g cm ⁻³)	Resistenza a trazione (MPa)	Modulo di Young (GPa)	Allungamento (%)
Acrylic	5-17	1.18	800-950	16-23	9-11
Polyester	10-80	1.38	735-1200	6-18	11-15
Polyethylene	800-1000	0.96	200-300	5-6	3-4
Polypropylene	20-70	0.91	300-770	3.5-11	15-25
Nylon	23	1.16	900-960	4.2-5.2	18-20
PVA	1.30	1.30	600-2500	5-50	6-17
Aramide	10-12	1.44	2500-3100	60-120	2.1-4.5
Rock wool	2.7	2.70	490-770	70-119	0.6
Vetro	10-16	2.74	1400-2500	70-80	2.5-3.5
Legno	25-400	1.40	50-1000	15-40	-
Carbonio	7-18	1.75	1800-4000	200-480	1.2-1.6
Acciaio	250-1000	7.80	280-2800	200-250	0.5-4.0

Le fibre che hanno trovato il maggior impiego nella composizione di FRC in generale e di UHPC in particolare sono sicuramente quelle d'acciaio.

La quantità di fibre aggiunte a una miscela di calcestruzzo è misurata come percentuale del volume totale del composito (calcestruzzo e fibre). Il quantitativo di fibre di acciaio negli UHPC è generalmente tenuto al di sotto del 3% in volume. Yu et al. [49] hanno confrontato la fluidità di diverse miscele di UHPC ed hanno dimostrato che la fluidità è diminuita linearmente all'aumentare del contenuto di fibre di acciaio (Fig. 10 (a)). Wu et al. [50] invece ha dimostrato che la scorrevolezza della miscela con fibre di acciaio dritte è stata ridotta del 21,4% quando il contenuto di fibre è aumentato dall'1% al 3% in volume (con contenuto di superfluidificante costante pari allo 0,02%). Esiste un valore critico del contenuto di fibre, oltre il quale la scorrevolezza può essere notevolmente ridotta. Questo perché quando il contenuto del rinforzo fibroso supera tale "contenuto critico", questo può facilmente agglomerarsi e formare delle palline [51].

Inoltre, è stato sperimentato che la riduzione della scorrevolezza è maggiore con l'uso di fibre con un rapporto di aspetto più elevato, dove il rapporto di aspetto è definito come il rapporto tra lunghezza e diametro della fibra.

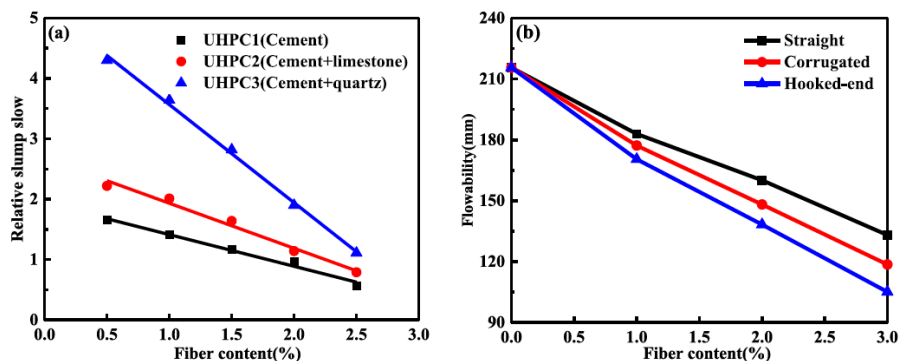


Figura 10 - Effetto del contenuto e della forma delle fibre di acciaio sulla lavorabilità di miscele UHPC [50]

Molteplici studi riportano inoltre che la lavorabilità degli UHPC è influenzata in maniera importante dalla forma della fibra. Quattro sono le forme comunemente utilizzate per la produzione di questo materiale (Tabella 6). Rispetto alle fibre di acciaio dritte, l'uso di fibre di acciaio "deformate" riduce la fluidità della miscela. Come mostrato in Fig. 10(b), la fluidità di Campione UHPC con 3% in volume di fibre uncinata e fibre ondulate è diminuita rispettivamente del 10,9% e del 21,1% rispetto a quella del fibre di acciaio diritte [50]. Tale fenomeno avviene probabilmente per due motivi: le fibre "deformate" garantiscono un maggior ancoraggio meccanico tra fibra e matrice; rispetto alle fibre diritte, le altre tendono ad aggrovigliarsi tra loro.

Tabella 6 - Differenti tipologie di fibre di acciaio

Tipo di fibra	Forma	Lunghezza (mm)	Diametro (μm)
<i>Liscia</i>		6	0.16
		12	0.2
		13	0.16
		13	0.2
		30	0.3
<i>Uncinata</i>		13	0.2
		20	0.25
		20	0.35
		30	0.38
<i>Attorcigliata</i>		13	0.2
		30	0.3
<i>Ondulata</i>		13	0.2
		18	0.3
		30	0.3
		30	0.5

Come già anticipato, la funzione del rinforzo fibroso è quello di “cucire” la fessura formatasi sulla matrice cementizia e dunque trasferire la tensione dalla matrice alla fibra. Tale processo, più che comportare un aumento diretto della resistenza flessionale, determina l’incremento della tenacità flessionale ovvero della capacità del materiale di assorbire energia, definita come l’area che sottende la curva carico-inflessione, detta anche energia totale di frattura. Questa capacità di trasferimento dello sforzo è tanto migliore quanto migliore è il legame matrice-fibra. Tale legame può essere misurato tramite il test di pull-out della fibra.

Come mostrato in Fig. 11 (a), il comportamento di estrazione delle fibre di acciaio dritte consiste principalmente in tre fasi [52]:

1. il carico di estrazione inizia a svilupparsi fino a raggiungere il carico al punto (1). In questa fase, non si verifica alcuno slittamento relativo tra la fibra e matrice;
2. la fibra dritta inizia a staccarsi parzialmente e viene raggiunto picco di carico di estrazione punto (2). In questa fase, l'effetto combinato tra attrito statico e adesione chimica gioca un ruolo dominante nella resistenza;
3. la fibra si stacca completamente e inizia a scivolare quando vince l’attrice dinamico (Fig. 11(b)). La forza di estrazione diminuisce con l’aumento dello spostamento fino a quando la fibra è completamente separata dalla matrice.

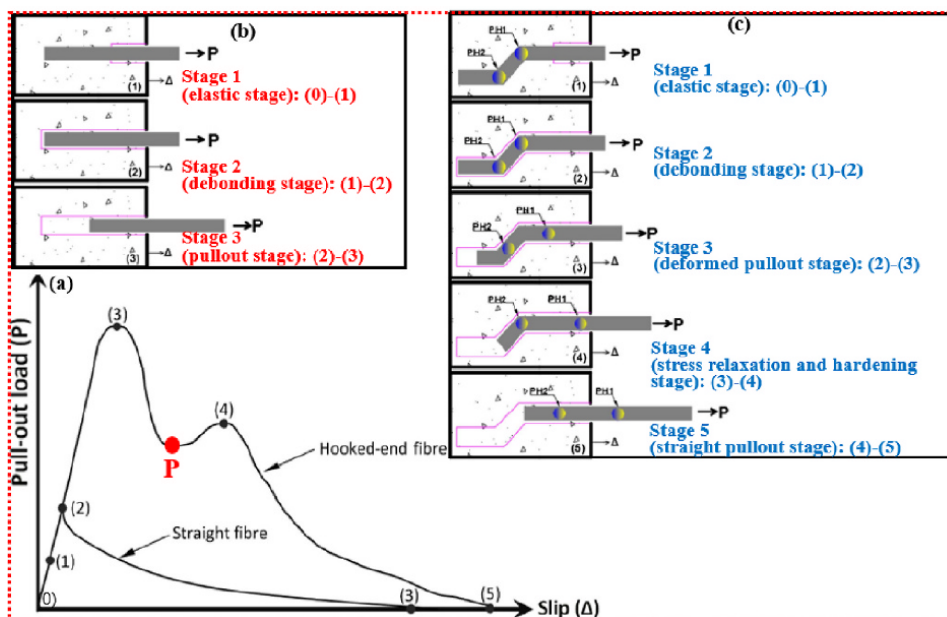


Figura 11 - (a) Comportamento di pullout della singola fibra; Schema del processo di pull-out di (b) fibre dritte e (c) uncinato [52]

Lo schema del processo di pullout delle fibre uncinato è invece illustrato in Fig. 11(b). Questo si compone di cinque fasi. Si può notare che gli stadi 1 e 2 della fibra uncinata sono simili a quelli delle fibre dritte. In fase 3, due estremità della fibra uncinata (PH1, PH2 in Fig. 11

(c)) forniscono ancoraggio meccanico quando attraversano il canale della matrice cementizia e dunque il carico di estrazione continua ad aumentare fino a raggiungere il carico di punta massimo (punto 3). Dopo aver raggiunto il massimo carico di punta, le fibre sono parzialmente estratte dalla matrice. Nella fase 4, si ha un lieve aumento del carico di estrazione. Ciò può essere dovuto alla flessione della fibra nella direzione opposta, che porta ad una maggiore resistenza di ancoraggio. Nella fase 5, dopo aver raddrizzato l'estremità uncinata della fibra, il carico di estrazione è gradualmente diminuito fino a quando la fibra è stata estratta interamente. La fase 5 è simile alla fase di estrazione (fase 3) della fibra dritta. Dalla meccanica di estrazione appena descritta della fibra dalla matrice cementizia si evince dunque che il legame tra “fibra deformata”-matrice cementizia è migliore di quello della fibra liscia.

Tali affermazioni sono validate da diversi studi presenti in letteratura. Wille et al [53], ad esempio illustrano il comportamento di UHPC con differenti tipologie di fibre (dritte, uncinata e attorcigliate). Dalle prove sperimentali dimostrano che sia la resistenza a trazione massima sia la deformazione corrispondente sono migliori nei composti che utilizzano fibre deformate rispetto a quelli che impiegano le fibre lisce e dritte.

Un altro parametro che ha un effetto significativo sulla resistenza flessionale del materiale è l'orientamento delle fibre. In generale, le fibre di acciaio sono disperse in modo casuale all'interno della miscela ed è vantaggioso ottenere un comportamento meccanico più isotropo. Tuttavia le fibre tendono ad allinearsi perpendicolarmente al flusso di getto. L'orientamento e la distribuzione delle fibre dipendono però anche dal dosaggio e dalle dimensioni dei provini, nonché dalla lavorabilità del materiale allo stato fresco. Una quantità di fibre troppo elevata aumenta le probabilità di interazione tra le fibre stesse, causando la formazione di grumi e influenzando negativamente la lavorabilità della miscela. La dimensione del provino invece influisce sul fatto che le fibre sono costrette ad allinearsi lungo le superfici dello stampo (effetto di parete), mentre la lavorabilità influenza il movimento delle fibre durante la preparazione dei provini.

2.4. Preparazione della miscela

Dato che le caratteristiche peculiari degli UHPC comportano un basso rapporto a/c, è necessario prestare particolare attenzione in fase di produzione. La fabbricazione del materiale può avvenire sia a partire da pre-miscelati a secco, nel caso di prodotti brevettati, sia dai singoli componenti separati, come se si trattasse di un normale calcestruzzo. La produzione di miscele UHPC richiede generalmente l'uso di miscelatori speciali o tempi di miscelazione prolungati per garantire la produzione di una miscela fresca omogenea. Il sequenziamento dei componenti introdotti nel miscelatore influenza anche l'omogeneità della miscela fresca. Come anticipato nei capitoli precedenti, con l'aumentare del contenuto di fibre di acciaio aumenta la loro tendenza a raggrumarsi formando delle “sfere” di fibre, che può essere ancora più pronunciata nella produzione su larga scala. Di solito tutti i costituenti secchi della miscela UHPC vengono versati nel miscelatore e miscelati in modo uniforme. Quindi l'acqua viene aggiunta e versata lentamente nel mixer. Solo alla fine si aggiungono all'impasto fibre di acciaio. Il tempo totale di miscelazione è di circa 10-15 minuti.

La metodologia adottata da Graybeal [6] è leggermente diversa. La premiscela viene pesata e versata nella betoniera e miscelata per circa 2 minuti. Metà del superfluidificante è stato diluito in acqua e versato lentamente nella premiscela per altri 2 minuti. Quindi il superfluidificante rimanente viene aggiunto alla miscela per un altro minuto. La miscelazione è continuata fino a quando la miscela UHPC non cambia da una forma in polvere secca a una pasta densa. Dopodiché, vengono aggiunte le fibre di acciaio e si continua la miscelazione fino a quando le fibre di acciaio non sono state distribuite uniformemente nell'impasto. Il tempo medio impiegato per svolgere tutte queste operazioni è stato di circa 20 minuti.

2.5. Metodo di stagionatura

La stagionatura o maturazione comprende tutti i processi durante i quali il calcestruzzo fresco sviluppa gradualmente le sue proprietà per effetto della progressiva idratazione del cemento. La velocità di idratazione dipende dalle condizioni climatiche di esposizione e dalle modalità di scambio di umidità e calore tra il calcestruzzo e l'ambiente. Per consentire una corretta maturazione è necessario mantenere costantemente umida la struttura realizzata. Una mancata maturazione implica il decadimento delle proprietà meccaniche e della durabilità del calcestruzzo in opera.

In generale, i limiti da considerare durante la presa del calcestruzzo sono: alta temperatura, bassa umidità, vento e altri fattori [54]. Un forte vento, una temperatura elevata e un ambiente secco possono influenzare principalmente l'accelerazione di due fenomeni che influenzano la stagionatura del calcestruzzo, ovvero l'evaporazione dell'acqua dovuta all'idratazione del cemento e la velocità di idratazione del cemento. Il getto di calcestruzzo ad alte temperature non è raccomandato soprattutto quando la temperatura raggiunge i 35 °C. Anche le basse temperature non sono raccomandate durante il getto del calcestruzzo. La temperatura non deve essere inferiore a 5 °C, perché le reazioni chimiche di idratazione del cemento non possono avvenire a tali temperature. Inoltre, basse temperature fino a 0 °C potrebbero causare danni al calcestruzzo a causa del processo espansivo di congelamento dell'acqua, con conseguente formazioni di fessure sulla superficie del calcestruzzo.

Nel processo di produzione di UHPC, è riconosciuto che il processo di stagionatura gioca un ruolo importante nel garantire le eccezionali prestazioni di questo materiale. La fase di stagionatura ha un ruolo vitale nello sviluppo della resistenza meccanica dell' UHPC. Al momento non esiste una condizione di maturazione standard per gli UHPC. Generalmente, questi vengono maturati in due tipi di regime: (i) stagionatura in autoclave e (ii) stagionatura con trattamenti termici. La stagionatura in autoclave prevede l'applicazione in contemporanea di calore e pressione sulla miscela fresca. La stagionatura con trattamenti termici include invece la stagionatura a vapore, a bagno in acqua o ad aria calda. Tali trattamenti termici vengono generalmente applicati per accelerare il processo di idratazione e migliorare la densità del composto, garantendo elevatissime resistenze alla compressione.

Shen et al. [55] hanno studiato gli effetti su delle miscele UHPC sottoposte a cinque tipi di regime di stagionatura: stagionatura standard a 20°C per 28 giorni, stagionatura a vapore a 60°C e 90°C per due giorni e stagionatura in autoclave a 200°C e 250°C per 8 ore). I risultati sperimentali ottenuti hanno indicato che le resistenze a flessione, compressione e trazione aumentano con l'aumentare della temperatura di maturazione. Il processo di idratazione differisce dal normale processo a temperatura standard (20°C) in quanto una maggiore quantità di prodotti di idratazione aggiuntivi si formano dalla reazione pozzolanica dopo il trattamento termico.

3. Proprietà degli UHPC

Nei capitoli precedenti si è visto che le principali qualità dei calcestruzzi ad altissime prestazioni risiedono da un lato nel miglioramento ed ottimizzazione della microstruttura della matrice cementizia e dall'altro nell'impiego del rinforzo fibroso al fine di migliorare la natura fragile propria del composito. In realtà le proprietà meccaniche descritte nei paragrafi seguenti sono frutto di una combinazione sinergica tra i due fattori.

3.1. Proprietà meccaniche

3.1.1. Comportamento a compressione

La resistenza a compressione è considerata una proprietà chiave del calcestruzzo. È un parametro che fornisce un'indicazione generale della qualità del calcestruzzo. Le ottime prestazioni meccaniche a compressione di un UHPC sono correlate all'ottimizzazione della microstruttura della matrice cementizia. Difatti un UHPC senza fibre è in grado da solo a raggiungere resistenze a compressione a 28 giorni pari o superiori ai 150 MPa anche senza particolari trattamenti termici. La Figura 12 (a) riporta il legame costitutivo a compressione di un UHPC senza fibre. Da qui si evince che il comportamento del materiale è prevalentemente elastico lineare fino a circa il 70-80% della capacità resistente a compressione [56]. Superata tale soglia, si nota una perdita di linearità al termine del quale il composito manifesta una rottura fragile senza alcun ramo discendente.

L'aggiunta di fibre non va a modificare sostanzialmente il ramo ascendente ma per lo più il comportamento post-fessurativo del composito. La presenza di fibre nella miscela determina la scomparsa di una rottura di tipo fragile e la comparsa di un ramo discendente post-picco (Fig. 12 (b)) la cui inclinazione dipende da diversi fattori, tra i quali il contenuto di fibre, l'orientamento delle fibre e la geometria delle fibre. Dai risultati sperimentali riportati in letteratura, si evince che l'influenza delle fibre sul valore della resistenza è basso: arrivando ad un contenuto di fibre pari al 2,5% si è arrivati ad un incremento di tale valore di circa il 15%. Tale risultato è probabilmente dovuto ad una sorta di effetto "confinamento", esercitato dal rinforzo fibroso sulla matrice cementizia che limita lo spanciamiento della stessa all'aumentare del carico.

Le condizioni di stagionatura, ovvero disponibilità di umidità e livello di temperatura, influenzano drasticamente il guadagno di resistenza a compressione. Nelle prime ore di maturazione, l'assenza di umidità di solito ha un effetto limitato sul guadagno di resistenza iniziale, dato che il calcestruzzo è ancora umido. Tuttavia, un'inadeguata maturazione umida durante il primo giorno dopo il getto del calcestruzzo potrebbe portare a una notevole perdita di forza in età avanzata (RILEM, 1981). Notevoli sono poi i vantaggi legati all'applicazione di eventuali trattamenti termici. L'innalzamento della temperatura di maturazione accelera le reazioni di idratazione e migliora la microstruttura del composito comportando un significativo aumento della resistenza massima.

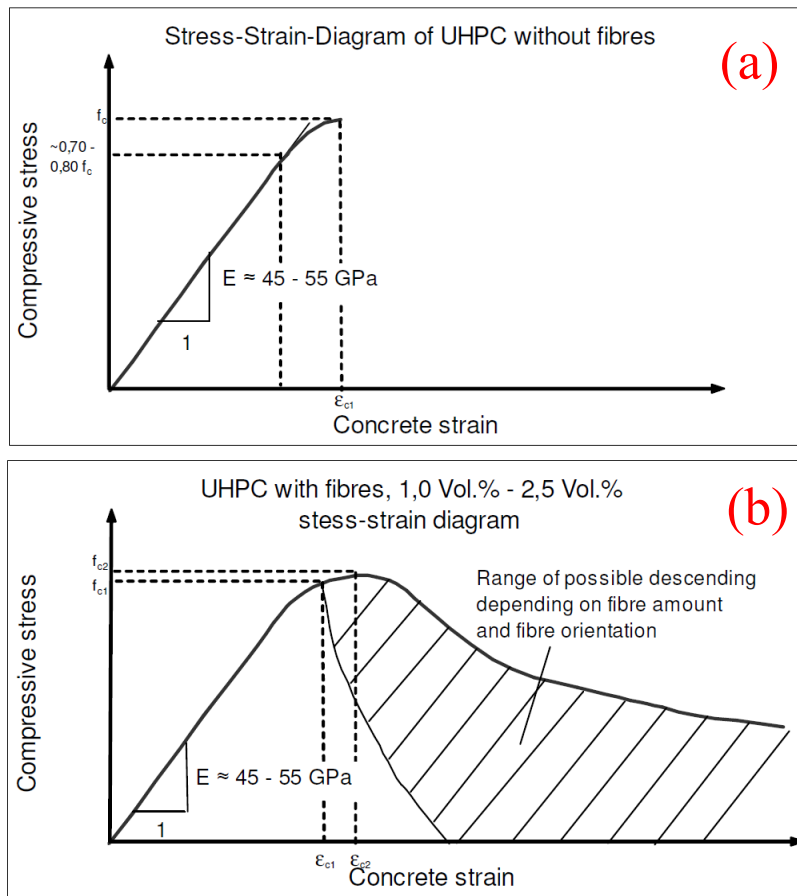


Figura 12 - Legame costitutivo a compressione di un UHPC senza fibre (a) - fibrorinforzato (b) [56]

3.1.2. Comportamento a trazione

Così come per il comportamento a compressione, contrariamente a quando viene diffusamente ritenuto, l'aggiunta di fibre non migliora la resistenza meccanica a trazione del composito, intesa come la sollecitazione in corrispondenza della quale si verifica l'innescò della prima o unica fessura nella matrice di un elemento sollecitato a trazione. Allo stesso modo, non vengono apprezzabilmente modificate dall'aggiunta delle fibre le grandezze che caratterizzano il comportamento del materiale prima della fessurazione, ossia il modulo elastico e la deformazione in corrispondenza dell'innescò della fessura. L'aggiunta di fibre modifica sensibilmente, invece, il comportamento a trazione della matrice cementizia in fase fessurata.

A seconda del dosaggio di fibre impiegato, gli UHPC esibiscono due diversi comportamenti post-fessurativi [57]. Per contenuti di fibre non elevati (indicativamente inferiori al 2% in volume) il comportamento è di tipo degradante (“*strain-softening*”). Questo significa che raggiunta la resistenza di prima fessurazione σ_{cc} il materiale è in grado di sopportare sollecitazione di trazione, a patto che queste siano inferiori a quella che ha provocato la fessurazione della matrice cementizia. In questo caso si assisterà alla formazione di un'unica fessura, che aumenta di ampiezza fino al collasso. Quando si supera un “contenuto critico” di fibre (indicativamente superiore al 2% in volume), il comportamento post-fessurativo del composito può risultare incrudente (“*strain-hardening*”). Infatti, grazie all'efficace azione di “cucitura” esercitata dalle fibre, si assisterà alla formazione progressiva di molteplici fessure fino al raggiungimento di una tensione di collasso σ_{pc} che è superiore a quella relativa alla comparsa della prima fessura σ_{cc} .

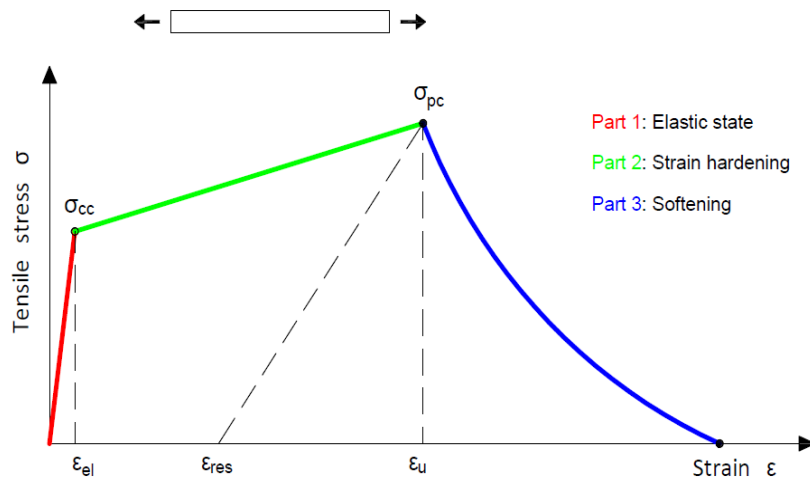


Figura 13 - Comportamento ideale di un UHPC sottoposto ad una prova di trazione diretta [57]

In Figura 13, è riportato il legame costitutivo a trazione di un UHPC sottoposta ad una prova di trazione diretta. Tale modello idealizzato distingue il comportamento a trazione del composito in tre parti:

- Parte I: ramo elastico-lineare fino al raggiungimento della σ_{cc} , che è definita come la tensione corrispondente alla formazione della prima fessura della matrice cementizia.
- Parte II: ramo di incrudimento positivo. Durante questa fase, nel calcestruzzo si assiste all'innescio di molteplici micro-fessure. I parametri che determinano lo sviluppo di questo comportamento sono: quantità di fibra, legame fibra-matrice e orientamento della fibra.
- Parte III: ramo di incrudimento negativo. Raggiunta la tensione ultima del composito σ_{pc} , o meglio quando in una particolare fessura viene superata la resistenza adesiva tra fibre e matrice, avviene la localizzazione della deformazione con la relativa frattura del materiale e la progressiva fuoriuscita delle fibre.

3.2. Proprietà chimico - fisiche

3.2.1. Ritiro

Un'altra caratteristica peculiare del calcestruzzo rispetto ad altri materiali da costruzione, come acciaio e materie plastiche, è che, come tutti i materiali a base cementizia, presenta significative contrazioni dimensionali (e conseguentemente vulnerabilità alla fessurazione), per effetto dell'evaporazione dell'acqua ma anche semplicemente a causa della reazione di idratazione del cemento.

Nei calcestruzzi si distinguono due tipi di ritiro significativi: uno a breve termine e l'altro a lungo termine. Il ritiro plastico o a breve termine è la contrazione che si verifica a poche ore dal getto, quando il calcestruzzo è ancora giovane e quindi ancora nella fase plastica. In questa fase il calcestruzzo plastico subisce una contrazione dovuta all'evaporazione dell'acqua dalla superficie del getto verso un ambiente insaturo di vapore. (U.R. < 95%). Il ritiro a lungo termine del calcestruzzo si distingue in ritiro autogeno e ritiro igrometrico o da essiccamento. Il primo è una conseguenza della contrazione chimica che avviene nella pasta di cemento quando l'acqua idrata le particelle di cemento. Infatti, il volume assoluto degli idrati formati è minore della somma dei volumi assoluti delle particelle di cemento e dell'acqua che hanno reagito. Il secondo è causato dall'evaporazione dell'acqua contenuta dal composito verso l'ambiente esterno insaturo, cosicché perde parte della sua acqua interna e conseguentemente massa.

Mentre quest'ultimo è il fenomeno dominante nel normale ritiro del calcestruzzo, è il contrario nel caso degli UHPC [58]. In un calcestruzzo ordinario con rapporto a/c maggiore di 0.50 c'è molta più acqua di quanto richiesta per idratare completamente le particelle di cemento, ed una grande quantità di quest'acqua è contenuta in grandi capillari ben connessi, dove si generano le tensioni di trazione molto basse. Nel caso degli UHPC con un rapporto a/c al di sotto dello 0.35, vengono utilizzati più cemento e meno acqua, cosicché la rete iniziale di pori è composta da capillari molto fini. Quando inizia l'auto-essiccamento, e parimenti il processo di idratazione, si sviluppano rapidamente dei menischi all'interno dei capillari più piccoli se non viene aggiunta acqua esterna. Al momento in cui iniziano ad idratarsi contemporaneamente i grani di cemento presenti nei calcestruzzi ad alte prestazioni,

l'essiccazione dei capillari fini può generare alte tensioni di trazione che fanno ritirare la pasta di cemento idratata [59].

Tale inconveniente può essere risolto mediante apporto esterno di acqua o mediante stagionatura umida (U.R. > 95%). Quindi, la differenza essenziale che sussiste tra un calcestruzzo ordinario ed un HPC/UHPC è che il primo, in ogni caso, non mostra ritiro autogeno, mentre il secondo mostra ritiro autogeno se non c'è stagionatura all'acqua durante il processo di idratazione. Il ritiro da essiccamento della pasta di cemento idratata inizia sulla superficie del calcestruzzo e prosegue più o meno rapidamente all'interno del calcestruzzo, a seconda dell'umidità relativa dell'ambiente e della grandezza dei capillari. Il ritiro a secco di un calcestruzzo ordinario è quindi rapido perché la rete di capillari è ben connessa e contiene capillari aperti sulla superficie del calcestruzzo. In un UHPC è un fenomeno lento a causa della ristrettezza dei capillari e della loro scarsa connessione.

Oltre alla stagionatura umida esistono altre soluzioni che possono essere utilizzate per ridurre il fenomeno del ritiro alle brevi stagionature, come ad esempio l'aggiunta di additivi. Gli additivi riduttori di ritiro (*shrinkage reducing admixture, SRA*) e gli additivi espansivi (*expansive agent, EA*) sono gli additivi più utilizzati. I primi provocano una significativa riduzione del ritiro igrometrico. Tuttavia, una completa eliminazione del ritiro igrometrico può essere realizzata solo combinando un additivo SRA (dosato all'1% sul peso del cemento) con un agente espansivo (Figura 14). Nell'aggiunta combinata dell'additivo SRA con un agente espansivo a base di CaO, si registra una sinergia basata su due effetti: quello atteso basato sulla riduzione del ritiro alle lunghe stagionature quando il calcestruzzo è esposto all'aria insatura di vapore (UR = 65%), e quello inatteso, ma altrettanto benefico, basato sulla maggiore espansione del calcestruzzo durante la sua stagionatura umida iniziale (con UR = 99%) all'interno dei casseri o mediante protezione con teli impermeabili (Il Nuovo Calcestruzzo, Colleparidi).

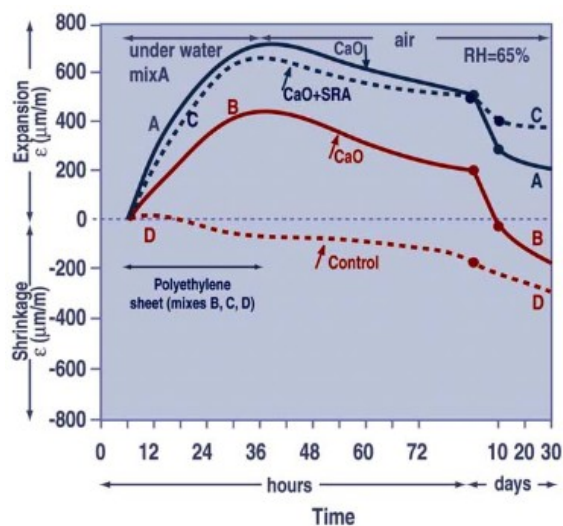


Figura 14 - Curva di espansione-ritiro di un calcestruzzo a ritiro compensato con agente espansivo a base di ossido di calcio (CaO) con e senza SRA [Il Nuovo Calcestruzzo, Colleparidi]

3.2.2. Durabilità

I calcestruzzi ad altissime prestazioni sono caratterizzati da una struttura interna altamente compatta. Al contrario dei calcestruzzi ordinari, pertanto, la porosità del materiale risulta minima. La bassa porosità dei calcestruzzi UHPC è sinonimo di alte prestazioni meccaniche, ma anche di elevata durabilità, conseguenza diretta della scarsa permeabilità della microstruttura agli agenti aggressivi.

Nonostante ciò, è opportuno ricordare che i primi utilizzi degli UHPC, negli anni Sessanta e Settanta, sono stati applicazioni interne. Le applicazioni esterne risalgono ai tardi anni Ottanta ed ai primi anni Novanta, il che significa che non è passato tempo sufficiente per stimare la reale vita di esercizio delle strutture in calcestruzzo ad elevate prestazioni sotto condizioni esterne. Detto questo, sicuramente l'esperienza fatta con i calcestruzzi ordinari ci informa che la durabilità del calcestruzzo è governata, in larga parte, dalla permeabilità del materiale; dunque, possiamo affermare con sicurezza che l'UHPC è un materiale più duraturo.

Esiste una serie di test di durabilità per determinare la resistenza degli UHPC e dei calcestruzzi in generale a vari agenti aggressivi. Questi test includono la misurazione della penetrabilità degli ioni cloruro, la resistenza ai cicli gelo-disgelo, resistenza all'abrasione, e suscettibilità alla reazione alcali-silice.

PRIMO STUDIO

4. Caratterizzazione meccanica di miscele UHPC “eco-friendly”

Il calcestruzzo ad alte prestazioni (UHPC) è un materiale innovativo caratterizzato da prestazioni molto elevate rispetto ai calcestruzzi ordinari. Negli ultimi vent'anni, sono stati compiuti progressi fenomenali nella ricerca e nell'applicazione degli UHPC. Recentemente, l'approccio è quello di migliorare la sostenibilità di questo materiale riducendo l'impatto economico ed ambientale legato alla sua produzione.

Nella prima parte di questo capitolo si riportano i risultati di un'indagine sperimentale riguardo la caratterizzazione del comportamento meccanico di miscele UHPC realizzate con un contenuto ridotto di cemento di circa il 30%. Nel dettaglio sono state confrontate otto diverse miscele UHPC, con due diversi dosaggi di cemento (1000 o 700 kg/m³) e quattro diversi dosaggi di fibre di acciaio ottonato (0 - 50 - 100 - 150 kg/m³), in termini di resistenze a compressione e a flessione.

Nella seconda parte del capitolo è stato valutato invece l'effetto del contenuto delle fibre metalliche sulle prestazioni meccaniche di miscele UHPC alle lunghe stagionature. Nel dettaglio si riportano i risultati di test meccanici realizzati su quattro miscele UHPC, aventi stessa composizione ma contenuto di fibre di acciaio ottonato crescente (0 - 50 - 100 - 150 kg/m³) ed eseguiti a tempi di stagionatura pari a 28, 84, 140 e 196 giorni (rispettivamente 1, 3, 5 e 7 mesi).

4.1. UHPC eco-friendly

4.1.1. Materiali

Vengono descritti di seguito i materiali utilizzati per il confezionamento dei provini. Il cemento utilizzato è di tipo CEM I 52,5 R. Si tratta di un cemento Portland avente requisiti in accordo alla norma EN 197-1 e composizione riportata in Tabella 7.

Tabella 7 - Composizione CEM I 52,5R utilizzato

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%

Gli aggregati utilizzati sono due sabbie di quarzo aventi granulometria (0 – 0.6 mm) e (0.6-1.0 mm). Il Fumo di silice utilizzato è un prodotto in polvere di forma prevalentemente sferica, costituito da silice amorfa submicronica, privo di qualsiasi composto cristallino. Tale componente ha elevata superficie specifica (15-20 m²/g), dimensione dei grani inferiore a 1 µm ed è caratterizzato da altissima attività pozzolanica e grandi proprietà fillerizzanti. In aggiunta è stato utilizzato additivo superfluidificante acrilico in polvere per migliorare la lavorabilità dell'impasto ed evitare i rischi di segregazione della miscela; Infine sono state aggiunte fibre dritte in acciaio ottonate, di lunghezza 13mm, diametro 0,2 mm e rapporto d'aspetto pari a 65 a dosaggi crescenti (0 -50 – 100 – 150 kg/m³). La Tabella 8 riassume le proporzioni delle miscele impiegate in questo studio.

Tutte le miscele hanno mostrato stessa consistenza allo stato fresco pari a 180 mm, misurata mediante tabella di flusso secondo la procedura descritta dalla norma EN 1015-3 “*Methods of test for mortar for masonry – Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)*”. Il dosaggio della sabbia più grossolana (0.6/1) è stato opportunamente ridotto all'aumentare del dosaggio di fibre di acciaio oltre i 50 kg/m³ al fine di mantenere la stessa lavorabilità allo stato fresco. Quattro miscele (denominate UHPC) sono state preparate con dosaggio di cemento pari a 1000 kg/m³, rapporto acqua/cemento pari a 0,20 e rapporto acqua/legante (cemento più fumo di silice) di 0,18; altre 4 miscele sono state preparate con dosaggio di cemento inferiore (700 kg/m³) con rapporto acqua/cemento 0,29 e rapporto acqua/legante 0,23 al fine di migliorare la sostenibilità (“eco-efficiency” EE) del composito. Il taglio del 30% del dosaggio del cemento comporta minori emissioni di CO₂. Infatti il leggero aumento del dosaggio dei fumi di silice non ha alcun impatto sulle emissioni di CO₂, essendo tale materiale un sottoprodotto industriale da smaltire.

Tabella 8 - Composizione miscele UHPC oggetto di studio

Miscela	CEM I 52.5R	Acqua	Sabbia (0/0.6)	Sabbia (0.6/1)	Fumo di silice	Superfluidificante	Fibre
UHPC	1000	200	400	600	125	11	-
UHPC_50	1000	200	400	600	125	11	50
UHPC_100	1000	200	400	575	125	11	100
UHPC_150	1000	200	400	550	125	11	150
EE_UHPC	700	200	420	880	150	9	-
EE_UHPC_50	700	200	420	880	150	9	50
EE_UHPC_100	700	200	420	855	150	10	100
EE_UHPC_150	700	200	410	830	150	10	150

4.1.2. Confezionamento dei provini

I provini sono stati preparati e confezionati presso il Laboratorio Materiali del Dipartimento di Scienze e Ingegneria della Materia, dell'Ambiente ed Urbanistica (SIMAU). Per ciascuna miscela descritta in Tabella 8 sono stati preparati sei provini prismatici (40 x 40 x 160 mm). Le miscele sono state colate in casseri d'acciaio e vibrare per 30 secondi dopo la colata fino a quando le bolle d'aria non si sono esaurite. A 24h dal getto, i provini sono stati scasserati e conservati a temperatura costante di 20°C e umidità relativa (UR) costante del 95% per 28 giorni. Terminata la stagionatura i provini sono stati testati meccanicamente a compressione e a flessione in accordo alla norma EN 1015-11 "*Methods of test for mortar for masonry. Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar*". Sono stati inoltre realizzati tre ulteriori provini di dimensioni 40 x 40 x 160 mm secondo la miscela EE_UHPC, destinati al test dell'assorbimento d'acqua, in accordo alla norma ASTM C642 "*Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*". Infine sono stati confezionati tre provini aventi dimensioni 100 x 100 x 300 mm secondo la miscela EE_UHPC, sottoposti alla prova di resistenza al degrado per cicli di gelo e disgelo in accordo alla norma ASTM C666 "*Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing*".



Figura 15 - Prove di: (a) Flessione su tre punti, (b) compressione su provini $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$

4.1.3. Risultati

4.1.3.1. Prove di compressione

I risultati ottenuti dalle prove a compressione sono riportati in Figura 16. Come si può notare la miscela EE_UHPC preparata con un rapporto acqua/legante più elevato rispetto alla miscela di riferimento UHPC, ha mostrato una minore resistenza a compressione a 28 giorni (meno di un 5%, come previsto sulla base dell'aumento di acqua/legante da 0,18 a 0,23). Tuttavia, quando le fibre di acciaio vengono aggiunte ad un dosaggio elevato (superiore ai 50 kg/m³) si raggiunge lo stesso livello di resistenza indipendentemente dal dosaggio di cemento utilizzato. L'effetto positivo delle fibre sulla resistenza alla compressione UHPC è probabilmente dovuto a un effetto di confinamento laterale offerto dal rinforzo fibroso, che sembra essere più efficace se il rapporto acqua/cemento è leggermente superiore (miscele denominate EE).

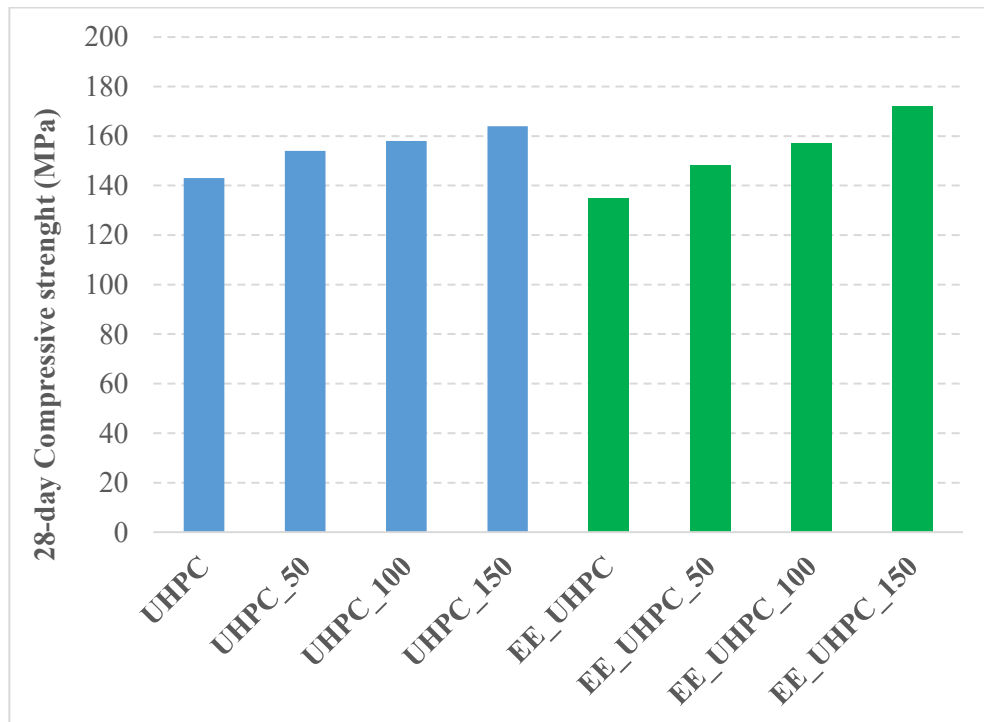


Figura 16 - Resistenza media a compressione a 28 giorni di stagionatura umida

4.1.3.2. Prove di flessione

I risultati delle prove di flessione su tre punti ottenuti dopo 28 giorni di stagionatura umida sono riportati in Figura 17. Le miscele preparate con un dosaggio di cemento più elevato (e un rapporto acqua/cemento inferiore) hanno mostrato lo stesso comportamento di quelle aventi dosaggio di cemento inferiore, denominate EE (eco-efficiency). Solo la miscela senza fibre (UHPC) ha mostrato una resistenza di picco maggiore rispetto alla corrispondente EE_UHPC, mentre con l'aumentare del contenuto delle fibre metalliche sembra essere valido il contrario, confermando i risultati ottenuti dai test di compressione. Il motivo è ancora una volta legato al diverso rapporto acqua/legante, che è leggermente superiore per le miscele EE_UHPC. Sia la resistenza a compressione, sia la resistenza a flessione sono influenzate dal volume dei pori capillari, così come dalla loro dimensione. È noto infatti che tanto maggiore è il rapporto acqua/legante tanto maggiori sono il volume cumulativo dei pori e la dimensione dei pori. In generale l'effetto della presenza del rinforzo fibroso sul comportamento post-fessurativo del composito è abbastanza evidente. In particolare è possibile distinguere tre diversi comportamenti:

- comportamento fragile con una brusca perdita di resistenza nelle miscele senza fibre (UHPC e EE_UHPC);
- comportamento di softening (o incrudimento negativo) per i provini con dosaggio di fibre pari a 50 kg/m³;
- comportamento di hardening (o incrudimento positivo) per le miscele aventi dosaggi maggiori di fibre.

L'effetto “cucitura” esercitato dalle fibre di acciaio è in grado di garantire la stessa resistenza a flessione misurata in corrispondenza della prima fessurazione se il dosaggio della fibra è di almeno 100 kg, mentre con un dosaggio di 50 kg di fibre di acciaio ottonato la perdita di resistenza dopo il picco è circa il 50%. In generale tale fenomeno è stato osservato anche utilizzando fibre dritte e non uncinato, grazie all'adesione chimica all'interfaccia tra pasta di cemento e rivestimento di ottone delle fibre di acciaio, come osservato anche in altri lavori presenti in letteratura [60,61].

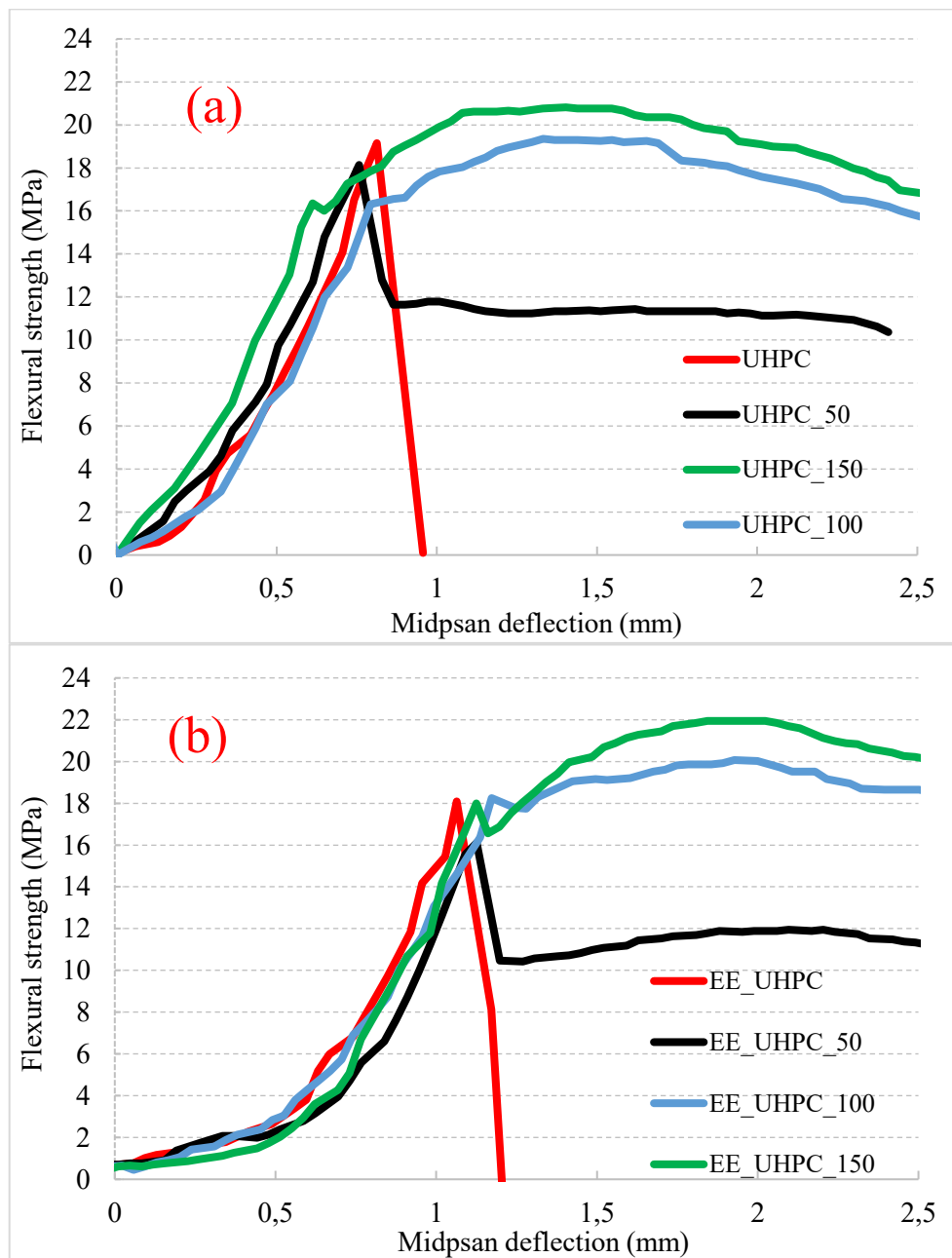


Figura 17 - Curve Resistenza a flessione - Spostamento a 28 giorni di stagionatura di: (a) miscele UHPC con dosaggio di cemento pari a 1000 kg; (b) miscela UHPC con dosaggio di cemento pari a 700 kg.

4.2. Comportamento alle lunghe stagionature

In questa seconda parte del capitolo si riportano i risultati di test meccanici realizzati su quattro miscele UHPC aventi stessa composizione ma contenuto di fibre di acciaio ottonato crescente (0 – 50 – 100 – 150 kg/m³) ed eseguiti a tempi di stagionatura pari rispettivamente a 1, 3, 5 e 7 mesi.

4.2.1. Materiali e preparazione dei provini

In Tabella 9 sono riportati i materiali e la composizione delle 4 miscele oggetto di studio. In particolare i materiali e la composizione delle miscele sono i medesimi delle miscele denominate EE_UHPC descritte al capitolo precedente (§4.1.1.). Rispetto a tali miscele sono stati aggiunti agente espansivo e additivo anti-ritiro SRA (Shrinkage reducing admixture) al fine di prevenire eventuali fessurazioni da ritiro.

Tabella 9 - Composizione miscele oggetto di studio (kg/m³)

<i>Materiali</i>	<i>EE_UHPC</i>	<i>EE_UHPC_50</i>	<i>EE_UHPC_100</i>	<i>EE_UHPC_150</i>
Cemento 52,5 R	700	700	700	700
Acqua	200	200	200	200
Sabbia 0/0.6 mm	420	420	420	410
Sabbia 0.6/1 mm	880	880	855	830
Fumo di silice	150	150	150	150
Superfluidificante	9	9	10	10
Espansivo	30	30	30	30
Antiritiro (SRA)	9	9	9	9
Antibolle	3	3	3	3
Fibre	-	50	100	150

I provini sono stati preparati e confezionati presso il Laboratorio Materiali del Dipartimento di Scienze e Ingegneria della Materia, dell’Ambiente ed Urbanistica (SIMAU). Le miscele sono state colate in casseri d’acciaio e vibrato per 30 secondi dopo la colata fino a quando le bolle d’aria non si sono esaurite. A 24h dal getto, i provini sono stati scasserati e conservati a

temperatura costante di 20°C e umidità relativa (UR) costante del 95% per 28 giorni. Trascorso tale periodo i provini sono stati conservati poi in ambiente secco (50% R.H.) a temperatura costante di 20°C ± 2 °C fino al giorno del test.

4.2.2. Risultati

Per ciascuna miscela descritta in Tabella 9 sono stati preparati sedici provini prismatici (40 x 40 x 160 mm) per ogni miscela e ad ogni step temporale quattro provini sono stati testati meccanicamente a compressione e a flessione in accordo alla norma EN 1015-11. I risultati delle prove a compressione eseguite a 28, 84, 140 e 196 giorni dal getto sono riportati in Figura 18.

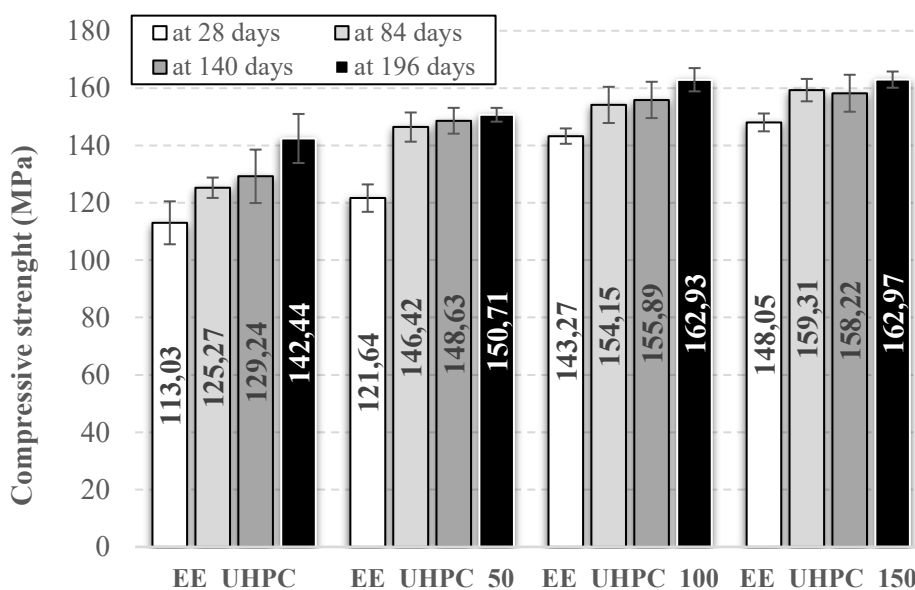


Figura 18 – Resistenza a compressione media dopo 28, 84, 140 e 196 giorni di stagionatura

Si nota facilmente che la resistenza a compressione aumenta gradualmente con il contenuto di fibre. L'aggiunta di fibre corte di acciaio ottonate è stata in grado di aumentare gradualmente la resistenza a compressione delle miscele UHPC calcestruzzo, probabilmente per l'effetto confinamento esercitato dalla fibra sulla matrice cementizia. Il contenuto di fibre di acciaio da 50 a 150 kg/m³ ha comportato un aumento della resistenza alla compressione rispetto all' UHPC senza fibra (EE_UHPC) per tutti e quattro i periodi di riferimento. Allo stesso tempo, si può osservare l'effetto benefico del periodo di stagionatura sulla resistenza alla compressione dell' UHPC. Tale tendenza è stata meno pronunciata nelle miscele aventi contenuto di fibre pari a 100 kg/m³ e 150 kg/m³: si può notare che la resistenza media alla

compressione a 196 giorni per EE_UHPC_100 e EE_UHPC_150 è praticamente la medesima (≈ 163 MPa).

In Figura 19 e Figura 20 sono invece riportati i risultati ottenuti dalle prove a flessione eseguite a 28, 84, 140 e 196 giorni dal getto.

Si nota subito che le miscele che incorporano fibre di acciaio hanno mostrato una maggiore tenacità rispetto alla miscela senza rinforzo fibroso (EE_UHPC). L'aggiunta di fibre di acciaio, anche al dosaggio più basso (50 kg/m^3) è in grado di evitare rotture fragili e consente al provino di subire una deformazione plastica dopo la formazione della prima fessura. Si può notare che il comportamento post-fessurativo cambia al variare del contenuto di fibre d'acciaio. Per il dosaggio più basso (50 kg/m^3) si osserva un comportamento di softening, mentre con dosaggi più elevati (100 e 150 kg/m^3) il comportamento post-fessurativo cambia e si possono notare significativi rami di incrudimento positivo (hardening) nelle curve sforzo-spostamento.

Osservando le suddette figure si può anche notare che l'iniziale stagionatura umida ha esercitato un effetto benefico sulla resistenza a flessione dopo 28 giorni, con un valore minimo di circa 18 MPa raggiunto da tutte le miscele testate. Il motivo di questo comportamento è probabilmente dovuto ad un effetto sinergico tra l'agente espansivo e la fibra di acciaio. In accordo a Nardinocchi et al. [62], durante i primi giorni di stagionatura, la matrice cementizia tende ad espandersi grazie alla presenza dell'agente espansivo, ma il suo rigonfiamento è limitato dalla presenza delle fibre d'acciaio. In questo modo si creano delle tensioni all'interfaccia tra fibre e matrice che, se mantenute entro un certo limite, non producono uno scorrimento relativo ma esercitano un effetto "self-prestress", capace di tradursi in una maggiore resistenza a trazione e flessione del materiale. Dopo i primi 28 giorni di stagionatura umida, infatti, la resistenza a flessione delle miscele di riferimento EE_UHPC tende a rimanere invariata.

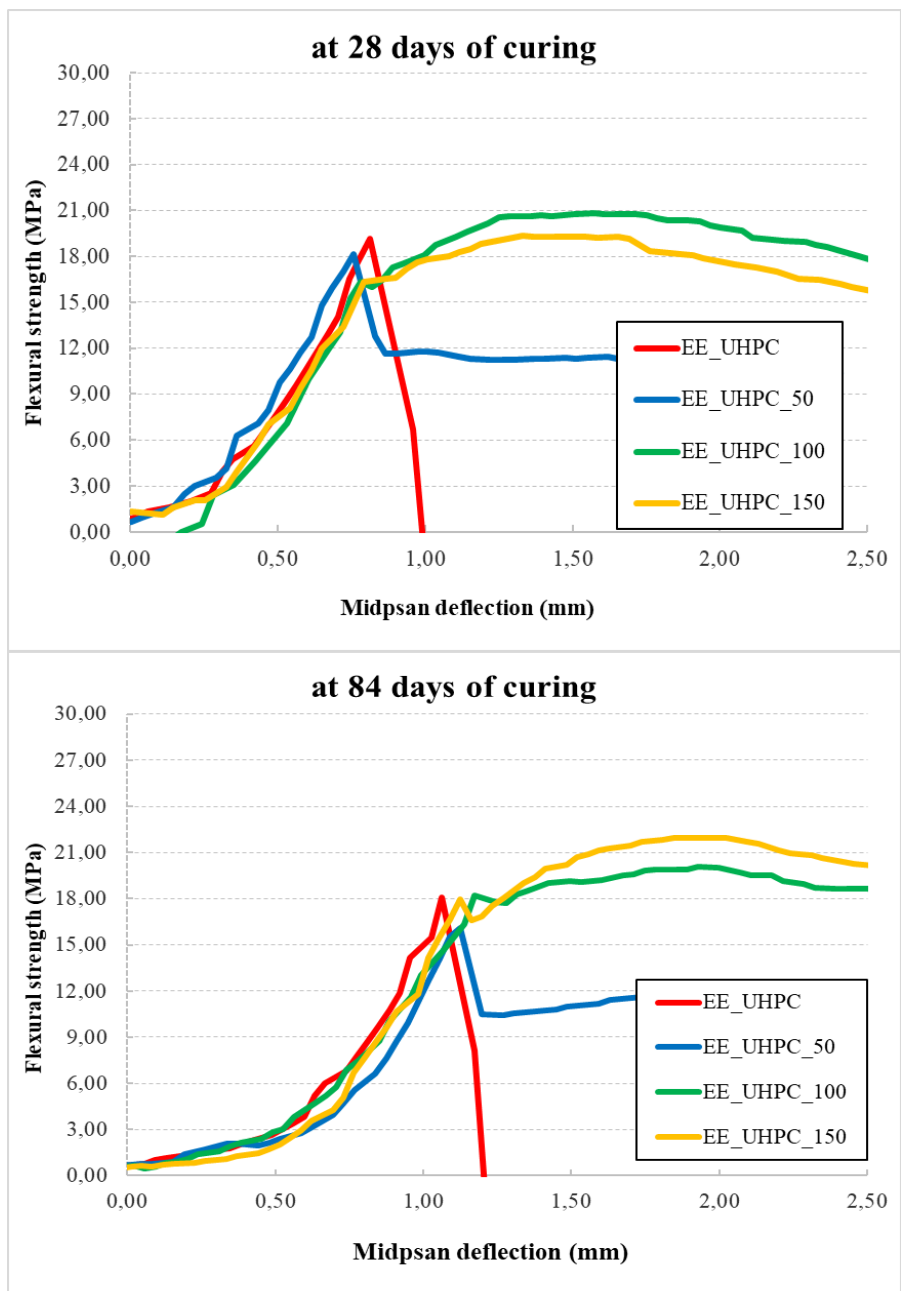


Figura 19 - Resistenza a flessione-Spostamento dopo 28 e 84 giorni di stagionatura

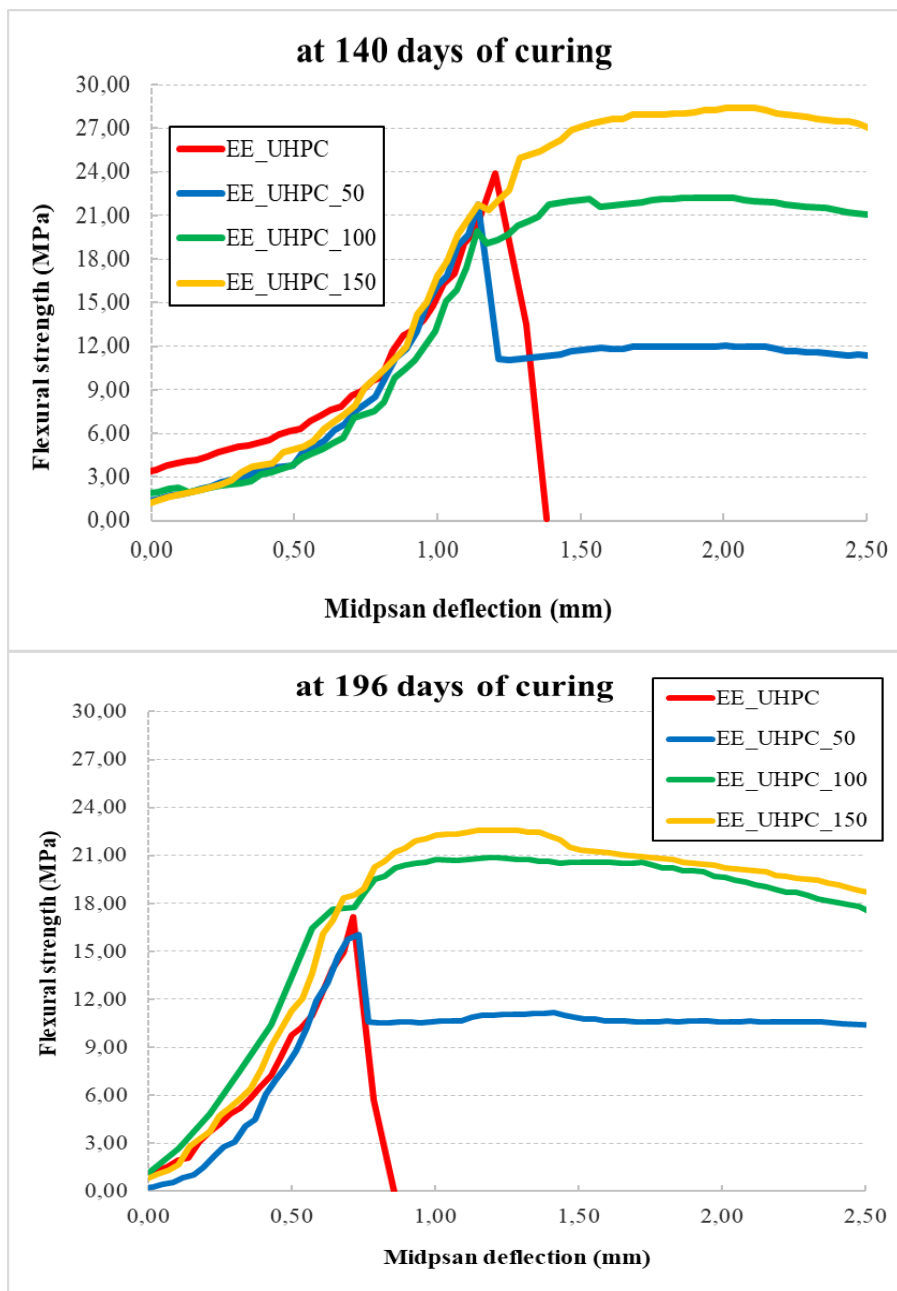


Figura 20 - Resistenza a flessione-Spostamento dopo 140 e 196 giorni di stagionatura

4.3. Conclusioni

Sulla base del lavoro sperimentale svolto si possono trarre le seguenti conclusioni:

- Il tentativo di migliorare l'eco-efficienza dell' UHPC tagliando il 30% del contenuto di cemento, e di conseguenza aumentando il rapporto acqua/cemento da 0,20 a 0,29, ha leggermente ridotto le resistenze sia a compressione che a flessione degli impasti preparati con dosaggio minimo di fibre di acciaio ottonato, mentre sembra valere il contrario per impasti ad alto dosaggio di fibre, soprattutto per il dosaggio massimo di 150 kg.
- L'aggiunta dell'agente espansivo ha comportato un effetto benefico sulla resistenza a flessione del materiale alle brevi stagionature. La matrice cementizia tende ad espandersi grazie alla presenza dell'agente espansivo, ma il suo rigonfiamento è limitato dalla presenza delle fibre d'acciaio. Questo fenomeno provoca uno stress interfacciale tra matrice e fibre e l'effetto risultante è stato in grado di migliorare la resistenza alla flessione del composito.
- La presenza del rinforzo fibroso, già ai dosaggi minimi di 50 kg/m³ (0,6% in volume) ha aumentato significativamente la resistenza a compressione del composito a causa dell'effetto di confinamento esercitato dalle fibre di acciaio. Alle lunghe stagionature è stato rilevato un aumento significativo della resistenza a compressione per tutte le miscele UHPC.

In conclusione, la presente campagna sperimentale conferma che l'UHPC eco-efficiente può essere preparato senza compromettere le prestazioni meccaniche e la durabilità tipiche dei calcestruzzi ad alte prestazioni.

SECONDO STUDIO

5. Studio del comportamento a trazione

Nel presente capitolo si riportano i risultati inerenti lo studio del comportamento a trazione di diverse miscele UHPC, aventi contenuto di fibre di acciaio uncinato (di lunghezza 30 mm) crescente dallo 0,6% fino al 2,55% in volume. Le prove di trazione uniassiale sono state eseguite su provini a forma di osso di cane senza intaglio (lunghezza di 330 mm e area della sezione trasversale di 45x30 mm²). In aggiunta è stata utilizzata la tecnica DIC (Digital Image Correlation) per misurare spostamenti e deformazioni dei provini durante la prova e per monitorare la formazione di cricche e l'evoluzione del danno durante le prove eseguite.

5.1. Materiali e composizione delle miscele

Di seguito si riportano i materiali utilizzati per la realizzazione dei provini oggetto di studio. Il cemento utilizzato è il CEM I 52,5 R . Si tratta di un cemento Portland avente conforme alla norma EN 197-1. Come aggregato sono stati opportunamente combinati due diversi tipi di sabbia di quarzo con granulometria 0-0,6 mm e 0,6-1,0 mm. Il fumo di silice è stato aggiunto con un dosaggio pari a 125 kg/m³. Inoltre è stato aggiunto un additivo superfluidificante acrilico in polvere alla dose di 1,1% in peso di cemento al fine di mantenere al minimo il rapporto acqua/cemento (a/c), pari a 0,20 in tutte le miscele.

Fibre di acciaio uncinato (mostrate in Fig. 21), lunghe 30 mm sono state aggiunte a dosaggi crescenti: 50, 100, 150 e 200 kg/m³. Le corrispondenti frazioni in volume delle fibre sono 0,6%, 1,25%, 1,9% e 2,55%. Le proporzioni della miscela sono riportate in Tabella 10, mentre le principali caratteristiche delle fibre di acciaio, riportate dal produttore, sono elencate in Tabella 11.



Figura 21 - Fibre metalliche uncinata di lunghezza 30mm

Tabella 10 - Proporzioni miscela UHPC (kg/m³)

<i>Materiali</i>	<i>UHPC</i>	<i>UHPC_50</i>	<i>UHPC_100</i>	<i>UHPC_150</i>	<i>UHPC_200</i>
Cemento 52,5 R	1000	1000	1000	1000	1000
Acqua	200	200	200	200	200
Sabbia 0/0.6 mm	400	400	400	400	400
Sabbia 0.6/1 mm	600	600	600	600	600
Fumo di silice	125	125	125	125	125
Superfluidificante	11	11	11	11	11
Fibre	-	50	100	150	200
Fibre (% volume)	-	0.6	1.25	1.9	2.55

Tabella 11 - Caratteristiche fibre metalliche uncinata utilizzate

	Lunghezza (mm)	Diametro (mm)	Rapporto d'aspetto	Modulo di Young (GPa)	Resistenza a trazione (MPa)
Fibre metalliche uncinate	30	0.7	43	170	450

5.2. Preparazione dei provini

Le prove di trazione uniassiale sono state eseguite su provini a forma di osso di cane di lunghezza 330 mm e con area della sezione trasversale nominale di 30x45 mm² (Fig. 22). Le dimensioni della sezione del provino sono state definite in modo da minimizzare l'effetto di allineamento delle fibre lungo la direzione longitudinale e, allo stesso tempo, minimizzare le sollecitazioni flessionali e l'eccentricità che potrebbero verificarsi durante le prove di trazione per provini con sezioni troppo grandi.

Le miscele definite al paragrafo precedente sono state colate in casseri di legno e dopo 2 giorni i provini induriti sono stati scasserati e stagionati in condizioni normali di laboratorio (20 °C, 70% U.R.) per 28 giorni.

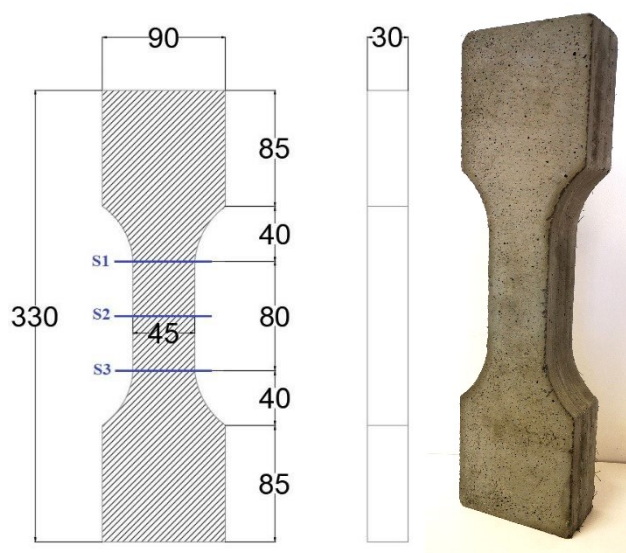


Figura 22 - Provini UHPC ad "osso di cane"

5.3. Analisi della distribuzione delle fibre

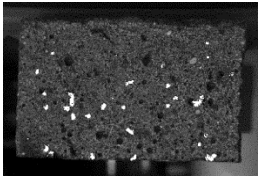
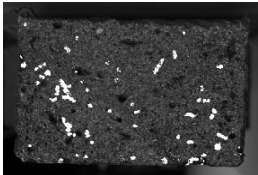
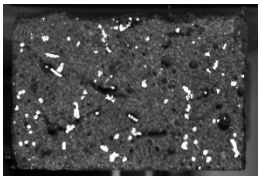
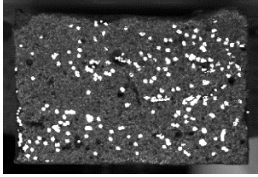
La dispersione e la distribuzione delle fibre all'interno del provino di calcestruzzo possono influenzare significativamente il comportamento meccanico del materiale [63,64]. Mentre l'allineamento delle fibre lungo l'asse del provino potrebbe essere favorevole per un elemento sottoposto a sollecitazione uniassiale o flessionale in quella direzione, sarebbero necessarie fibre orientate in maniera casuale per quelle applicazioni in cui sono presenti stati di sollecitazione multiassiale. In questo studio, la distribuzione delle fibre all'interno della sezione trasversale del campione è stata valutata attraverso analisi visive. In particolare un

campione a forma per ogni miscela è stato tagliato in tre diverse sezioni (indicate come S1, S2, S3 in Fig. 22), perpendicolari all'asse principale del campione, al fine di verificare la distribuzione delle fibre in diverse sezioni del campione. Le immagini delle sezioni trasversali dei campioni sono state acquisite utilizzando un'illuminazione a luce radente in modo tale che le fibre di acciaio, essendo riflettenti, fossero più evidenti nell'immagine (Tabella 13). Le immagini acquisite sono state convertite in immagini binarie utilizzando un software di elaborazione immagini sviluppato con Matlab. Dapprima è stata identificata l'area A_{sec} di ciascuna sezione del campione; successivamente i pixel bianchi (A_w) rappresentano l'area della sezione occupata dalle fibre di acciaio; pertanto, la percentuale di area occupata dalle fibre all'interno di ciascuna sezione (A_f) può essere calcolata come:

$$A_f = \frac{A_w}{A_{sec}}$$

L'area media occupata dalle fibre, valutata su tre sezioni per ciascun campione, $A_{f,AVG}$ e il rapporto tra $A_{f,AVG}$ e il volume nominale delle fibre all'interno della miscela sono stati riportati in Tabella 12. Dalle immagini delle sezioni trasversali della Tabella 12 è possibile osservare una non omogenea distribuzione delle fibre nei campioni con basso contenuto di fibre (UHPC_50 e UHPC_100). Tale fenomeno è probabilmente dovuto al dosaggio di WRA, che è stato mantenuto costante in tutte le miscele, producendo così matrici troppo fluide quando è stata utilizzata una bassa percentuale di fibre. Quando invece è stato adottato un dosaggio di fibre più elevato (UHPC_150 e UHPC_200) si è notata una distribuzione delle fibre più omogenea. Nonostante sia stata osservata una certa variabilità nella distribuzione delle fibre nelle tre rispettive sezioni trasversali analizzate per ciascun campione (vedi Coefficienti di variazione CoV (%) riportati in Tabella 13), è interessante osservare che il rapporto tra l'area media delle fibre all'interno della sezione trasversale ($A_{f,AVG}$) e il volume nominale delle fibre all'interno della miscela (V_f) è pressoché costante per tutte le miscele, e pari a valori compresi tra 1,7 e 1,9.

Tabella 12 -Distribuzione delle fibre nelle sezioni trasversali dei provini a forma di osso di cane

Campioni	Sezione trasversale dei campioni a forma di osso di cane	Volume nominale delle fibre nella miscela, V_f (% vol)	Area delle fibre nella sezione trasversale (% area)	Area media delle fibre nella sezione trasversale $A_{f,AVG}$ (% area)	$A_{f,AVG}/V_f$
UHPC_50		0.6	S1 = 1.08	1.08 CoV = 1.9%	1.80
			S2 = 1.06		
			S3 = 1.10		
UHPC_100		1.25	S1 = 1.89	2.36 CoV = 24.2%	1.89
			S2 = 3.00		
			S3 = 2.20		
UHPC_150		1.9	S1 = 3.83	3.28 CoV = 21.4%	1.73
			S2 = 3.52		
			S3 = 2.49		
UHPC_200		2.55	S1 = 3.79	4.34 CoV = 22.1%	1.70
			S2 = 3.79		
			S3 = 5.45		

5.4. Setup di prova

Un telaio in acciaio realizzato con piastre in acciaio saldate e quattro cilindri in acciaio (Fig. 23) è stato utilizzato per afferrare il provino e per trasferire la forza di trazione senza applicare compressione alle estremità del provino e consentendo rotazioni attorno ad un asse. Le prove di trazione sono state eseguite in controllo di spostamento (velocità di carico di 0,5 mm/min) con una macchina per prove di trazione avente una capacità di carico di 50 kN. La sollecitazione di trazione σ è stata calcolata dividendo il carico di trazione per la sezione trasversale del provino. La tecnica Digital Image Correlation (DIC) è stata utilizzata per monitorare deformazioni e spostamenti su un'area selezionata del campione (area rossa in Figura 23).

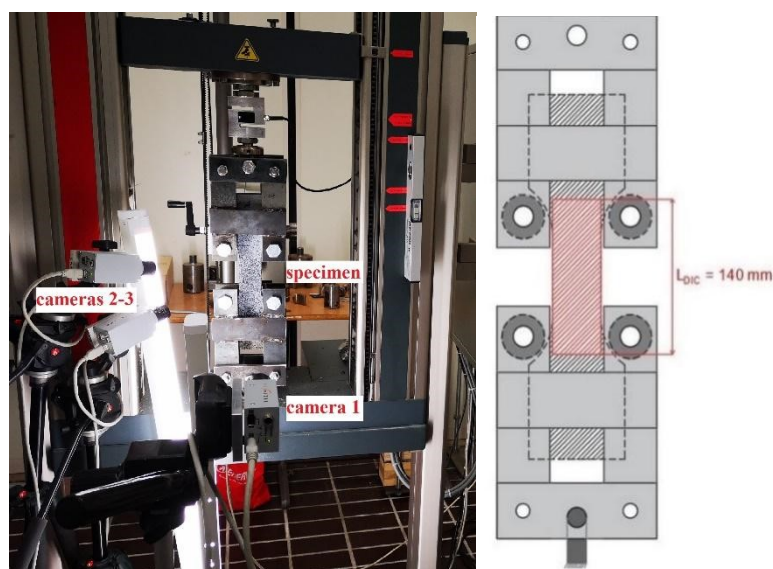


Figura 23 - Setup di prova per i test di trazione uniassiale e area di acquisizione della DIC

5.4.1. Digital Image Correlation

La misurazione degli spostamenti e delle deformazioni dei provini UHPC durante le prove di trazione è stata eseguita utilizzando un metodo ottico, ovvero la tecnica di Digital Image Correlation (DIC). Questa è una tecnica di misura senza contatto utile alla stima degli spostamenti e delle deformazioni che basa il suo funzionamento sull'elaborazione di immagini digitali acquisite, ritraendo l'oggetto da esaminare nelle diverse condizioni di sollecitazione interessate. I punti di forza principali della DIC risiedono, oltre che nella relativa semplicità dell'acquisizione dei dati, nella sua capacità di fornire una misurazione particolarmente densa e nella possibilità di analizzare campi di spostamenti/deformazioni

anche ingenti, se comparati con i tradizionali metodi di misura (**capitolo prove di trazione**). Nel caso specifico per eseguire l'analisi DIC, sono state utilizzate tre fotocamere digitali (modello Pixelink® B371F) per acquisire immagini delle superfici frontali e laterali dei campioni durante tutti i test. La figura 23 mostra il setup di prova utilizzato durante i test: la telecamera 1, posta a circa 600 mm di distanza dal campione, è stata utilizzata per acquisire l'intera superficie frontale. Le telecamere 2 e 3, poste a circa 200 mm dal campione, sono state utilizzate per acquisire la superficie laterale e frontale nella zona centrale dei provini. Le superfici dei campioni sono state preparate precedentemente in maniera adeguata con un motivo a macchie bianche e nere e illuminate utilizzando un riflettore al neon durante le prove di trazione. Un esempio di immagini dei campioni verniciati, con sovrapposta la griglia virtuale utilizzata nell'analisi DIC, è riportato in Fig. 24.

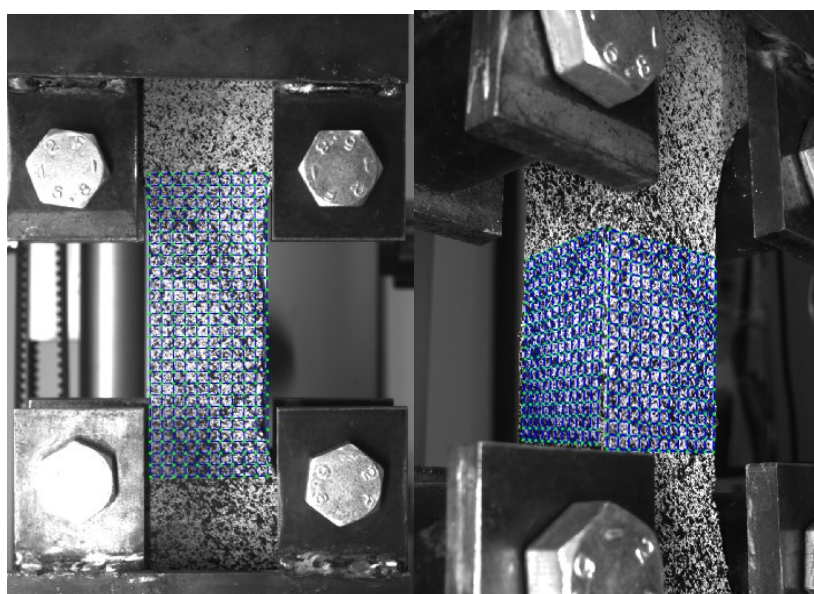


Figura 24 – Superfici verniciate con una griglia virtuale sovrapposta necessaria per l'analisi DIC

Le immagini acquisite durante i test sono state post-elaborate da un software DIC. Tali analisi hanno permesso il calcolo delle deformazioni riportate in Tabella 13 ($\varepsilon_{t,c}$, $\varepsilon_{t,max}$) e quelle delle curve sperimentali di Fig. 25. La deformazione globale è stata calcolata misurando la deformazione media su una lunghezza pari a 140 mm (Fig 23), in modo da includere tutte le fessure formatesi durante la prova di trazione. Una sequenza di mappe di deformazione, misurate in diversi istanti, è riportata nel capitolo successivo (Fig. 26)

5.5. Risultati delle prove di trazione

I risultati delle prove di trazione diretta in termini di sollecitazione di trazione alla prima fessurazione $\sigma_{t,c}$, massima sollecitazione di trazione $\sigma_{t,max}$, deformazione assiale alla prima fessurazione $\varepsilon_{t,c}$ e deformazione alla massima sollecitazione di trazione $\varepsilon_{t,max}$ sono riportati nella Tabella 13 come valori medi di 3 campioni per ogni miscela, con il corrispondente Coefficiente di Variazione (%) tra parentesi tonde.

Tabella 13 - Risultati sperimentale delle prove di trazione diretta sui provini ad ossi di cane

Campioni	$\sigma_{t,c}$ (MPa)	$\sigma_{t,max}$ (MPa)	$\varepsilon_{t,c}$ (%)	$\varepsilon_{t,max}$ (%)
UHPC	5.65 (17%)	5.65 (17%)	0.037 (28%)	0.037 (28%)
UHPC_50	3.74 (17%)	4.49 (14%)	0.029 (31%)	0.07 (19%)
UHPC_100	4.90 (5%)	5.40 (6%)	0.035 (17%)	0.20 (43%)
UHPC_150	3.93 (14%)	5.88 (17%)	0.036 (25%)	0.56 (5%)
UHPC_200	6.14 (14%)	8.11 (10%)	0.062 (34%)	0.87 (40%)

La Figura 25 mostra le curve tensione-deformazione dei campioni UHPC analizzati aventi diverso contenuto di fibre di acciaio uncinato. I campioni senza fibre (UHPC) hanno mostrato un comportamento elastico lineare fino a rottura (Fig. 25a), con la formazione di una singola fessura passante. La rottura è stata di tipo fragile dopo la formazione di una crepa unica. L'aggiunta di fibre di acciaio uncinato, anche al dosaggio più basso (0,6% in volume), è stata in grado di evitare rotture fragili ed ha consentito al provino di subire una deformazione plastica dopo la formazione della prima cricca (Fig. 25b). Un aumento del volume delle fibre dallo 0,6 al 2,55% comporta un aumento della resistenza a trazione del composito $\sigma_{t,max}$ da 4,5 a 8,1 MPa, nonché un aumento della deformazione massima post-fessurazione $\varepsilon_{t,max}$ da 0,07 a 0,87%. L'effetto ponte esercitato dalle fibre di acciaio attraverso le cricche si è manifestato in tutti i campioni fibrorinforzati, indipendentemente dalla quantità di fibre utilizzate.

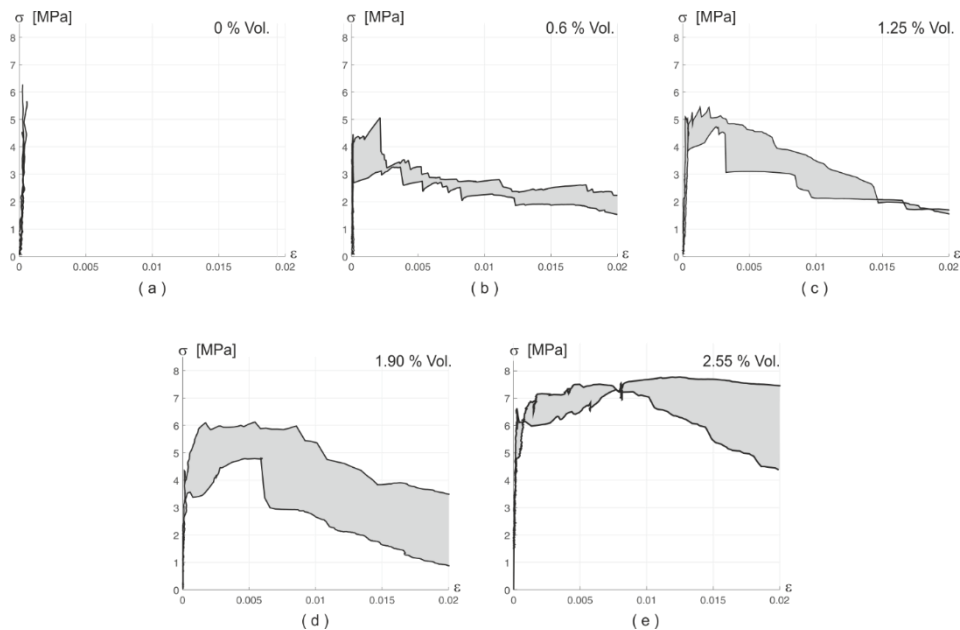


Figura 25 - Curve Sforzo-Deformazione relative alle prove di trazione diretta eseguite sui provini ad osso di cane

È interessante notare che il comportamento post-fessurazione è cambiato variando la frazione di volume delle fibre. Osservando le curve sforzo-deformazione, per bassi dosaggi di fibre di acciaio (0,6% e 1,25%) si osserva un comportamento di softening dopo la formazione della prima cricca (Fig. 25 b,c), mentre in provini rinforzati con dosaggi maggiori di fibre (1,9% e 2,55%) il comportamento post-fessurativo è di tipo hardening (Fig. 25 d, e).

Con il contenuto minimo di fibre (50 o 100 kg/m³) solo una o due lesioni visibili si sono formate all'interno della sezione trasversale del campione (Fig. 25a), e una di esse si è propagata ed ha continuato a crescere nel ramo di softening fino al collasso. Il comportamento post-fessurazione è cambiato al superamento di una certa soglia nella frazione volumetrica delle fibre (valore compreso tra 1,25% e 1,9%), portando alla formazione di più micro-fessure lungo l'intera lunghezza del provino (Fig. 25b) e la variazione del comportamento post-fessurativo da un comportamento di softening (incrudimento negativo) ad uno di tipo hardening (incrudimento positivo). Il volume di fibre che consente di ottenere un comportamento di incrudimento positivo, nel caso di fibre di acciaio uncinato, è solitamente pari o superiore al 2%, come confermato anche da altri studi in letteratura per diverse miscele UHPC [59,65].

La tensione di trazione relativa alla prima fessurazione ($\sigma_{t,c}$) non ha mostrato alcun miglioramento aumentando il dosaggio del rinforzo fibroso. Al contrario, quando è stato utilizzato un dosaggio di fibre basso, la formazione della prima cricca è stata raggiunta a sollecitazioni di trazione inferiori rispetto ai campioni UHPC senza fibre. Tale risultato è probabilmente dovuto ad una cattiva dispersione e ad una certa segregazione delle fibre all'interno della sezione (vedi sezione di UHPC_50 in Tabella 13), oppure alla presenza di

alcuni vuoti d'aria che hanno ridotto la sezione resistente e anticipato la formazione della prima fessura (vedi sezione di UHPC_150 in Tabella 13). Solo quando è stato utilizzato il dosaggio più elevato di fibre (UHPC_200) la resistenza a trazione alla prima fessurazione è aumentata, poiché l'elevata quantità di fibre è stata in grado di contrastare l'eventuale presenza di difetti nella matrice.

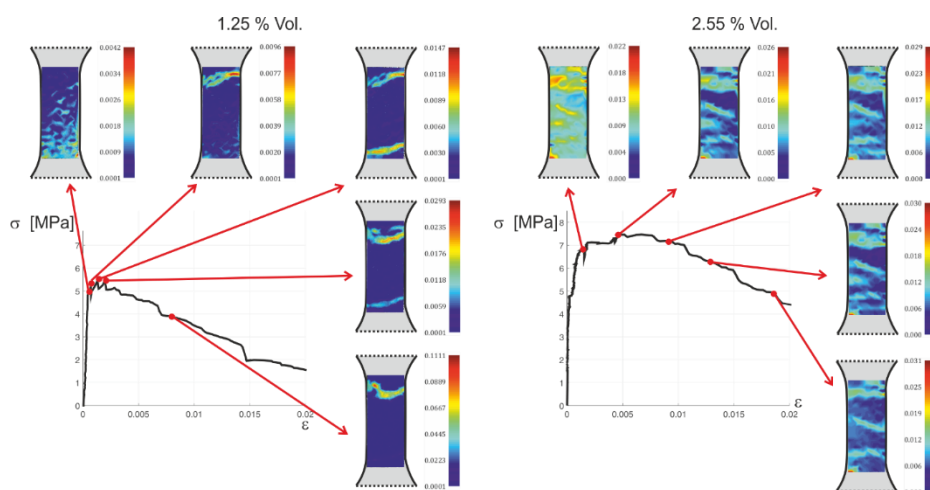


Figura 26 - Mappa della deformazione frontale di campioni a forma di osso di cane in diversi passaggi della curva sforzo-deformazione: (a) UHPC_100, (b) UHPC_200.

TERZO STUDIO

6. Studio della durabilità del materiale

La prima parte di questo capitolo contiene i risultati di una serie di prove di determinazione del ritiro assiale su miscele UHPC. Obiettivo della campagna è la valutazione sperimentale del ritiro sia alle brevi che alle lunghe stagionature su provini UHPC sottoposti a condizioni variabili sia in termini di temperatura che di umidità relativa (U.R.).

Nella seconda parte del capitolo vengono invece presentati i risultati di prove di durabilità realizzate sempre su provini UHPC. In particolare sono state condotte prove colorimetriche per la determinazione della penetrabilità dello ione cloruro, prove di resistenza ai cicli di gelo-disgelo, analisi porosimetriche e analisi visive al microscopio ottico.

6.1. Prove di ritiro igrometrico

Nel presente paragrafo sono riportati i risultati di prove di misura della deformazione assiale per ritiro, eseguite su provini UHPC.

Il primo scopo di questo lavoro è verificare l'influenza positiva dell'agente espansivo a base di CaO sulla riduzione del ritiro autogeno degli UHPC. In particolare, è stata valutata l'influenza dell'utilizzo combinato di agente espansivo e additivo riduttore di ritiro, SRA, sul fenomeno del ritiro alle brevi stagionature. Infatti una delle problematiche che affligge i calcestruzzi caratterizzati da un basso valore di rapporto a/c è la tendenza a fessurarsi, durante i primi giorni di maturazione, a causa del ritiro.

Il secondo scopo è quello di valutare l'influenza dell'agente espansivo a base di CaO sulla resistenza a flessione degli UHPC ad alto volume di fibre metalliche. In effetti, in letteratura sono riportati esempi in cui un miglioramento della trazione e delle resistenze flessionali sono stati ottenuti grazie ad una certa sinergia tra agente espansivo e fibre di acciaio [65,66].

6.1.1. Materiali e preparazione dei provini

I provini sono stati preparati e confezionati presso il Laboratorio Materiali del Dipartimento di Scienze e Ingegneria della Materia, dell'Ambiente ed Urbanistica (SIMAU). In particolare sono stati realizzati provini prismatici di dimensioni $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ aventi stessa composizione ma contenuto di additivo espansivo crescente. La composizione delle miscele realizzate è riportata in Tabella 14.

Il cemento utilizzato è il CEM I 52,5 R. Si tratta di un cemento Portland avente requisiti in accordo alla norma EN 197-1.

Gli aggregati utilizzati sono di due tipologie: sabbia di granulometria compresa tra 0-1 mm al 30% e sabbia con granulometria compresa tra 0-2 mm al 70%. Il Fumo di silice utilizzato è un prodotto in polvere di forma prevalentemente sferica, costituito da silice amorfa submicronica, privo di qualsiasi composto cristallino. Tale componente ha elevata superficie specifica ($15\text{-}20 \text{ m}^2/\text{g}$), altissima attività pozzolanica e grandi proprietà fillerizzanti. Gli additivi utilizzati sono: additivo superfluidificante acrilico in polvere di ultima generazione per migliorare la lavorabilità dell'impasto ed evitare i rischi di segregazione della miscela; additivo chimico antibolle per ridurre la formazione di aria durante la miscelazione. Sono stati aggiunti inoltre agente espansivo e additivo antiritiro, che insieme mitigano il fenomeno del ritiro soprattutto alle brevi stagionature. Infine sono state aggiunte fibre dritte in acciaio ottonate, di lunghezza 13 mm e diametro 0,2 mm.

Per ciascuna miscela sono stati prodotti tre provini prismatici ($40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$) al fine di valutare il ritiro libero da essiccamento (free unrestrained drying shrinkage) in accordo alla norma UNI EN 12390-16. Le miscele realizzate sono state colate in casseri d'acciaio e vibrare per 30 secondi dopo la colata, al fine di eliminare le bolle d'aria. Dopo 24h dal getto, i provini sono stati scasserati, avvolti con la pellicola di plastica e fatti maturare per i primi 3 giorni in

acqua e per il resto del tempo in camera climatica a temperatura costante di $20 \pm 2^\circ \text{C}$ e 50% di umidità relativa. La misura del ritiro è stata effettuata rispettivamente a 7h, 1,2,3,7,14,21,28 e 56 giorni dal getto.

Per completare la campagna sperimentale, sono stati realizzati altri nove provini prismatici (40 x 40 x 160 mm) al fine di valutare l'influenza dell'agente espansivo anche sul comportamento meccanico delle miscele in esame. In questo caso, dopo 24h dal getto, i provini sono stati scasserati e fatti maturare in acqua avvolti nella pellicola di plastica. Sono stati mantenuti sott'acqua fino al giorno delle prove, rispettivamente 3,7 e 28 giorni dal getto. Ad ogni step temporale sono stati testati 3 provini a flessione su 3 punti (UNI EN 1015-11), poi a compressione (UNI EN 1015-11).

Tabella 14 - Composizione miscele per prove di ritiro

<i>Materiali</i>	<i>UHPC_EA 25</i>	<i>UHPC_EA 30</i>	<i>UHPC_EA 35</i>	<i>UHPC_EA 40</i>
Cemento 52,5 R	720	720	720	720
Sabbia 0-0.1 mm	410	410	410	410
Sabbia 0.5-1.1 mm	945	945	945	945
Fumo di silice	100	100	100	100
Superfluidificante	11	11	11	11
Espansivo	25	30	35	40
Antiritiro (SRA)	9	9	9	9
Antibolle	6	6	6	6
Acqua	245	245	245	245
Fibre	150	150	150	150

6.1.2. Discussione dei risultati

I risultati delle prove di ritiro assiale eseguite sui campioni UHPC di dimensioni 40x40x160 cm³ relativi alle prime miscele realizzate sono riportati in Figura 27.

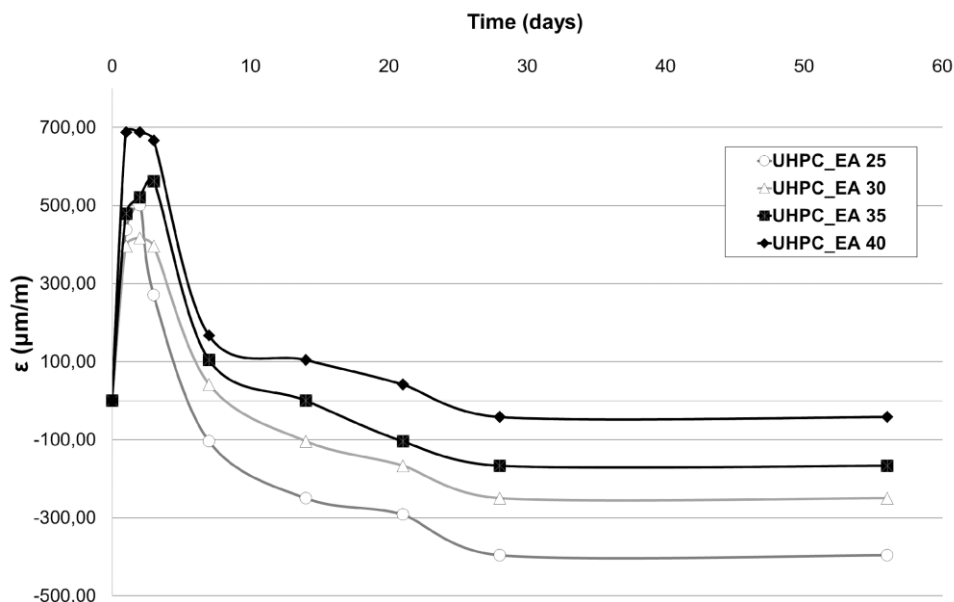
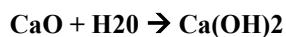


Figura 27 - Free (Unrestrained) drying shrinkage - tempo di esposizione

Le curve di ritiro/espansione in funzione del tempo di esposizione ottenute mostrano tutte lo stesso andamento: espansione durante i primi tre giorni di stagionatura umida e fase di ritiro fino al 28° giorno durante la stagionatura a temperatura e umidità costanti, rispettivamente $20 \pm 2^\circ \text{C}$ e 50%. La misura si è poi mantenuta costante per tutte e 4 le tipologie di miscela tra il 28° e il 56° giorno. In accordo a Collepardi et al. [67], i provini sono stati maturati in ambiente umido per i primi tre giorni. Dal suddetto studio è stato dimostrato infatti che l'agente espansivo mostra la sua massima efficacia quando la stagionatura del materiale avviene in ambiente umido.

Come si evince dal grafico aumentando il contenuto di agente espansivo, aumenta di pari passo l'espansione iniziale e diminuisce il valore di ritiro finale. Tale reazione di espansione è dovuta al processo chimico per cui l'ossido di calcio, contenuto nell'espansivo, aumenta il volume dell'impasto trasformandosi, per reazione con l'acqua, nel corrispondente idrossido, come risulta dalla seguente reazione:



La miscela contenente contenuto massimo di agente espansivo (40 kg/m³) ha raggiunto un elevato valore di espansione iniziale ($\approx + 700 \mu\text{m/m}$) e il più basso valore di ritiro finale registrato ($\approx - 30 \mu\text{m/m}$).

Tali risultati sono probabilmente dovuti anche all'utilizzo dell'additivo riduttore di ritiro, *SRA*. Secondo Berke et al. [68] l'efficacia dell' *SRA* è da attribuire alla diminuzione della tensione superficiale dell'acqua. Questo riduce la tensione capillare P causata dalla formazione di menischi d'acqua sviluppatasi nei pori capillari e responsabili del ritiro della pasta di cemento. Nell'aggiunta combinata dell'additivo *SRA* con un agente espansivo a base di CaO , si registra una sinergia basata su due effetti (Fig.28) : (α) quello atteso basato sulla riduzione del ritiro alle lunghe stagionature quando il calcestruzzo è esposto all'aria insatura di vapore ($\text{UR} = 65\%$), e quello inatteso (β), ma altrettanto benefico, basato sulla maggiore espansione del calcestruzzo durante la sua stagionatura umida iniziale (con $\text{UR} = 99\%$) all'interno dei casseri o mediante protezione con teli impermeabili [69].

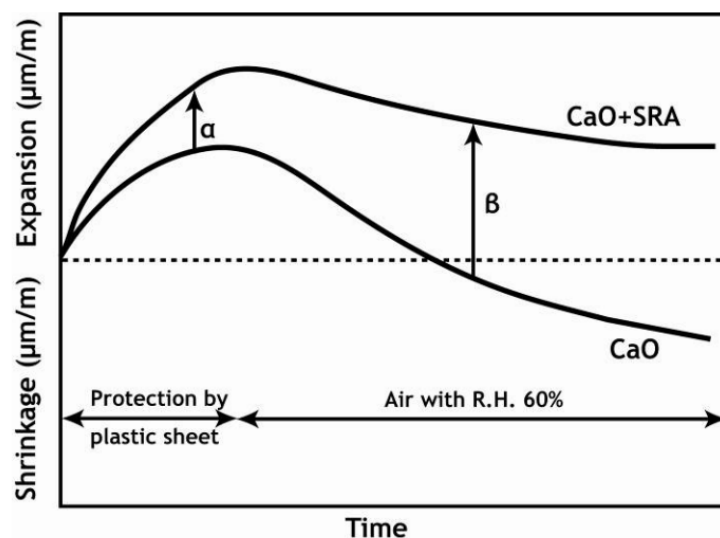


Figura 28 - Rappresentazione schematica dell'influenza dell'*SRA* sul ritiro del calcestruzzo [69]

A completamento del lavoro sono state eseguite prove meccaniche su provini $40 \times 40 \times 160 \text{ cm}^3$ al fine di valutare l'influenza dell'agente espansivo anche sulle prestazioni meccaniche del composito. I risultati delle prove di compressione e delle prove di flessione su 3 punti sono riportati rispettivamente in Figura 29 e Figura 30.

I valori ottenuti dimostrano come la presenza dell'agente espansivo ha prodotto un effetto sorprendente soprattutto alle brevissime stagionature, con valori di resistenza a flessione a 3 giorni compresi tra i 13 e 18 MPa. Il motivo di questo comportamento è probabilmente dovuto ad un effetto sinergico tra agente espansivo e la fibra omogeneamente dispersa nella matrice del composito [60]. Infatti, durante le prime 24-48 ore dalla miscelazione degli ingredienti, la matrice cementizia grazie alla presenza dell'agente espansivo tenderebbe ad

espandersi, ma il suo rigonfiamento viene contrastato e completamente (o quasi) annullato dal rinforzo fibroso. Questo fenomeno produrrebbe una reciproca sollecitazione tra fibre e matrice, e l'effetto risultante (se l'aderenza tra pasta di cemento e fibra viene mantenuta) potrebbe essere una precompressione interna omogenea in grado di aumentare la resistenza a flessione degli UHPFRC.

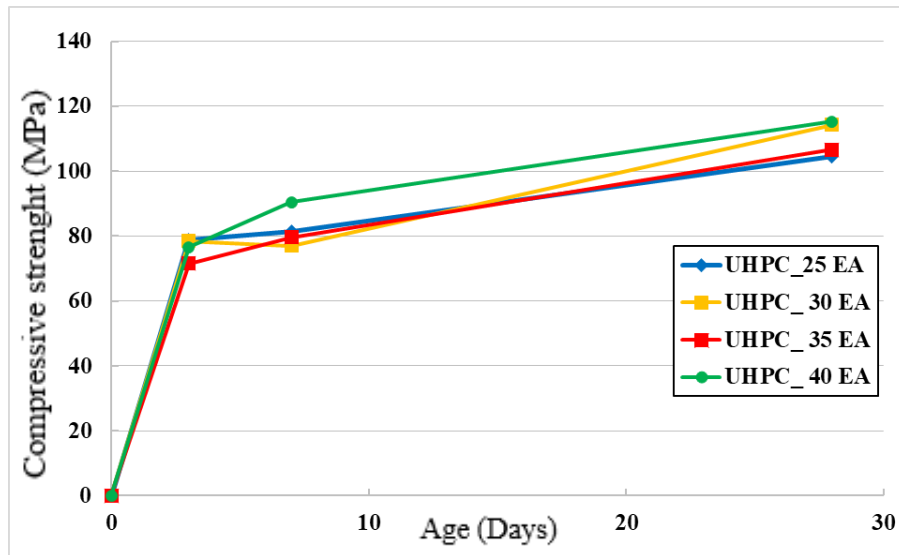


Figura 29 - Resistenza a compressione - Tempo di stagionatura

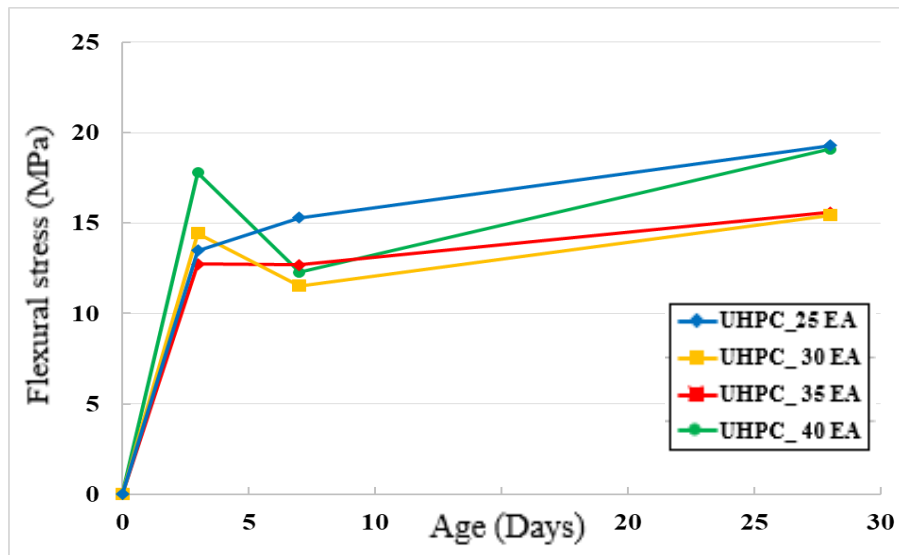


Figura 30 - Resistenza a flessione - Tempo di stagionatura

6.2. Prove di caratterizzazione chimico-fisica

Nel presente paragrafo sono riportati i risultati di una serie di prove chimico-fisiche (prove colorimetriche per la determinazione della penetrabilità dello ione cloruro, analisi porosimetriche, analisi visive al microscopio ottico, prove di assorbimento e prove di resistenza ai cicli gelo-disgelo) realizzate su provini UHPC.

6.2.1. Preparazione dei campioni

I provini sono stati preparati e confezionati presso il Laboratorio Materiali del Dipartimento di Scienze e Ingegneria della Materia, dell'Ambiente ed Urbanistica (SIMAU). In totale sono stati realizzati 27 provini di dimensioni 10x10x10 cm³.

Nel caso oggetto di studio, è stata realizzata una miscela UHPC avente composizione riportata in Tabella 15.

Tabella 15 - Composizione miscela oggetto di studio

<i>Materiali</i>	<i>Kg/m³</i>
Cemento 52,5 R	720
Sabbia 0-0.1 mm	410
Sabbia 0.5-1.1 mm	945
Fumo di silice	100
Superfluidificante	11
Espansivo	25
Antiritiro (SRA)	9
Antibolle	5
Acqua	245
Fibre	150

I materiali utilizzati sono i medesimi utilizzati al capitolo §6.1.1. Una volta pesati i materiali, questi sono stati miscelati in betoniera fino al raggiungimento di un impasto uniforme, omogeneo e senza grumi visibili. A questo punto il materiale è stato colato all'interno dei casseri e fatto vibrare per alcuni secondi fino alla completa eliminazione delle bolle d'aria. I getti sono stati coperti con pellicola di nylon per limitare l'evaporazione dell'acqua. Dopo un giorno i provini sono stati scasserati e catalogati. In totale sono stati realizzati 27 provini di

dimensioni 10x10x10 cm³ destinati a prove di durabilità e prove meccaniche di compressione: 9 provini sono stati fatti maturare in soluzione di acqua e sale (contenuto NaCl = 5%) per determinare la penetrazione degli ioni cloruro. I restanti provini sono stati fatti maturare in acqua avvolti dalla pellicola di plastica.

6.2.2. Prove colorimetriche per la determinazione della penetrabilità dello ione cloruro

Per determinare lo spessore di conglomerato penetrato dalle diverse sostanze che possono attaccare il calcestruzzo, esistono alcuni metodi cosiddetti colorimetrici, in quanto le zone di conglomerato penetrate assumono una colorazione marcatamente diversa da quella del calcestruzzo non interessato dalla penetrazione della sostanza aggressiva. In particolare, in accordo alla norma UNI 7928 per determinare lo spessore di calcestruzzo penetrato dal cloruro esiste un metodo colorimetrico, basato sull'impiego di due soluzioni: una a base di fluoresceina (0,1 g in 100 cm³ di alcol etilico al 70%) e l'altra contenente nitrato d'argento in concentrazione acquosa pari a 0,1 mol/l (17g/l). Spruzzando alternativamente la soluzione di fluoresceina e quella di nitrato di argento sulla superficie di frattura è possibile individuare il fronte di avanzamento degli ioni cloro. Infatti nelle zone penetrate dal cloruro, il nitrato di argento (AgNO₃) si trasforma in cloruro d'argento e grazie alla presenza della fluoresceina conferisce al conglomerato una colorazione variabile, a seconda dei casi, dal rosa pallido al marroncino molto chiaro. Nelle zone di calcestruzzo non penetrate dal cloruro invece il nitrato di argento si ossida ed assume una colorazione variabile dal marrone molto scuro al nero. La formazione dell'ossido di argento è favorita dalla presenza di luce solare. Tale metodo, proposto da Collepari nel lontano 1972 è stato successivamente adottato dall'UNI come Norma Italiana UNI 7928.

Nel caso in esame tale procedimento è stato ripetuto su provini cubici aventi dimensioni 10x10x10 cm³ in UHPC fatti maturare in soluzione di acqua e sale (NaCl 5%). Nel dettaglio le prove colorimetriche sono state ripetute rispettivamente a 1,2 e 3 mesi di stagionatura. Ad ogni step tre provini sono stati tagliati in mezzera e la prova è stata condotta su ciascuna delle due metà in cui essi sono risultati divisi, per un totale di 6 test ad ogni periodo di riferimento. In Figura 31 vengono riportate le varie fasi del test colorimetrico.

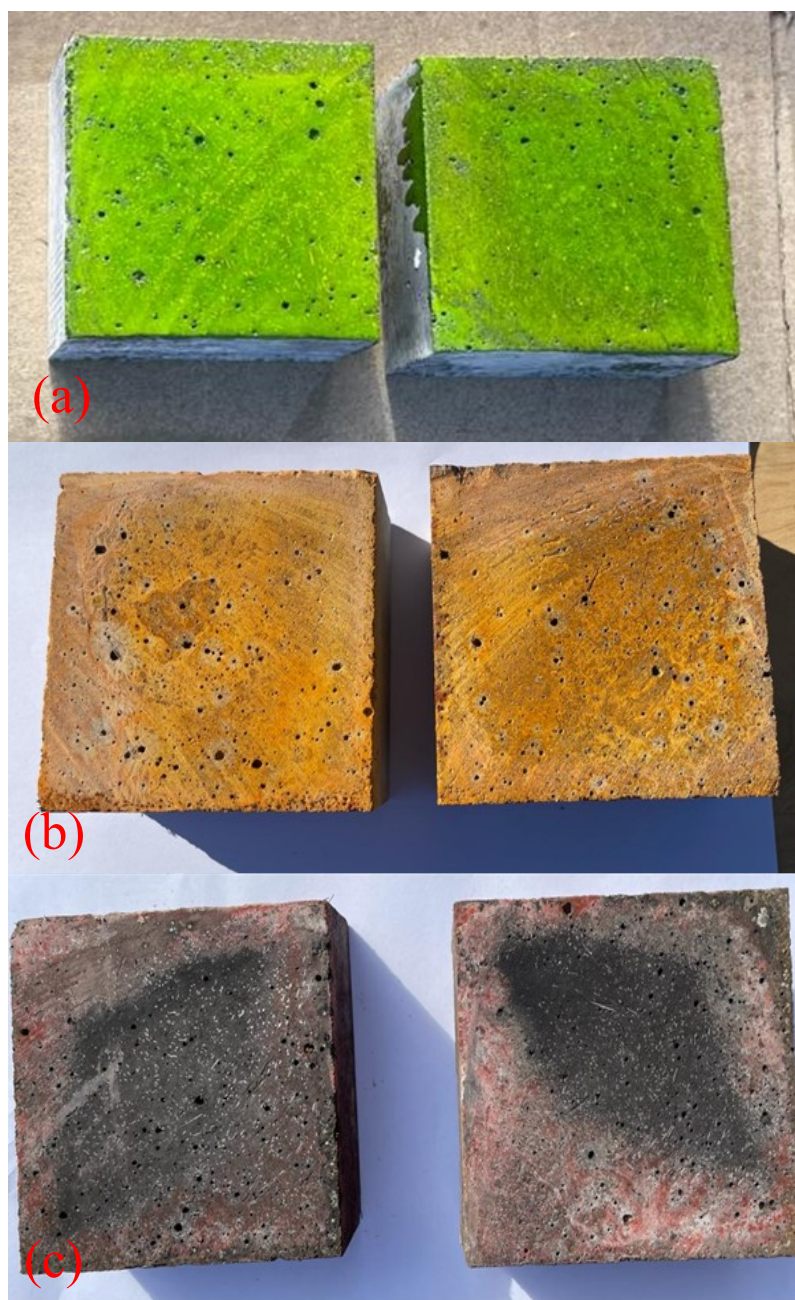


Figura 31 - Cubetti spruzzati con la fluoresceina (a); reazione al sole della fluoresceina (b); reazione con nitrato d'argento (c)

Una volta terminata la reazione chimica, è stata determinata la profondità di penetrazione dello ione cloruro. A titolo esemplificativo si riportano immagini di provini campione in cui risulta visibile il fronte di avanzamento dello ione cloruro, caratterizzato dal colore marroncino chiaro (Figura 32).



Figura 32 - Fronte di avanzamento dello ione cloruro

Nello specifico abbiamo suddiviso la superficie del provino in una scacchiera (Figura 33). La profondità di avanzamento è stata calcolata come media della misura dei soli quadrati centrali per ogni lato del provino. Non abbiamo preso in considerazione il valore registrato agli spigoli del provino in quanto avviene la sovrapposizione degli effetti nelle due direzioni che porta ad una misura alterata.

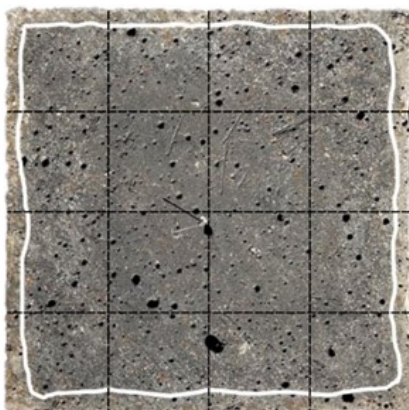


Figura 33 – Provino suddiviso a scacchiera per la determinazione della profondità dello ione cloruro

Misurati gli spessori di calcestruzzo di colore chiaro (x) in funzione dei tempi (t) di diffusione sono state tracciate le curve di penetrazione del cloruro, come quelle presentate in Figura 34.

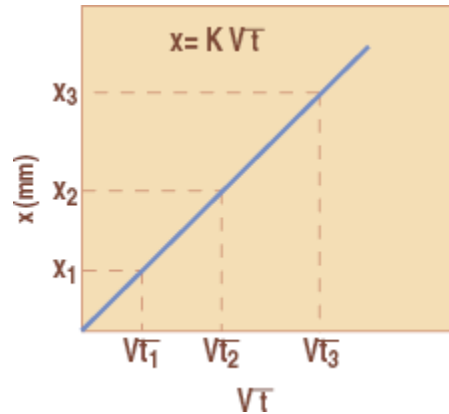


Figura 34 - Spessore di calcestruzzo penetrato dal cloruro (x) in funzione del tempo (t) di esposizione alla soluzione acqua-cloruro [70]

In accordo a Collepari et al. [70], è stato dimostrato che il valore di K , che appare nella Figura 34, è correlabile con il coefficiente di diffusione (D) del cloruro che appare nella soluzione della seconda legge di Fick:

$$x = K \cdot t^{1/2} = 4(Dt)^{1/2}$$

In altre parole, il coefficiente angolare (K) della retta della Figura 34 calcolato con qualche determinazione di penetrazione (x) del cloruro a tempi vari (t) mediante il saggio colorimetrico con nitrato d'argento e fluoresceina – consente di calcolare molto semplicemente il coefficiente di diffusione (D) mediante la l'equazione:

$$D = K^2/16$$

6.2.2.1. Discussione dei risultati

In Tabella 16 sono riportati i valori di coefficienti di diffusione (D) ottenuti dai provini oggetto di studio tramite l'equazione riportata nel precedente capitolo. Il valore medio del coefficiente di diffusione D ottenuto è pari a 3,95 mm²/anno. Confrontando il valore D medio ottenuto con i valori di coefficiente di diffusione del cloruro in calcestruzzi con diversi cementi ("Il nuovo Calcestruzzo", M. Collepari) riportati in Tabella 17, si evince che il valore ottenuto dalle prove sperimentali è un valore estremamente basso, indice del buon grado di compattazione della matrice cementizia ottenuto grazie al ridotto rapporto a/c e all'utilizzo di materiali ad elevata attività pozzolanica.

Tabella 16 - Coefficienti di diffusione del cloruro ottenuti dai test colorimetrici eseguiti

<i>Coefficiente di diffusione del cloruro D (mm²/anno)</i>	
Provino A	3,94
Provino B	3,54
Provino C	4,38

Tabella 17 - Coefficienti di diffusione del cloruro (D) in calcestruzzi (a/c = 0,50) con diversi cementi (Il Nuovo Calcestruzzo, Collepari)

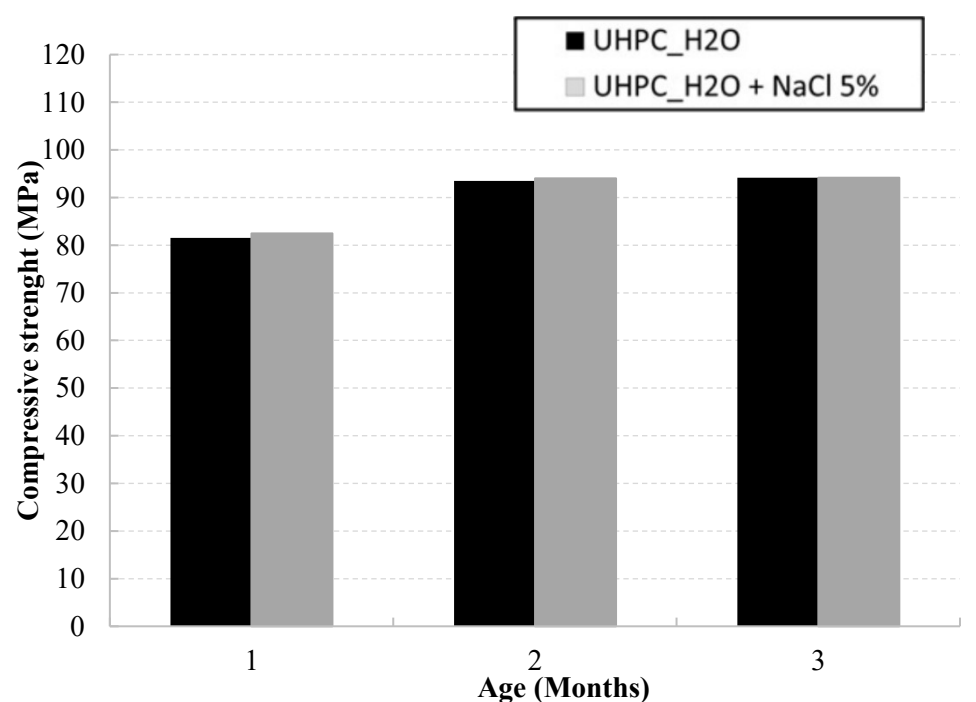
<i>Cemento</i>	<i>Grado di compattazione</i>	<i>Temperatura °C</i>	<i>D mm²/anno</i>
Portland CEM I	1,00	10	25
Portland CEM I	1,00	25	50
Portland CEM I	1,00	40	100
Portland CEM I	0,95	25	100
Pozzolánico CEM IV	1,00	10	20
Pozzolánico CEM IV	1,00	25	30
Pozzolánico CEM IV	1,00	40	40
Pozzolánico CEM IV	0,95	25	60
D'altoforno CEM III	1,00	25	20
D'altoforno CEM III	0,95	25	50

- con a/c=0,40 i valori di D sono di un ordine di grandezza minore

A completamento del lavoro sono state eseguite prove meccaniche di compressione su provini cubici di lato 10 cm. I provini confezionati presso il Laboratorio Materiali del Dipartimento di Scienze e Ingegneria della Materia, dell'Ambiente ed Urbanistica (SIMAU), sono stati successivamente testati presso il Laboratorio Prove Materiali e Strutture del Dipartimento DICEA di Ancona. Una metà dei provini sono stati fatti maturare in acqua e l'altra metà in soluzione di acqua e sale (NaCl 5%) per valutare l'effetto di un' eventuale penetrazione degli ioni cloruro sulle caratteristiche meccaniche del composito. I risultati delle prove di compressione sono riportati rispettivamente in Figura 35.

Come si evince dalla figura, all'aumentare del tempo di stagionatura, per entrambe le condizioni di stagionatura, la resistenza a compressione è aumentata di circa un 10% tra 1 mese e 3 mesi di stagionatura. La minima profondità di penetrazione dei cloruri, studiate tramite test colorimetrico descritto in precedenza, non ha minimamente influito sulla resistenza meccanica a compressione del composito. Ad ogni step temporale, la resistenza meccanica a compressione dei provini maturati in acqua, è praticamente la stessa di quelli maturi in soluzione di acqua e sale (NaCl 5%).

Figura 35 – Resistenza a compressione – tempo di stagionatura (Provini 10x10x10 cm³)



6.2.3. Analisi visiva al microscopio ottico

La microscopia ottica è una tecnica di osservazione che consente di riprodurre immagini ingrandite di oggetti o particolari di essi, troppo piccoli per essere osservati ad occhio nudo. Il microscopio ottico è costituito da 2 sistemi di lenti inserite in un tubo ottico: l'oculare, in cui si guarda, e l'obiettivo, situato in prossimità dell'oggetto da osservare. L'oggetto da osservare viene illuminato e la sua immagine viene poi ingrandita dal sistema ottico.

Nel caso in esame tale analisi è stata condotta su campioni prelevati da provini cubici $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ fatti maturare in soluzione di acqua e sale (NaCl 5%). Le analisi visive al microscopio ottico sono state effettuate in 3 step temporali coincidenti con 1, 2 e 3 mesi di stagionatura. Ad ogni step temporale un provino è stato tagliato in mezzera e sono stati prelevati due campioni a 1 cm e 5 cm dalla faccia superiore (Figura 36).

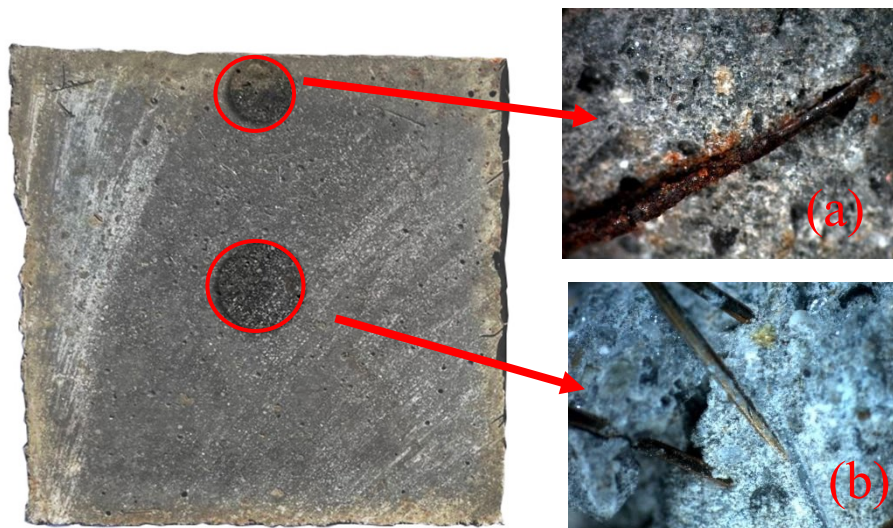


Figura 36 - Analisi al microscopio ottico dei campioni UHPC prelevati a: (a) 1 cm dalla faccia superiore, (b) 5 cm dalla faccia superiore – 1 mese di stagionatura

Nelle Figure 37 e 38 sono riportate alcune immagini rappresentative, ricavate dall'analisi al microscopio ottico sui campioni prelevati. Dalle immagini ricavate sono state ricavate importanti indicazioni:

- in tutti i casi, dai campioni superficiali prelevati a circa 1 cm dalla faccia superiore del provino, si nota l'ossidazione delle fibre metalliche disperse nella matrice cementizia con annessa formazione di ruggine (patina di colore bruno-rossiccio chiaramente visibile in foto). L'ossigeno, l'umidità dell'aria o, più in generale, l'acqua, sono componenti necessari per attivare le reazioni elettrochimiche responsabili della corrosione dei metalli;
- dai campioni prelevati al cuore dei vari provini invece (circa 5 cm dalla faccia superiore) si evince che le fibre sono rimaste incontaminate. Dalle immagini si nota attorno ad esse la presenza di una polvere di colore grigio-chiaro. Si tratta di granuli residui di cemento anidro che non sono riusciti ad idratarsi.

Queste prime indicazioni confermano la bassa permeabilità e la compatta microstruttura tipiche delle miscele UHPC. Tali caratteristiche ostacolano l'ingresso di acqua e con essa anche l'ingresso di sostanze aggressive che possono provocare un decadimento delle proprietà del materiale.

Dall'analisi al microscopio ottico è stato osservato inoltre che le fibre metalliche prelevate al cuore dei provini possiedono ancora il loro colore originario dorato. Le fibre metalliche prelevate invece dai campioni più superficiali, una volta rimossa la patina rossastra di ruggine, sono risultate di colore grigio-scuro. In letteratura, un fenomeno simile è stato interpretato come conseguenza della "dezincificazione" [71]. Tale fenomeno prevede che in una soluzione acquosa, in particolare una soluzione alcalina come la pasta cementizia, un costituente del rivestimento in ottone (Zinco, Zn) sarà selettivamente rimosso, lasciando l'altro (Rame, Cu) [72]. Il componente Zn rimosso dal rivestimento in ottone diventa $Zn(OH)_2$ (idrossido di zinco) e reagisce con $Ca(OH)_2$ (idrossido di calcio) per formare $Ca[Zn(OH)_3]_2 \cdot 2H_2O$ (idrossizincato di calcio) secondo la seguente reazione:



Anche questo fenomeno testimonia l'ottimo grado di compattazione della matrice cementizia raggiunto nella miscela oggetto di studio, che ostacola l'ingresso di acqua e tutte le sostanze nocive che può trasportare.



Figura 37 - Analisi al microscopio ottico dei campioni UHPC prelevati a: (a) 1 cm dalla faccia superiore, (b) 5 cm dalla faccia superiore – 2 mesi di stagionatura.



Figura 38 - Analisi al microscopio ottico dei campioni UHPC prelevati a: (a) 1 cm dalla faccia superiore, (b) 5 cm dalla faccia superiore – 3 mesi di stagionatura.

6.2.4. Analisi porosimetrica

Il calcestruzzo, almeno quello convenzionale tradizionalmente impiegato nelle opere dell'architettura e dell'ingegneria civile, è un materiale poroso. Come in tutti i materiali da costruzione, la porosità condiziona le proprietà ingegneristiche, ed in particolare influenza la resistenza meccanica, la permeabilità e la durabilità. La porosimetria è una tecnica analitica che permette di misurare alcune caratteristiche di un materiale riconducibili alla presenza di pori, tra cui: volume totale dei pori, diametro dei pori, area superficiale, densità di bulk e densità assoluta. Tale tecnica consiste nell'introdurre nel materiale da testare un liquido a elevata pressione che non bagna il materiale in questione. L'elevata pressione è necessaria per contrastare la tensione superficiale del liquido, che da sola non permetterebbe al liquido di penetrare all'interno dei pori del materiale. Esistono diversi metodi per caratterizzare la porosità di un. Nel presente lavoro di tesi sono state condotte analisi porosimetriche ad intrusione di mercurio.

La tecnica si basa sull'intrusione dipendente dalla pressione del mercurio come liquido non bagnante in un materiale poroso. Il mercurio, a differenza dell'acqua, non ha alcuna affinità per i prodotti presenti nei materiali da costruzione. Esso non viene pertanto spontaneamente assorbito dal materiale poroso come avviene per l'acqua. Affinché il mercurio penetri nei pori di un materiale poroso è necessario applicare una pressione tanto maggiore tanto più piccolo è il raggio dei pori, come indicati nell'equazione di Washburn:

$$P = \frac{2\sigma}{r} \cos\theta$$

Dove P è la pressione che occorre applicare per far entrare il mercurio entro i pori; r è il raggio dei pori; mentre σ e θ entrambi noti, sono rispettivamente la tensione superficiale del mercurio e è l'angolo di contatto tra mercurio e materiale solido.

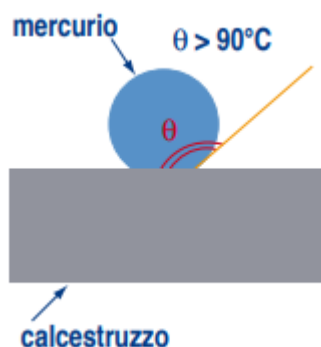


Figura 39 - Comportamento di un solido nei confronti del mercurio [Il Nuovo Calcestruzzo, Colleparidi].

Nel caso in esame la prova penetrometrica è stata condotta su campioni ridotti prelevati da provini cubici di lato 10 cm in UHPC fatti maturare in acqua. Nel dettaglio tali prove sono state ripetute rispettivamente a 1,2 e 3 mesi di stagionatura. Ad ogni step temporale, un provino è stato tagliato in mezzeria e la prova è stata condotta su campioni prelevati a 1 cm e 5 cm di profondità, come indicato in Figura 40.

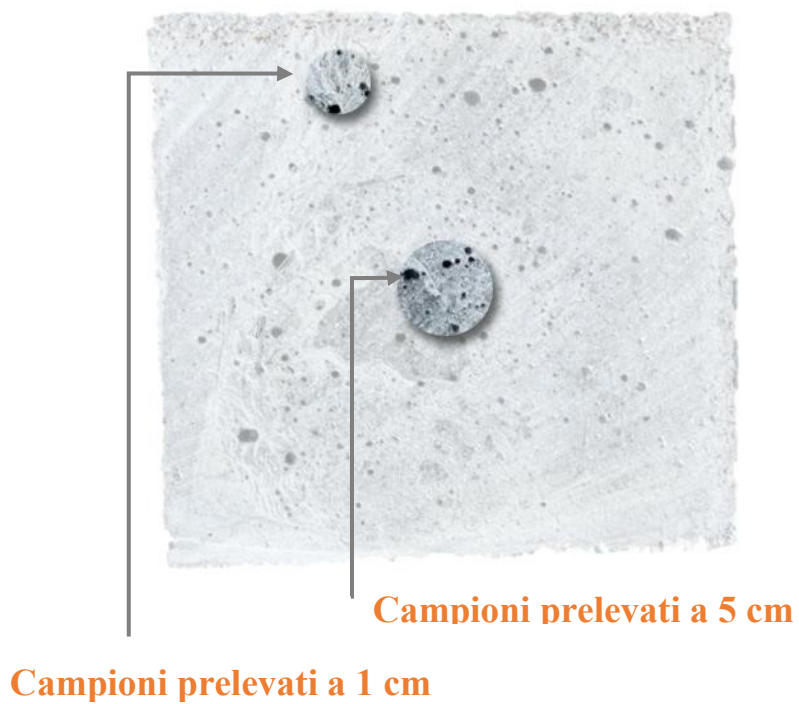


Figura 40 - Prelievo campioni da sottoporre ad analisi porosimetrica

I campioni prelevati sono stati analizzati presso il Laboratorio Microstruttura del Dipartimento di Scienze e Ingegneria della Materia, dell'Ambiente ed Urbanistica (SIMAU). Il penetrometro utilizzato (Figura 41) è costituito da un bulbo porta-campioni connesso a un gambo con capillare forato in vetro e rivestito di metallo. Il campione viene posto nella coppa; durante l'analisi il mercurio riempie sia il capillare che il bulbo. L'aumento della pressione P nel penetrometro riempito costringe il mercurio ad intrudere nei pori del campione, cominciando da quelli di maggior diametro.



Figura 41 - Porosimetro ad intrusione di mercurio

A questo punto si misura il volume di mercurio (V_{Hg}) che progressivamente penetra nei pori del solido. Al crescere della pressione saranno penetrati prima i pori di raggio maggiore e dopo quelli di minore dimensione. Pertanto, si riporta in un diagramma il volume di mercurio (V_{Hg}) riferito ad un certo peso di campione che è penetrato in funzione della pressione P applicata (N/mm^2).

Poiché tra pressione applicata P e raggio r (o diametro) dei pori esiste la correlazione mostrata in precedenza (equazione di Washburn) è possibile esprimere sullo stesso grafico il volume di mercurio intruso (riferito per esempio a 100 g di materiale) in funzione del diametro dei pori d (in μm). In questo modo è possibile conoscere quale è il volume di mercurio penetrato (e quindi di pori presenti) fino ad una certa pressione P , oppure fino ad un certo diametro dei pori. La curva che si ottiene rappresenta il volume cumulativo dei pori presenti fino ad un certo diametro. Di seguito si riportano i grafici ottenuti dalle prove porosimetriche eseguite sui campioni oggetto di studio.

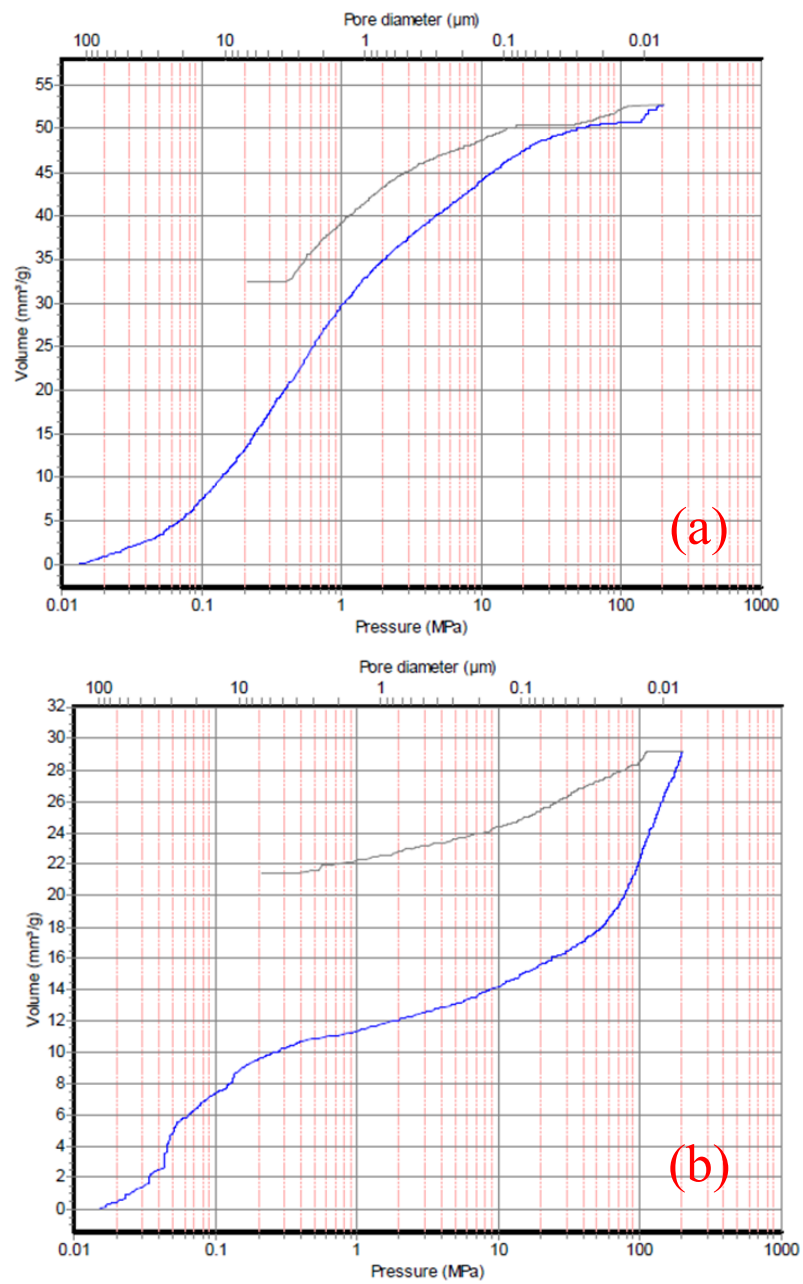


Figura 42 – Volume (mm³/g) in funzione del diametro dei pori (µ) e della pressione applicata in MPa: campioni prelevati a: (a) 5 cm dalla faccia superiore, (b) 1 cm dalla faccia superiore – 1 mese di stagionatura

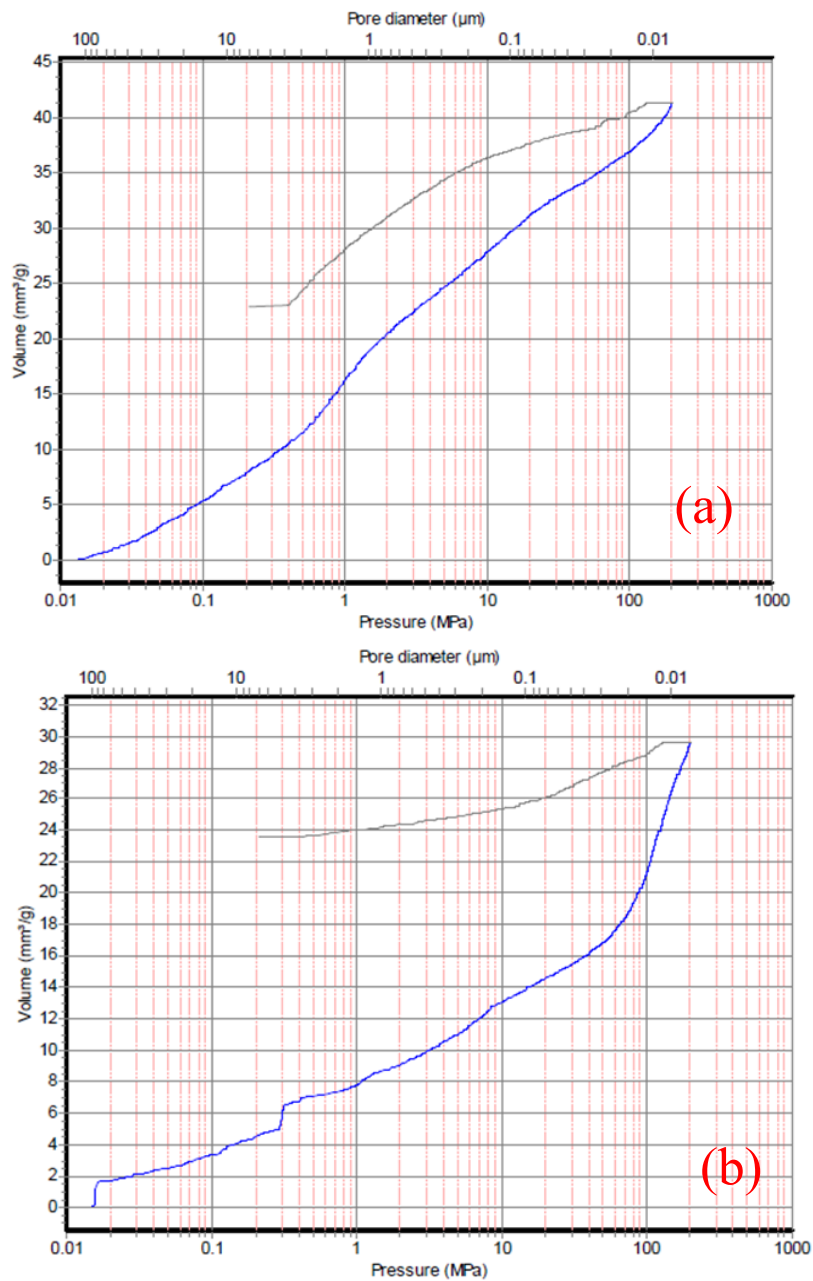


Figura 43 - Volume (mm^3/g) in funzione del diametro dei pori (μm) e della pressione applicata in MPa: campioni prelevati a: (a) 5 cm dalla faccia superiore, (b) 1 cm dalla faccia superiore – 2 mesi di stagionatura

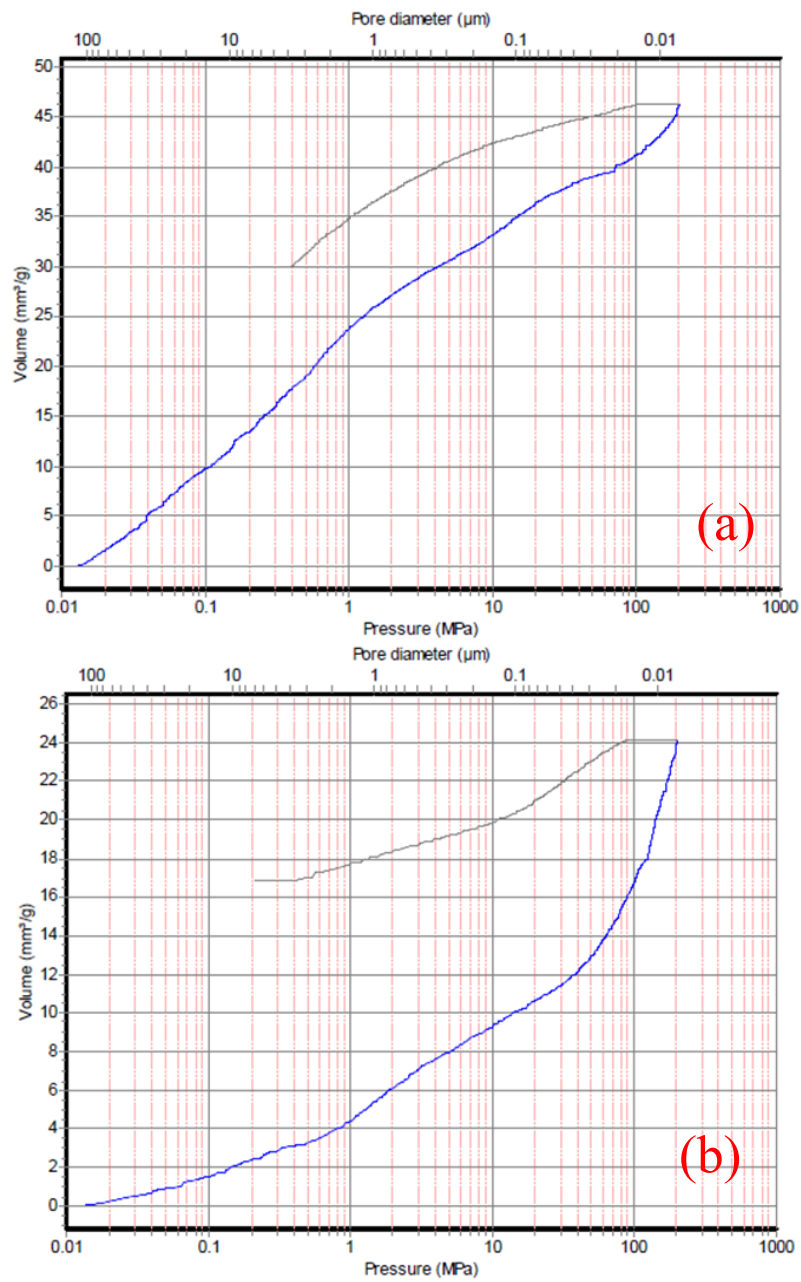


Figura 44 - Volume (mm³/g) in funzione del diametro dei pori () e della pressione applicata in MPa: campioni prelevati a: (a) 5 cm dalla faccia superiore, (b) 1 cm dalla faccia superiore – 3 mesi di stagionatura

6.2.4.1. Discussione dei risultati

In Tabella 18 vengono riportati i valori principali ottenuti dalle prove porosimetriche eseguite sui campioni UHPC prelevati a 1cm (“EXT”) e 5cm (“INT”) dalla faccia superiore in tre step temporali coincidenti con 1,2 e 3 mesi di stagionatura. Da ogni campione le fibre metalliche sono state rimosse tramite estrazione per analizzare esclusivamente la matrice cementizia.

I risultati delle prove porosimetriche ad intrusione di mercurio dimostrano che il valore di porosità aperta medio dei campioni prelevati dalla zona più esterna dei campioni pari a 6,5% è inferiore a quello relativo ai campioni prelevati dal nucleo dei provini (10.6%). Tale risultato ha confermato il buon grado di compattazione della matrice cementizia ottenuto grazie al ridotto rapporto a/c e all'utilizzo di materiali ad elevata attività pozzolanica che rendono il composito impenetrabile alle particelle di acqua.

In Figura 45 è rappresentata non solo la porosità totale in %, ma anche la sua divisione in gel o micropori ($<0,1 \mu\text{m}$), mesopori ($0,1-1 \mu\text{m}$) e macropori ($> 1 \mu\text{m}$). Va sottolineato che non esiste ancora una classificazione ufficiale o standard della dimensione dei pori per i materiali cementizi; quindi, in letteratura si possono trovare diverse classificazioni della dimensione dei pori. Nonostante ciò, in linea generale si assume che i micropori corrispondono agli spazi interconnessi tra le particelle di gel; i mesopori o pori capillari e i macropori, invece, possono essere definiti come gli spazi vuoti non riempiti da materiali cementizi o prodotti di idratazione. Dai risultati sperimentali si evince che la porosità aperta dei campioni prelevati internamente è caratterizzata per lo più da macropori, mentre quella dei campioni prelevati esternamente è costituita maggiormente da micropori. Allo stesso tempo si evince una graduale riduzione della porosità complessiva del materiale, in particolare della macroporosità, all'avanzare del tempo di stagionatura. Tale fenomeno è indice dell'ottimo grado di compattazione raggiunto dal composito: le particelle di cemento rimaste anidre in un primo momento a causa dell'impenetrabilità della matrice cementizia, sono disponibili a reagire con l'acqua, qualora essa penetri all'interno dei pori. Queste reazioni portano alla formazione di nuovi prodotti “idratati” che si depositano e riempiono le porosità residue.

Tabella 18 - Risultati prove porosimetriche

Campione	Porosità totale [%]	Diametro medio dei pori (μm)
UHPC_1 M - EXT	6,86	0,03
UHPC_1 M - INT	11,96	0,13
UHPC_2 M - EXT	6,86	0,02
UHPC_2 M - INT	10,35	0,06
UHPC_3 M - EXT	5,75	0,02
UHPC_3 M - INT	9,61	0,06

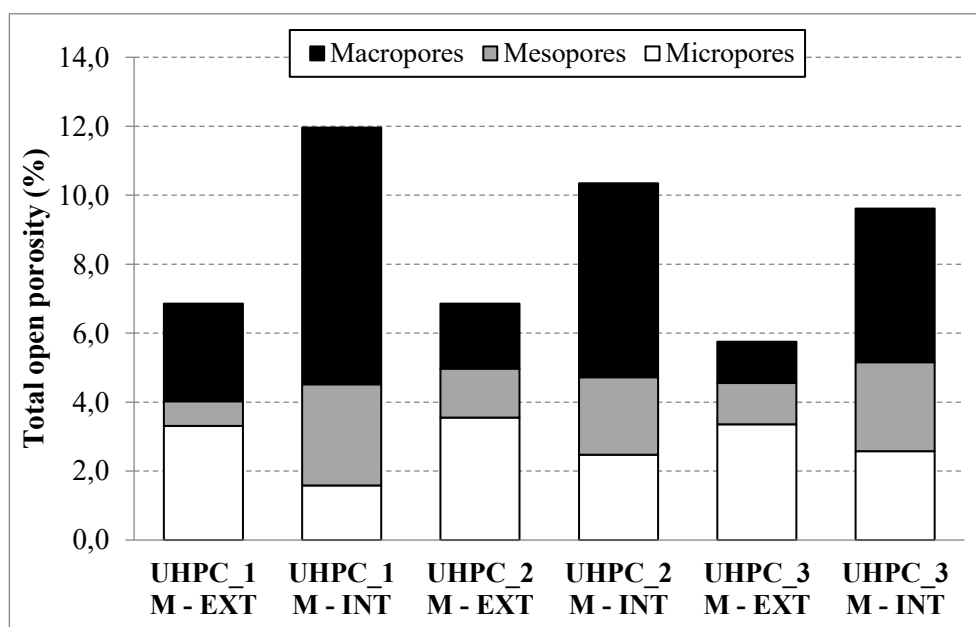


Figura 45 - Risultati della porosimetria a intrusione di mercurio dopo 1,2 e 3 mesi di stagionatura

6.2.5. Prova di assorbimento

L'assorbimento d'acqua e la densità sono stati valutati secondo la procedura descritta in ASTM C642 “Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete” su tre provini prismatici (40x40x160 mm) EE_UHPC, stagionati in acqua ad una temperatura di 20°C per 28 giorni. I risultati ottenuti sono riportati in Tabella 19.

Il peso specifico è risultato piuttosto elevato, anche superiore a 2400 kg/m³. Sulla base della ricetta della miscela ci si poteva aspettare un peso specifico teorico di 2360 kg/m³, indicando così che si è ottenuta una compattazione completa del materiale durante i 60 secondi di vibrazione. In termini di assorbimento d'acqua, il valore misurato riportato in Tabella 9 è prossimo all'1%, valore estremamente basso. Il motivo risiede nel volume molto basso dei pori capillari dovuto all'ottimizzazione della microstruttura garantita dai bassi rapporti acqua/legante adottati (da 0,18 a 0,23).

Tabella 19 – Assorbimento d'acqua di EE_UHPC

Provini	Peso specifico EE_UHPC (kg/m ³)		Assorbimento (%)	Valore medio Assorbimento (%)
	Essiccato ¹	SSD ²		
Provino A	2363	2389	1.10	
Provino B	2435	2463	1.15	1.11
Provino C	2402	2428	1.08	

¹ Provino essiccato in forno a 105°C fino a peso costante

² Provino in condizioni SSD (Saturated surface Dry condition)

6.2.6. Prova di resistenza ai cicli gelo-disgelo

La resistenza del composito ai cicli gelo-disgelo è stata valutata secondo la procedura riportata su ASTM C666 “Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing”, su tre provini 100x100x300 mm realizzati con miscela EE_UHPC, stagionati a 20°C per 28 giorni in acqua più altri 2 giorni in acqua a 4°C. Il peso specifico è stato misurato secondo la procedura descritta nella EN 12190 “Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Test methods. Determination of compressive strength of repair mortar”. Il valore del modulo elastico dinamico è stato calcolato secondo la formula:

$$E_d = \rho \cdot V^2 \frac{(1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}{(1 - \nu)}$$

dove ρ è il peso specifico UHPC, ν è il rapporto di Poisson (pari a 0,20 per il calcestruzzo ad alta resistenza, secondo la letteratura scientifica), V è la velocità dell'impulso ultrasonico da misurare.

Tabella 20 - Resistenza di EE_UHPC ai cicli gelo-disgelo

Numero di cicli, N	Provini	Peso specifico (kg/m ³)	Tempo (μ sec)	Ed (MPa)	$P = 100 \cdot E_N / E_0$	$DF = P \cdot N / 300$
0	A	2327	64.7	46800		
	B	2354	66.6	44310		
	C	2394	64.9	47180		
	Media	2358		46090	/	/
36	A	2331	64.8	46720	100	12
	B	2355	66.5	44460	100	12
	C	2395	64.9	47200	100	12
	Media	2360		46130	100	12
61	A	2332	64.2	47610	102	21
	B	2339	64.7	46660	105	21
	C	2363	64.2	47580	101	21
	Media	2345		47290	103	21
97	A	2331	64.2	47610	102	33
	B	2356	64.8	46850	106	34
	C	2363	64.2	47580	101	33
	Media	2350		47340	103	33
133	A	2331	64.3	47450	101	45
	B	2355	64.8	46830	106	47
	C	2363	64.3	47430	101	45
	Media	2350		47240	103	45
169	A	2331	64.3	47460	101	57
	B	2355	64.7	46980	106	60
	C	2363	64.4	47290	100	56
	Media	2350		47240	103	58
205	A	2331	64.4	47300	101	69
	B	2356	64.6	47130	106	73
	C	2363	64.5	47150	100	68
	Media	2350		47190	102	70

229	A	2330	64.2	47580	102	78
	B	2356	65.5	45860	104	79
	C	2362	64.2	47570	101	77
	Media	2349		47000	102	78
265	A	2331	63.1	49270	105	93
	B	2355	63.9	48160	109	96
	C	2362	63.1	49250	104	92
	Media	2350		48890	106	94
301	A	2331	63.8	48210	103	103
	B	2356	63.8	48330	109	109
	C	2363	63.1	49250	104	105
	Media	2350		48600	105	106

Come appare evidente in Tabella 20, il fattore di durabilità (DF) è ben al di sopra del valore soglia di 80, cioè il minimo richiesto dopo N=300 cicli affinché un calcestruzzo possa definirsi resistente ai rapidi cicli di gelo e disgelo. Tale valore è addirittura superiore a 100, probabilmente per il continuo assorbimento d'acqua effettuato dalle particelle di cemento non idratate presenti all'interno dei provini EE_UPHC, che continuavano la loro reazione di idratazione venendo a contatto con l'acqua.

QUARTO STUDIO

7. Studio del comportamento meccanico di miscele UHPC sottoposte a carichi statici e ciclici

Nel presente capitolo si riportano i risultati di una serie di prove meccaniche di flessione su 4 punti eseguite su miscele UHPC, aventi stessa composizione ma diverso contenuto di fibre metalliche. Obiettivo della campagna è la valutazione sperimentale del comportamento del composito sottoposto a carichi di tipo statico e di tipo dinamico (carico-scarico). Particolare attenzione è stata posta sul comportamento post-fessurativo dei provini analizzati e sull'avanzamento dello stato di danno al progredire del carico.

7.1. Materiali e preparazione dei provini

I provini sono stati preparati e confezionati presso il Laboratorio Materiali del Dipartimento di Scienze e Ingegneria della Materia, dell'Ambiente ed Urbanistica (SIMAU). In Tabella 21 è riportata la composizione delle due miscele oggetto di studio, caratterizzate solamente da un diverso contenuto di fibre metalliche di rinforzo, rispettivamente pari all'1% in volume per la miscela UHPC_1% e 2,5% per la miscela UHPC_2.5%.

Tabella 21 - Composizione UHPC oggetto di studio

<i>Materiali</i>	<i>UHPC_1%</i>	<i>UHPC_2.5%</i>
Cemento 52,5 R	720	720
Sabbia 0-0.1 mm	410	410
Sabbia 0.5-1.1 mm	945	945
Fumo di silice	100	100
Superfluidificante	10	11
Espansivo	25	30
Antiritiro (SRA)	9	9
Antibolle	6	6
Acqua	240	240
Fibre	78	195

Vengono descritti di seguito i materiali utilizzati per il confezionamento dei provini. Il cemento utilizzato CEM I 52,5 R. Si tratta di un cemento Portland avente requisiti in accordo alla norma EN 197-1. Due differenti aggregati, quali sabbia di granulometria compresa tra 0-1 mm al 30% e sabbia con granulometria compresa tra 0,5-1,1 mm al 70%, sono stati opportunamente combinati. Il Fumo di silice utilizzato è un prodotto in polvere di forma prevalentemente sferica, costituito da silice amorfa submicronica, privo di qualsiasi composto cristallino. Tale componente ha elevata superficie specifica (15-20 m²/g), altissima attività pozzolanica e grandi proprietà fillerizzanti. Gli additivi utilizzati sono: additivo superfluidificante acrilico in polvere di ultima generazione per migliorare la lavorabilità dell'impasto ed evitare i rischi di segregazione della miscela; additivo chimico antibolle per ridurre la formazione di aria durante la miscelazione. Sono stati aggiunti inoltre agente espansivo e additivo antiritiro, che insieme mitigano il fenomeno del ritiro soprattutto alle brevi stagionature. Infine sono state aggiunte fibre dritte in acciaio ottonate, di lunghezza 13 mm e diametro 0,2 mm con rapporto d'aspetto pari a 65.

Una volta pesati i materiali secondo le proporzioni riportate nel precedente paragrafo, questi sono stati miscelati in un mixer di capacità 5l fino al raggiungimento di un impasto uniforme,

omogeneo e senza grumi visibili. A questo punto il materiale è stato colato all'interno dei casseri e fatto vibrare per alcuni secondi fino alla completa eliminazione delle bolle d'aria. I getti sono stati coperti con pellicola di nylon per limitare l'evaporazione dell'acqua. Dopo un giorno i provini sono stati scasserati e catalogati. Infine i provini sono stati avvolti con la pellicola e fatti maturare in acqua fino al giorno dei test (28 giorni). In totale sono stati realizzati 8 provini di dimensioni $70 \times 70 \times 280 \text{ mm}^3$ e 8 provini di dimensioni $30 \times 70 \times 280 \text{ mm}^3$ al fine di valutare la differenza di comportamento a flessione tra provini tozzi e provini più snelli.

7.2. Setup di prova

Tutti i provini sono stati sottoposti a prova di flessione su 4 punti. La tecnica DIC, il cui funzionamento è già stato descritto al capitolo § 5.4.1, è stata utilizzata per il calcolo della deformazione dei provini e per il monitoraggio dell'avanzamento del quadro fessurativo all'aumentare del carico applicato.

A tal proposito le prove, le immagini della superficie frontale dei provini sono state acquisite da due fotocamere digitali (modello Pixelink® B371F) a 2 fotogrammi al secondo. Le telecamere erano dotate di un obiettivo con lunghezza focale di 16 mm e posizionato a circa 1 m di distanza dal campione, in modo da ridurre gli errori prospettici dovuti ad eventuali movimenti fuori piano. Il campione è stato illuminato utilizzando un faretto a LED. Una terza telecamera, posta nella parte inferiore, è stata utilizzata per monitorare la propagazione delle cricche sulla faccia inferiore dei provini. Il setup di prova utilizzato è riportato in Figura 46.

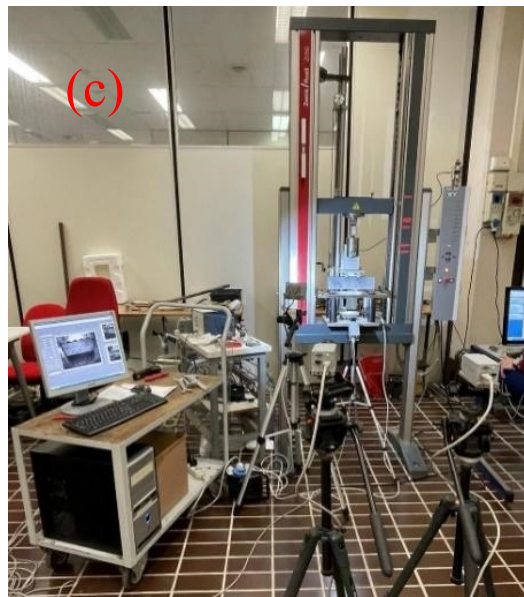
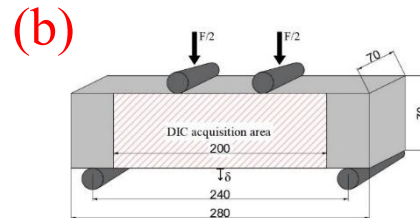
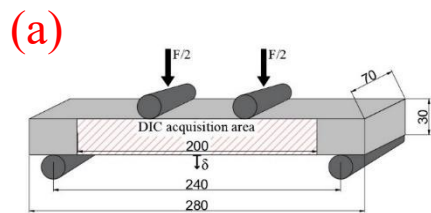
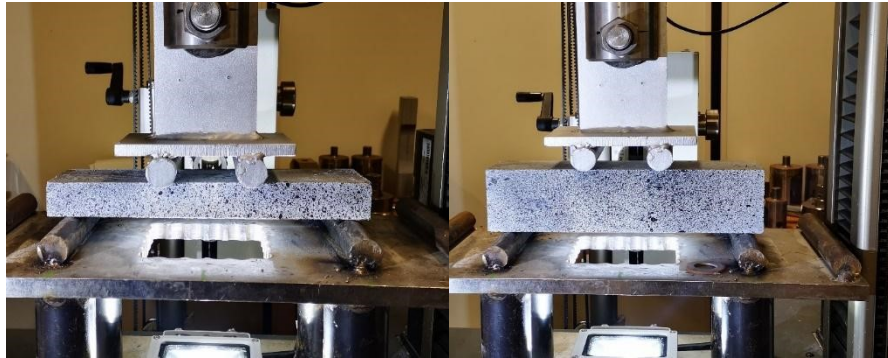


Figura 46 Setup di prova: (a) provini $30 \times 70 \times 280 \text{ cm}^3$; (b) provini $70 \times 70 \times 280 \text{ cm}^3$; (c) vista generale

7.3. Risultati sperimentali

7.3.1. Prove statiche

I campioni sono stati testati con prova a flessione su 4 punti. Le prove di flessione quasi-statiche a quattro punti sono state eseguite in controllo dello spostamento (1 mm/min). I risultati ottenuti sono riportati in Tabella 22 come valore medio di 2 campioni per ciascuna miscela. Le curve sollecitazione-spostamento sono riportate in Fig. 48 dove la resistenza a flessione è calcolata come:

$$\sigma = \frac{F l}{b d^2}$$

Dove F è la sollecitazione applicata, l è la distanza degli appoggi, b è la larghezza (70mm) e d è l'altezza del provino (Figura 46).

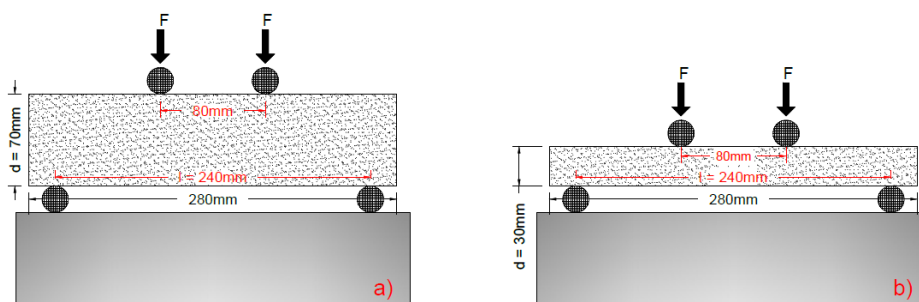


Figura 47 - Prove a flessione su 4 punti: (a) 70 x 70 x 280 mm, (b) 30 x 70 x 280 mm

La resistenza di prima fessurazione σ_f è stata definita come il valore di resistenza flessionale corrispondente alla formazione della prima cricca. La formazione della prima fessura è stata determinata mediante ispezione visiva (con l'ausilio dei frame ricavati tramite tecnica DIC) o osservando le curve sforzo-deformazione, in corrispondenza di una significativa variazione di pendenza della curva sforzo-spostamento. La resistenza media massima a flessione σ_{max} e la tenacità a flessione U_f , per ciascun gruppo di provini, sono anch'esse riportate in Tabella 22. La tenacità a flessione è stata calcolata integrando l'area sotto le curve sforzo-spostamento flessionale, fino ad uno spostamento prefissato pari a 3,5 mm.

Dai risultati ottenuti si può osservare che la resistenza di prima fessurazione non è particolarmente influenzata dalla geometria del provino né tantomeno dalla quantità di fibre metalliche. Come da letteratura, il contenuto del rinforzo fibroso non influisce sulla resistenza di prima fessurazione, ma va a migliorare il comportamento post-fessurativo del composito.

Per entrambe le tipologie di provino con il contenuto minore di fibre, pari al 1% in volume, la resistenza di prima fessurazione σ_t coincide con quella massima σ_{max} . Aumentando il dosaggio del rinforzo fibroso (2,5% in volume) il comportamento post-fessurativo dei provini passa da un comportamento definito di “strain-softening” (incrudimento negativo) ad uno di tipo “strain-hardening” (incrudimento positivo). Dopo la formazione della prima fessura, infatti, grazie all’efficace azione di “cucitura” esercitata dalle fibre metalliche, il composito è in grado di resistere ad una sollecitazione addirittura maggiore di quella relativa alla formazione della prima fessura.

La stessa tendenza è stata registrata per quanto riguarda la tenacità, intesa come la capacità del materiale di assorbire energia prima del collasso: aumentando il contenuto di fibre metalliche si è assistito ad un incremento del 21% e del 70% rispettivamente per i provini 30x70x280mm³ e per quelli 70x70x280mm³.

Tabella 22 - Risultati sperimentali delle prove quasi-statiche a flessione su 4 punti

Dimensioni (mm)	Provino	σ_t (MPa)	σ_{max} (MPa)	Variation e resistenza	U_f (N/mm)	Variation e tenacità
30 x 70 x 280	UHPC_1%	9.99	9.99	-	22.0	-
	UHPC_2.5%	8.53	10.28	+3%	26.6	+21%
70 x 70 x 280	UHPC_1%	10.00	10.00	-	22.0	-
	UHPC_2.5%	9.85	13.75	+37%	32.0	+70%

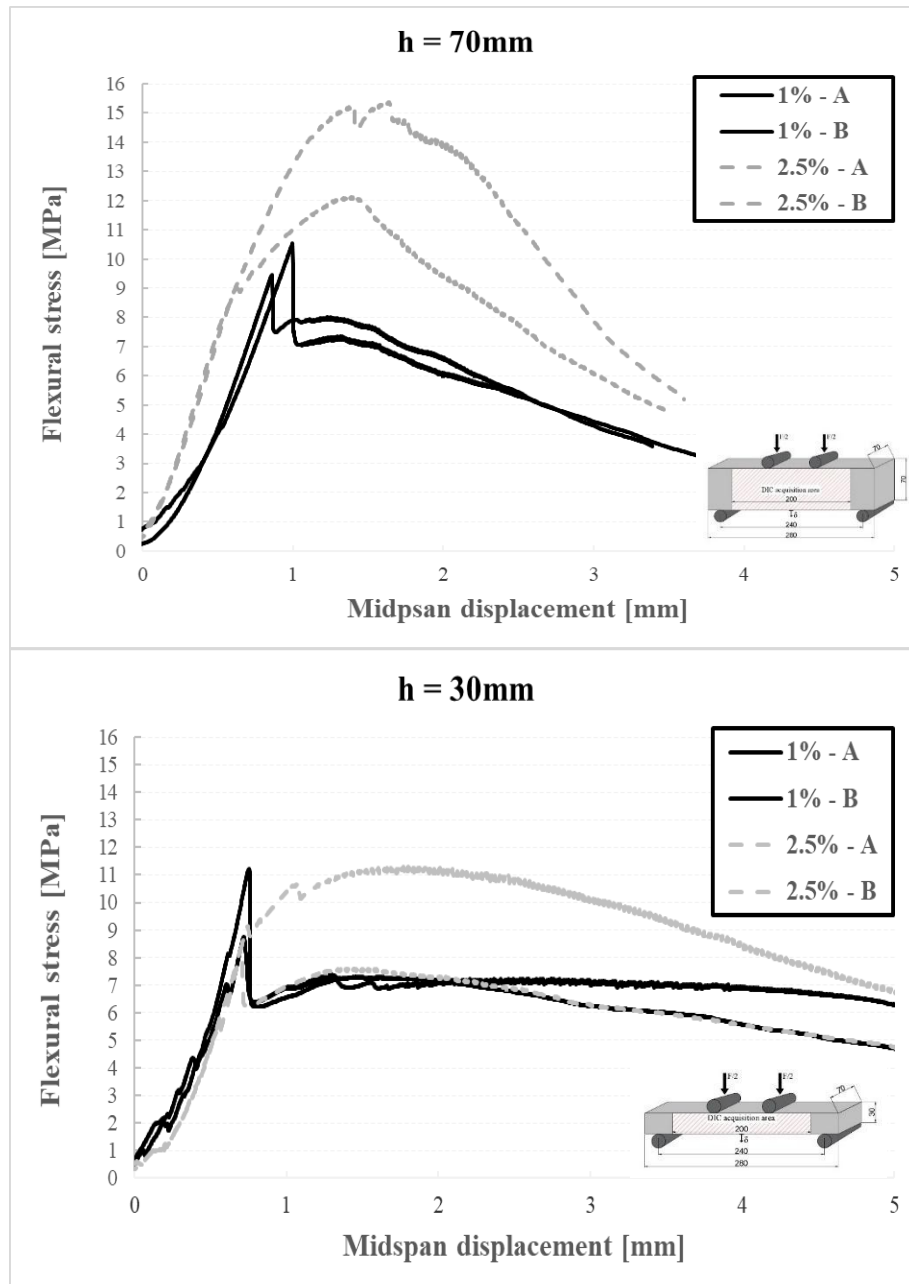


Figura 48 – Curve Resistenza a flessione - Spostamento (Prove statiche)

I risultati ottenuti dai test meccanici sono stati confermati dall'analisi dei frame acquisiti durante le prove dalle telecamere digitali. A tal proposito si riportano in Figura 46 e Figura 47 le curve rappresentative sforzo-spostamento con relative mappe di evoluzione del danno rispettivamente per provini con contenuto di fibre pari al 1% e 2,5%. Utilizzando questa tecnologia è stato possibile monitorare la formazione di ogni singola cricca sulla superficie inferiore (faccia tesa) del provino e correlare ogni cricca alla curva sforzo-deformazione.

In particolare, in Figura 49 è riportato il caso del provino snello ($30 \times 70 \times 280 \text{mm}^3$) con il dosaggio di fibre minore (1%): al termine della fase elastica lineare si nota la formazione della prima ed unica fessura, che una volta formata, diviene predominante e si allarga con l'avanzare del carico lungo il ramo di incrudimento negativo (softening).

Nel caso invece della stessa tipologia di provino, ma con dosaggio di fibre maggiore pari al 2.5% (Figura 50) si è assistito a tutt'altro comportamento: una volta superato il limite elastico lineare iniziale, iniziano a formarsi una serie di fessure multiple, distribuite con regolarità sull'intera superficie del campione. Non si localizza dunque, un'unica grande fessura ma si instaura un processo di multi-fessurazione che rende possibile l'incrudimento del materiale fino alla tensione di picco, superato il cui valore si localizza la deformazione e si innesca un meccanismo degradante simile a quello mostrato dai provini avente contenuto di fibre minore. In questo caso specifico abbiamo osservato la formazione di tre cricche visibili, poi, una volta raggiunta la resistenza di picco, solo una delle cricche si propaga nel ramo di rammollimento mentre le altre sono rimaste pressoché invariate.

I comportamenti appena descritti sono stati osservati in tutte le prove eseguite, rispettivamente per i provini più snelli ($30 \times 70 \times 280 \text{mm}^3$) e per i provini più tozzi ($70 \times 70 \times 280 \text{mm}^3$).

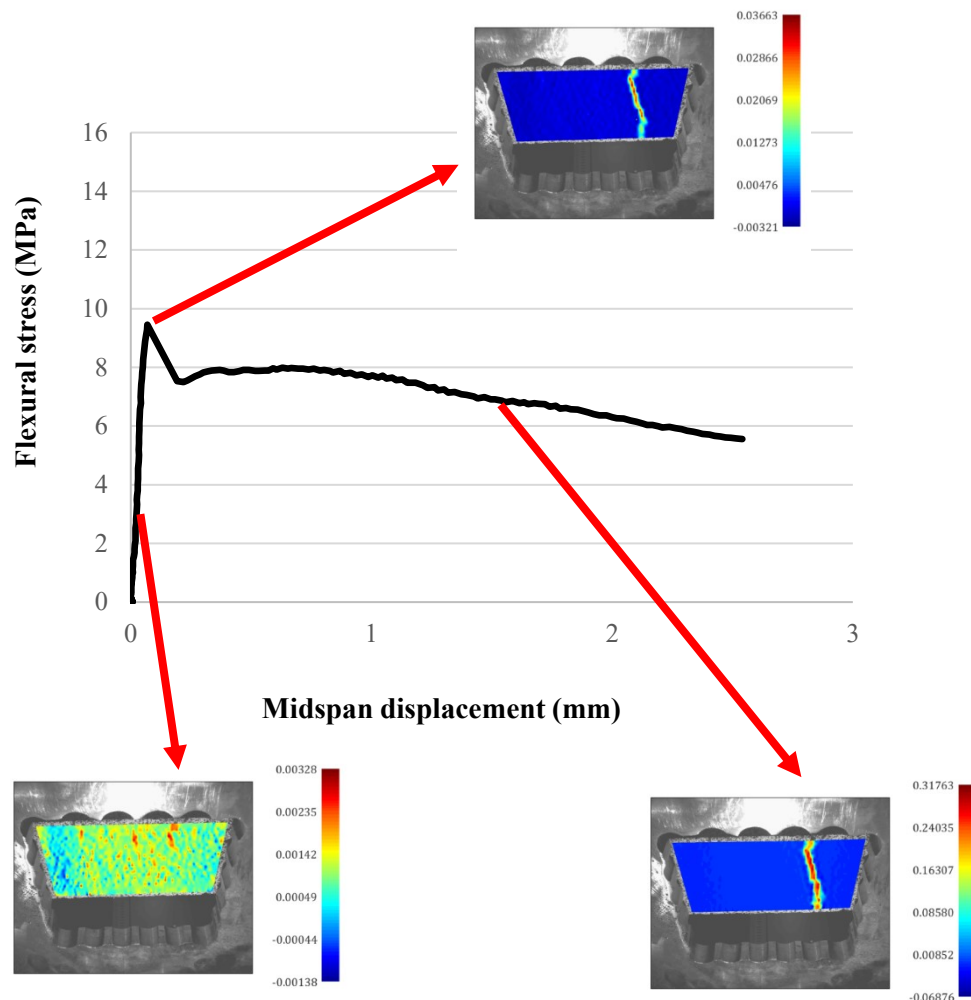


Figura 49 - Curva Resistenza - Spostamento con relative mappe di danno - Provino 30x70x280mm³ - 1% Fibre Metalliche

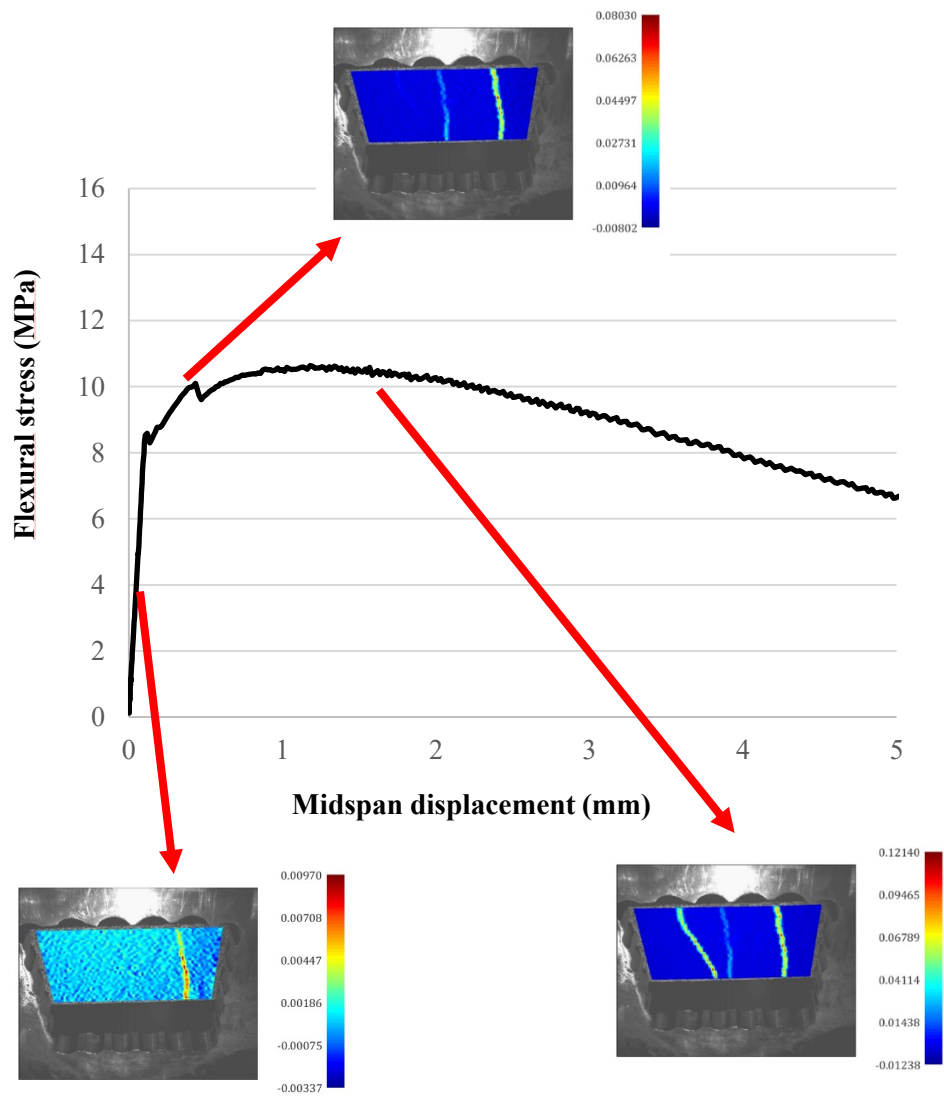


Figura 50 - Curva Resistenza - Spostamento con relative mappe di danno - Provino $30 \times 70 \times 280 \text{mm}^3$ - 2.5% Fibre Metalliche

7.3.2. Prove cicliche

La seconda parte della campagna sperimentale ha previsto prove cicliche di carico-scarico a flessione su 4 punti. Le prove sono state eseguite in controllo di spostamento (1mm/min). I cicli di carico/scarico sono stati eseguiti ad intervalli prefissati pari a 0,5 mm e le deformazioni dei provini sono state registrate mediante telecamere ad alta risoluzione secondo il setup già descritto in Figura 45. I risultati ottenuti sono riportati in Tabella 23 come valore medio di 2 campioni per ciascuna miscela. Le curve sforzo-spostamento sono riportate in Fig 51.

I risultati ottenuti confermano anche in questo caso l'influenza significativa del contenuto di fibre metalliche sul comportamento post-fessurativo del composito. Per entrambe le tipologie di provino con il contenuto minore di fibre, pari al 1% in volume, la resistenza di prima fessurazione σ_f coincide con quella massima σ_{max} . Aumentando il dosaggio del rinforzo fibroso (2,5% in volume) i provini sono stati in grado di assorbire un carico maggiore rispetto a quello relativo alla formazione della prima fessura. Anche dal punto di vista della tenacità U_f , come per le prove di tipo statico, si è assistito ad un incremento di tale valore 64% e del 74% rispettivamente per i provini 30x70x280mm³ e per quelli 70x70x280mm³ aumentando il contenuto del rinforzo fibroso dal 1% al 2,5%. Tali risultati sono l'ennesima dimostrazione dell'efficacia dell'effetto "crack-bridging" esercitato dalle fibre metalliche. Tale effetto consente al composito un recupero di resistenza dopo la prima fessurazione, il che conferisce al materiale una maggiore duttilità e un'elevata capacità di dissipare energia prima del collasso.

Tabella 23 - Risultati sperimentali delle prove cicliche a flessione su 4 punti

Dimensioni (mm)	Provino	σ_f (MPa)	σ_{max} (MPa)	Variazion e resistenza	U_f (N/mm)	Variazione tenacità
30 x 70 x 280	UHPC_1%	9.73	9.73	-	23.2	-
	UHPC_2.5%	9.64	10.98	+13%	38.2	+64.7%
70 x 70 x 280	UHPC_1%	8.01	8.01	-	20.3	-
	UHPC_2.5%	9.55	14.29	+78%	30.4	+74.4%

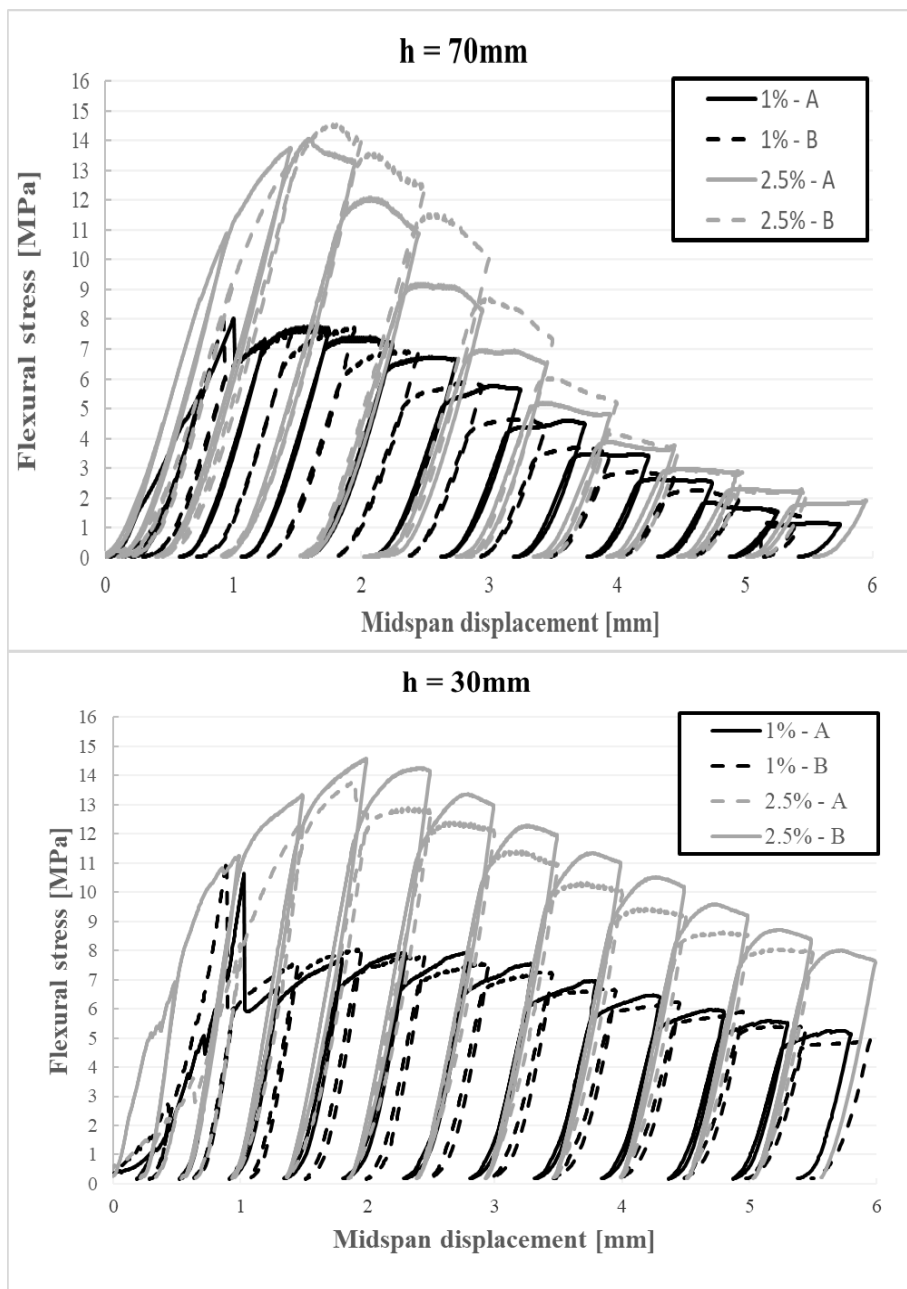


Figura 51 - Curve Resistenza a flessione - Spostamento (Prove cicliche)

Anche per i test di tipo ciclico ci si è avvalsi della tecnica DIC per lo studio della deformazione e dell'avanzamento dello stato di danno dei vari provini all'aumentare del carico applicato. A titolo esemplificativo si riporta in Figura 52 la curva sforzo-deformazione con relative mappe di danno per un provino rappresentativo di dimensioni $70 \times 70 \times 280 \text{ mm}^3$ e contenuto di fibre pari al 2,5%. Anche in questo caso si osserva un primo tratto elastico lineare fino al raggiungimento di una soglia di prima fessurazione; successivamente si aprono diverse lesioni mentre il carico continua a salire fino a raggiungere un livello massimo oltre il quale non si aprono più nuove lesioni e si innesca una discesa del carico applicato.

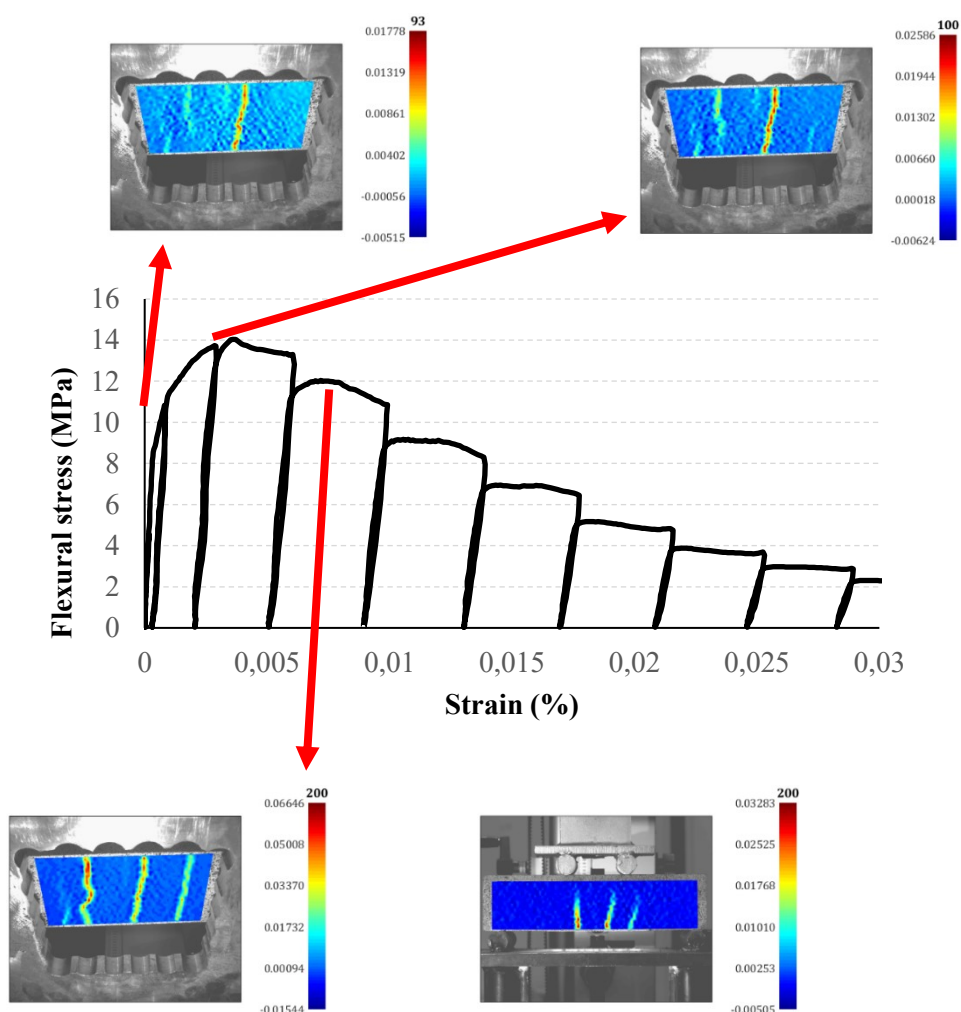


Figura 52 - Curva Sforzo - Deformazione con relative mappe di danno - Provino $70 \times 70 \times 280 \text{ mm}^3$ - 2.5% Fibre Metalliche

È stato interessante anche valutare la variazione di pendenza delle curve sforzo-deformazione, e quindi del modulo elastico flessionale, all'aumentare del numero di cicli di carico/scarico e quindi all'aumentare della deformazione residua (Tabella 24). Per i provini di entrambe le geometrie si può osservare una riduzione del modulo elastico di circa il 41% dopo il primo ciclo, e quindi dopo la formazione della prima fessura, che è praticamente la stessa indipendentemente dal volume delle fibre di acciaio. Si nota inoltre che aumentando il numero di cicli la riduzione del modulo elastico è leggermente maggiore nei provini con un volume di fibre maggiore. Ciò è probabilmente dovuto al fatto che i provini con un volume maggiore di fibre hanno raggiunto una maggiore resistenza a flessione con annessa formazione di più lesioni (il materiale è risultato quindi più danneggiato all'aumentare della deformazione), mentre i provini con l'1% di fibre hanno mostrato la formazione di un'unica macro-fessura (e quindi sono risultati meno danneggiati). In generale si è ottenuto lo stesso andamento, quindi la diminuzione del modulo elastico all'aumentare del numero di cicli di carico/scarico sia per i provini tozzi sia per quelli più snelli.

Tabella 24 - Modulo elastico flessionale

Dimensioni (mm)	Provino	Modulo Elastico Flessionale E (GPa)					
		Inizio	2° Ciclo	3° Ciclo	4° Ciclo	5° Ciclo	6° Ciclo
30 x 70 x 280	UHPC_1%	31.4	18.4 (-41.4%)	16.4 (-47.7%)	15.7 (-50.0%)	15.0 (-52.2%)	14.11 (-55.1%)
	UHPC_2.5%	31.5	18.4 (-41.6%)	13.6 (-56.8%)	12.9 (-59.1%)	11.2 (-64.4%)	11.1 (-64.7%)
70 x 70 x 280	UHPC_1%	29.5	18.7 (-36.6%)	14.2 (-51.8%)	13.1 (-55.6%)	11.1 (-62.3%)	9.0 (-69.5%)
	UHPC_2.5%	31.7	18.5 (-41.6%)	12.3 (-61.2%)	11.19 (-64.7%)	10.1 (-68.1%)	8.4 (-73.5%)

7.4. Discussione dei risultati

Nel presente capitolo sono stati riportati i risultati di una campagna sperimentale inerente prove meccaniche di flessione eseguite su provini UHPC, aventi dimensioni $30 \times 70 \times 280 \text{mm}^3$ e $70 \times 70 \times 280 \text{mm}^3$ aventi stessa composizione ma diverso contenuto di fibre metalliche. I provini sono stati testati con prove di flessione su 4 punti e sottoposti a carichi di tipo statico e di tipo dinamico (carico-scarico). Particolare attenzione è stata posta sul comportamento post-fessurativo dei provini analizzati e sull'avanzamento dello stato di danno al progredire del carico.

Dai risultati ottenuti si è osservato che:

- la resistenza di prima fessurazione non è particolarmente influenzata dalla geometria del provino né tantomeno dalla quantità di fibre metalliche. Il contenuto del rinforzo fibroso non ha influito sulla resistenza di prima fessurazione ma ha fortemente condizionato il comportamento post-fessurativo del composito. Aumentando il dosaggio del rinforzo fibroso (2,5% in volume) il comportamento post-fessurativo dei provini è passato da un comportamento definito di “strain-softening” (incrudimento negativo) ad uno di tipo “strain-hardening” (incrudimento positivo). Dopo la formazione della prima fessura, infatti, grazie all’efficace azione di “cucitura” esercitata dalle fibre metalliche, il composito è stato in grado di resistere ad una sollecitazione addirittura maggiore di quella relativa alla formazione della prima fessura.
- Confrontando le curve sforzo-spostamento dei provini testati a flessione, si nota che non c’è una differenza visibile nella resistenza a flessione e nella tenacità dei campioni UHPC sottoposti a carico statico o carico ciclico. Dalla Figura 53 infatti si osserva che le curve relative ai provini sotto carico statico (curve tratteggiate) sono quasi un inviluppo di quelle relative ai provini sottoposti a cicli di carico/scarico.
- Analizzando il quadro fessurativo dei provini sottoposti alle prove di flessione, sia di tipo statico sia di tipo ciclico, è stato dimostrato che il contenuto di fibre ha avuto un ruolo determinante sulla formazione e propagazione delle fessure nei campioni UHPC. Nei provini con contenuto di fibre pari all’1% si è assistito alla formazione di una ed unica macro-fessura al culmine del ramo elastico lineare iniziale. Nei provini con contenuto di fibre maggiore invece (2.5%) è stato registrato nella totalità dei casi un fenomeno di micro-fessurazione diffusa che ha comportato la formazione di diverse lesioni prima del collasso. In Figura 54 sono riportate alcune foto esemplificative del quadro fessurativo dei provini a fine prova.

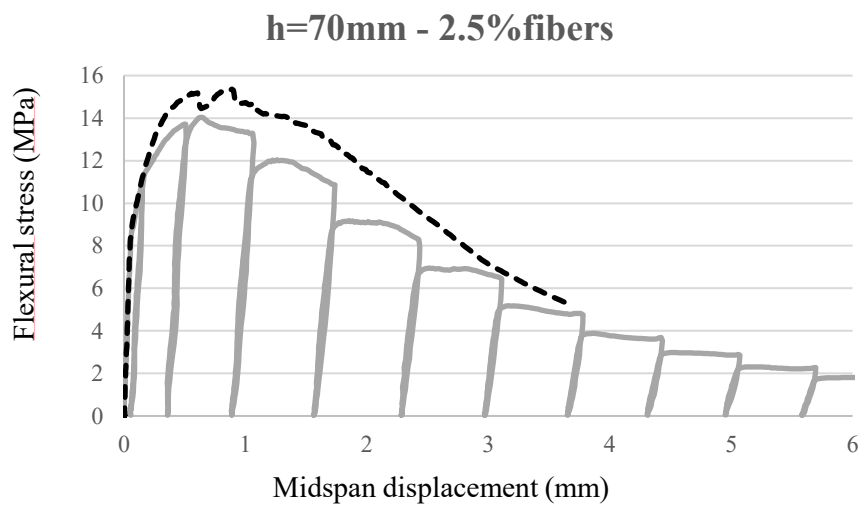
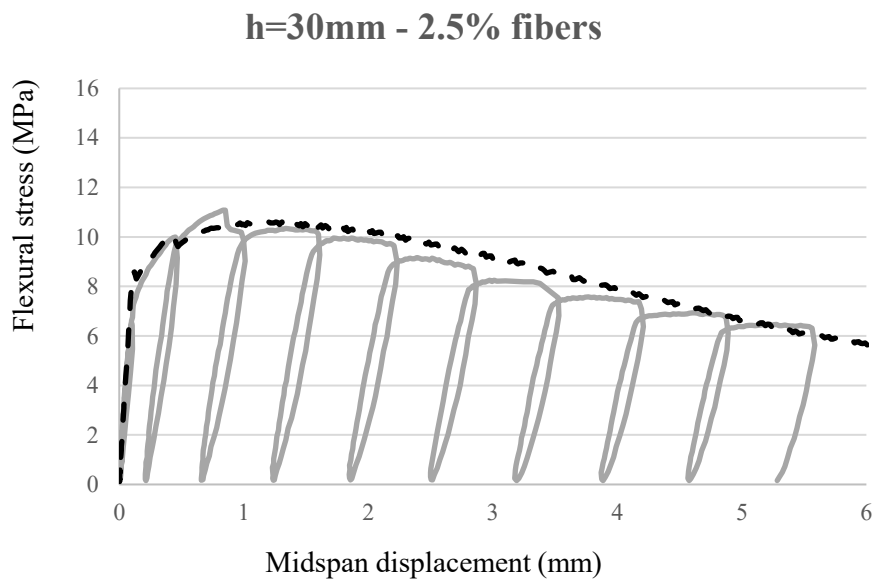


Figura 53 - Confronto curve Sforzo-Spostamento tra provini sottoposti a carico statico (tratteggiate) e carico ciclico (in grigio)

Sulla base di queste considerazioni, in accordo ai risultati riscontrati in letteratura [64,73], è possibile affermare che quando si supera un “contenuto critico” di fibre (indicativamente superiore al 1.5% in volume), il comportamento post-fessurativo del composito può risultare incrudente (“*strain-hardening*”). Infatti grazie all’efficace azione di “cucitura” esercitata dalle fibre, si assisterà alla formazione progressiva di molteplici fessure fino al raggiungimento di una tensione di collasso σ_{max} che è superiore a quella relativa alla comparsa della prima fessura σ_t .

Dong et. al. [74] hanno dimostrato invece recentemente, di poter ottenere miscele UHPC dotate di elevata resistenza a flessione e tenacità e caratterizzate da comportamenti di multi-fessurazione tipici di UHPC ad incrudimento positivo anche con dosaggi contenuti di fibre. Nel caso specifico sono state utilizzate fibre metalliche lisce di diametro 0,2 mm e filamenti d’acciaio di diametro pari a 20 μm .

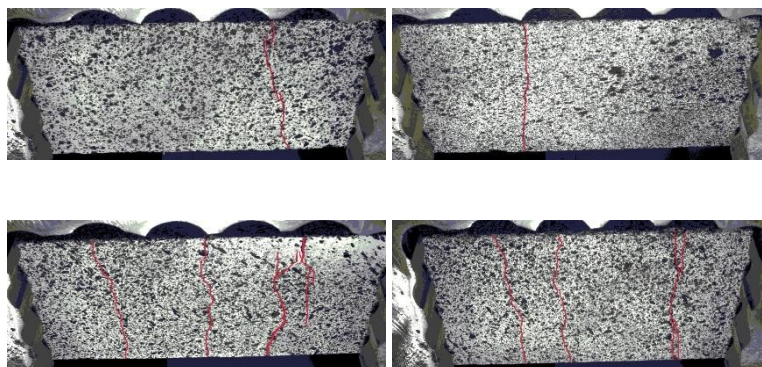


Figura 54 - Quadro fessurativo provini UHPC contenuto di fibre pari a: (a) 1%; (b) 2,5%

8. Conclusioni

Il calcestruzzo ad alte prestazioni è un materiale relativamente giovane che, pur beneficiando degli sviluppi metodologici e scientifici più recenti, presenta ancora un comportamento e delle proprietà da investigare sia in termini di ottimizzazione della composizione sia per quanto riguarda la durabilità e il suo impiego strutturale.

L'obiettivo del presente lavoro è stato dapprima quello di mettere a punto miscele UHPC ottimizzate con l'obiettivo di ridurre l'impatto ambientale, in particolare diminuendo il quantitativo di cemento impiegato; in una seconda fase la sperimentazione ha riguardato sia lo studio delle caratteristiche meccaniche, anche a lungo termine, sia la durabilità delle suddette miscele indagando in particolare l'efficacia del rinforzo fibroso metallico in termini di incrementi prestazionali.

Il primo studio si è focalizzato sul miglioramento della sostenibilità delle miscele UHPC al fine di cercare di ridurre gli impatti economico ed ambientale legati alla sua produzione. In particolare, sono state confrontate due miscele UHPC aventi stessa composizione ma dosaggio di cemento differente, rispettivamente 1000 e 700 kg/m³. I risultati sperimentali delle prove di caratterizzazione meccanica a flessione e a compressione hanno mostrato come le prestazioni meccaniche del composito si siano mantenute pressoché invariate nonostante la riduzione del 30% del contenuto di cemento, e di conseguenza l'aumento del rapporto acqua/cemento da 0,20 a 0,29. Per entrambe le tipologie di miscela sono stati ottenuti valori di resistenza a compressione a 28 giorni superiori a 150 MPa. La presenza del rinforzo fibroso, già ai dosaggi minimi di 50 kg/m³ (0,6% in volume) ha aumentato significativamente la resistenza a compressione del composito a causa probabilmente dell'effetto "confinamento" esercitato dalle fibre di acciaio sulla matrice cementizia che limita lo spanciamiento della stessa all'aumentare del carico. I risultati ottenuti mediante prove di flessione su tre punti dopo 28 giorni di stagionatura hanno messo in evidenza l'efficacia della presenza del rinforzo fibroso sul comportamento post-fessurativo del composito. In generale si è passati da un comportamento di tipo fragile per le miscele senza fibre, ad un comportamento di tipo incrudente nelle miscele fibro-rinforzate. Inoltre, la campagna sperimentale ha confermato la presenza di un effetto sinergico tra agenti espansivi e fibre di acciaio. Durante i primi giorni di stagionatura, infatti, la matrice cementizia tende ad espandersi per effetto dell'agente espansivo, ma il suo rigonfiamento è limitato dalla presenza delle fibre d'acciaio. In questo modo si creano delle tensioni all'interfaccia tra fibre e matrice che, se mantenute entro un certo limite, non producono uno scorrimento relativo ma esercitano un effetto "self-prestress", capace di tradursi in una maggiore resistenza a trazione e flessione del materiale.

La seconda parte dello studio è stata incentrata sullo studio del comportamento a trazione dei calcestruzzi UHPC. A tal proposito sono stati analizzati i risultati di prove di trazione diretta eseguite su provini a forma di osso di cane. L'utilizzo della tecnica DIC (Digital Image Correlation) ha reso possibile il monitoraggio della formazione di cricche e l'evoluzione del danno durante l'esecuzione delle prove. I risultati ottenuti hanno messo in luce l'influenza del rinforzo fibroso in funzione del contenuto sul comportamento post-fessurativo del composito.

Infatti, nei provini preparati con il contenuto minimo di fibre (50 o 100 kg/m³) si sono formate solo una o due lesioni visibili in corrispondenza della sezione trasversale del campione e soltanto una di esse si è propagata ed ha continuato ad aumentare in lunghezza e spessore descrivendo un ramo discendente (softening) fino al collasso. Il comportamento post-fessurativo è invece cambiato quando si è superato un determinato valore di soglia nella frazione volumetrica delle fibre (volume critico pari a circa 150 kg) portando alla formazione di più micro-fessure distribuite lungo l'intera lunghezza del provino. In tali casi il comportamento post-fessurativo è passato da un comportamento degradante (per bassi volumi di fibre) ad uno di tipo incrudente (hardening) con un contenuto di fibre superiore al valore critico. In accordo con i risultati riportati in letteratura, in nessun caso l'aumento del dosaggio di fibre metalliche ha comportato un aumento della tensione di prima fessurazione.

La terza fase dello studio è stata dedicata al monitoraggio nel tempo dell'andamento delle prestazioni delle miscele UHPC messe a punto in precedenza focalizzando l'attenzione su vari aspetti direttamente collegati con la durabilità delle stesse. Il primo tema indagato è stato quello del ritiro igrometrico, o ritiro da essiccamento, causato dall'evaporazione dell'acqua contenuta nel conglomerato verso l'ambiente esterno insaturo di vapore. I fenomeni di ritiro da essiccamento, e la conseguente fessurazione della matrice cementizia, possono costituire un serio problema di durabilità del materiale, anche perché l'insorgenza di fessure è in grado di vanificare tutti i vantaggi connessi alla sua elevata compattezza. Durante la campagna sperimentale sono state eseguite misure di ritiro igrometrico su miscele contenenti sia agente espansivo sia additivo riduttore di ritiro (SRA), capace di modificare la tensione superficiale dell'acqua all'interno delle porosità capillari della pasta di cemento e quindi di attenuare la formazione di menischi d'acqua nei pori capillari, i veri responsabili del ritiro della pasta di cemento. Dunque l'effetto sinergico dei due additivi ha consentito di minimizzare il ritiro igrometrico entro i primi due mesi dal getto. Per valutare l'efficacia della matrice cementizia estremamente compatta in termini di resistenza alla penetrazione dello ione cloruro sono state eseguite delle prove colorimetriche su provini di calcestruzzo UHPC immersi in soluzione salina fino a 90 giorni. Anche grazie alla presenza di fumo di silice (costituito da una rilevante attività pozzolanica), i provini realizzati in UHPC hanno evidenziato valori di penetrazione dello ione aggressivo estremamente bassi. Tale risultato, confermato anche dalle analisi condotte mediante porosimetro ad intrusione di mercurio (nello strato più esterno perfettamente idratato il materiale ha mostrato un valore medio della porosità aperta pari ad appena lo 0.65%), ha confermato il buon grado di compattazione della matrice cementizia ottenuto grazie al ridotto rapporto a/c e all'utilizzo di materiali ad elevata attività pozzolanica che rendono il composito impenetrabile agli ioni aggressivi. Anche le prove di assorbimento hanno messo in luce valori di assorbimento estremamente bassi, prossimi all'1%. Il motivo risiede nel raffinamento dei pori capillari grazie al basso rapporto acqua/legante adottato. Sono stati poi condotte prove di resistenza al degrado per cicli di gelo e disgelo. Il fattore di durabilità (DF) ottenuto è risultato ben al di sopra del valore soglia di 80, cioè il minimo richiesto dopo N=300 cicli affinché un calcestruzzo possa definirsi resistente ai rapidi cicli di gelo e disgelo. Tale valore è stato addirittura superiore a 100, probabilmente per il continuo assorbimento d'acqua effettuato dalle particelle di cemento non idratate presenti all'interno dei provini che continuavano la loro reazione di idratazione venendo a contatto con l'acqua.

Nell'ambito del quarto ed ultimo studio sono state eseguite prove meccaniche di flessione (schema a 4 punti) su provini UHPC sottoposti a carichi di tipo statico e di tipo dinamico (carico-scarico) aventi stessa composizione ma diverso contenuto di fibre metalliche, osservando in particolare il comportamento post-fessurativo dei provini e l'avanzamento dello stato di danno al progredire del carico.

I risultati ottenuti anche in questo caso hanno mostrato come la resistenza di prima fessurazione non sia particolarmente influenzata dalla geometria del provino né tantomeno dalla quantità di fibre metalliche. Infatti, il dosaggio delle fibre metalliche non ha influito sulla resistenza di prima fessurazione, ma ha fortemente condizionato il comportamento post-fessurativo del composito. Superando un "contenuto critico" di fibre (indicativamente superiore al 1.5% in volume) l'andamento post-fessurativo delle curve ottenute per i vari provini è passato da un comportamento definito di "strain-softening" (degradante) ad uno di tipo "strain-hardening" (incrudente). In quest'ultimo caso, infatti, dopo la formazione della prima fessura, grazie all'efficace azione di "cucitura" esercitata dalle fibre metalliche, il composito è stato in grado di resistere ad una sollecitazione addirittura maggiore di quella necessaria per produrre la prima fessura. Nei provini con un contenuto inferiore di fibre, invece, si è assistito alla formazione di una ed unica macro-fessura in corrispondenza del culmine del ramo elastico lineare iniziale. Nei provini con contenuto di fibre maggiore invece è stato registrato nella totalità dei casi un fenomeno di micro-fessurazione diffusa che ha comportato la formazione di diverse lesioni prima del collasso, a testimonianza di un comportamento duttile del materiale.

Bibliografia

- [1] Roy DM. New strong cement materials: Chemically bonded ceramics. *Science* (80-) 1987;235:651–8. <https://doi.org/10.1126/science.235.4789.651>.
- [2] Azmee NM, Shafiq N. Ultra-high performance concrete: From fundamental to applications. *Case Stud Constr Mater* 2018;9. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2018.e00197>.
- [3] Bache HH. *Densified Cement / Ultra-Fine Particle-Based Materials*. Second Int Conf Superplast Concr 1981.
- [4] Richard P, Cheyrezy M. Composition of reactive powder concretes. *Cem Concr Res* 1995. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00144-2](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00144-2).
- [5] Hpc R, Rpc DSP. L . Coppola , R . Troli , S . Collepardi , M . Collepardi , " Calcestruzzi ad Altissima 2014.
- [6] Benjamin A. G. *Material Property Characterization of Ultra-High Performance Concrete*. Fhwa 2006:186.
- [7] Batoz J, Behloul M. UHPFRC Development On the Last Two Decades: An Overview. *Fr Marseille, UHPFRC Conf 2009*:1–13.
- [8] Resplendino J, Toutlemonde F. The UHPFRC revolution in structural design and construction. *Indian Concr J* 2014;88:72–83.
- [9] Möllmann M. Dyckerhoff Weiss at BAU 2011 : a world preview in Munich. 2011.
- [10] Maspoli R. Application of Ultra High-Performance Concrete – UHPC in Public Art and Urban Furniture *Applicazione dei Calcestruzzi ad Altissime Prestazioni – UHPC nell ' Arte Pubblica e nell ' Arredo Urbano* 2013;2013.
- [11] Maspoli R. High Performance concrete - Innovation and supply chain for public art and urban furniture. *AGATHON - Int J Archit Art Des* 2019:153–60.
- [12] Blais PY, Couture M. Precast, prestressed pedestrian bridge - world's first Reactive Powder Concrete structure. *PCI J* 1999;44:60–71. <https://doi.org/10.15554/pcij.09011999.60.71>.
- [13] Behloul M, Lee KC. Ductal® Seonyu footbridge. *Struct Concr* 2003. <https://doi.org/10.1680/stco.2003.4.4.195>.
- [14] Voo YL, Foster SJ, Voo CC. Ultrahigh-Performance Concrete Segmental Bridge Technology: Toward Sustainable Bridge Construction. *J Bridg Eng* 2015;20. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000704](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000704).
- [15] Cavill B, Chirgwin G. The world's first RPC road bridge at Shepherds Gully Creek, NSW. *Austrroads Bridg Conf 5th, 2004, Hobart, Tasmania, Aust 2004*.
- [16] Resplendino J. *Ultra-High Performance Concretes - recent realizations and research programs on UHPFRC bridges in France*. Kassel: 2008. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>.
- [17] Aaleti SR, Sritharan S, Bierwagen D, Wipf TJ. Structural behavior of waffle bridge deck panels and connections of precast ultra-high-performance concrete. *Transp Res Rec* 2011:82–92. <https://doi.org/10.3141/2251-09>.
- [18] Russel, G H, Graybeal B a. *Ultra-High Performance Concrete : A State-of-the-Art Report for the Bridge Community* 2013:171.
- [19] Abellán J, Núñez A, Arango S. Pedestrian bridge of UNAL in Manizales : A new UHPFRC application in the Colombian building market. *Proc Hipermat 2020 - 5th*

- Int Symp UHPC Nanotechnol Constr Mater 2020:43–4.
- [20] Marek J, Kolisko J, Tej P, Čítek D, Komanec J, Kalný M, et al. New UHPFRC bridges in the Czech Republic. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng* 2019;596. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/596/1/012011>.
- [21] Julie Pierard, Niki Cauberg P van der Z. First UHPC pedestrian bridge in Belgium. *5th Int. Symp. Ultra-high Perform. Concr. high Perform. Constr. Mater.*, Kassel: 2020, p. 45–6.
- [22] Aubry S, Bompas P, Vaudeville B, Corvez D, Lagrange T, Mazzacane P, et al. a Uhpfrc Cladding Challenge : the Fondation Louis Vuitton Pour La Création “ Iceberg ” 2013:37–48.
- [23] Mazzacane P, Ricciotti R, Tepy F, Tollini E, Corvez D. MUCEM : The builder’s perspective. *RILEM-Fib-AFGC Int Symp Ultra-High Perform Fibre-Reinforced Concr UHPFRC 2013* 2013:3–16.
- [24] Delplace G, Hajar Z, Simon A, Chanut S, Weizmann L, Tp E, et al. Precast Thin UHPFRC Curved Shells in a Waste Water Treatment Plant. *RILEM-Fib-AFGC Int Symp Ultra-High Perform Fibre-Reinforced Concr 2013*:49–58.
- [25] Jammes F-X, Cespedes X, Resplendino J. Design of Offshore Wind Turbines. *RILEM-Fib-AFGC Int Symp Ultra-High Perform Fibre-Reinforced Concr UHPFRC 2013* 2013:443–52.
- [26] Sritharan S, Schmitz GM. Design of Tall Wind Turbine Towers Utilizing UHPC. *RILEM-Fib-AFGC Int Symp Ultra-High Perform Fibre-Reinforced Concr 2013*:433–42.
- [27] Sobek W, Plank M, Frettlöhr B, Röhm J, Corvez D. Conceptual design of an UHPFRC tower structure in segmental construction for offshore wind turbines. *RILEM-Fib-AFGC Int Symp Ultra-High Perform Fibre-Reinforced Concr UHPFRC 2013* 2013:423–32.
- [28] Denarié E, Jacomo D, Fady N, Corvez D. Rejuvenation of Maritime Signalisation Structures With Uhpfrc. *RILEM-Fib-AFGC INT Symp Ultra-High Perform Fiber-Reinforced Concr UHPFRC 2013 - Oct 1-3,2013, Marseille, Fr* 2013:1–10.
- [29] Tanaka Y, Ohtake A, Musha H, Watanabe N. Recent innovative application of UFC bridges in Japan. *Fract Mech Concr Concr Struct - High Performance, Fiber Reinf Concr Spec Loadings Struct Appl* 2010.
- [30] Growth S. Sustainable and Advanced Materials for Road Infrastructure full scale application of UHPFRC for the rehabilitation of bridges – from the lab to the field 2005.
- [31] Beschi C, Meda A, Riva P, Civile I, Ambiente T, Brescia U, et al. Rinforzo Di Nodi in C . a . Con Incamiciatura in Calcestruzzo Fibro-Rinforzato Ad Elevate Prestazioni. *Ingenio n.d.*:1–14.
- [32] Sciarra FM De, Russo E. I calcestruzzi ad altissima resistenza : proprietà e comportamento meccanico 2015:1–14.
- [33] Shi C, Wu Z, Xiao J, Wang D, Huang Z, Fang Z. A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design. *Constr Build Mater* 2015;101:741–51. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.088>.
- [34] Park JJ, Kang ST, Koh KT, Kim SW, Fehling E. Influence of the Ingredients on the Compressive Strength of UHPC as a Fundamental Study to Optimize the Mixing Proportion. 2008.
- [35] Chan YW, Chu SH. Effect of silica fume on steel fiber bond characteristics in

- reactive powder concrete. *Cem Concr Res* 2004;34:1167–72.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.12.023>.
- [36] Zhang MH, Tam CT, Leow MP. Effect of water-to-cementitious materials ratio and silica fume on the autogenous shrinkage of concrete. *Cem Concr Res* 2003;33:1687–94. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00149-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00149-2).
- [37] Ganesh P, Murthy AR. Tensile behaviour and durability aspects of sustainable ultra-high performance concrete incorporated with GGBS as cementitious material. *Constr Build Mater* 2019;197:667–80.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.240>.
- [38] Yazici H, Yiğiter H, Karabulut AŞ, Baradan B. Utilization of fly ash and ground granulated blast furnace slag as an alternative silica source in reactive powder concrete. *Fuel* 2008;87:2401–7. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2008.03.005>.
- [39] Abood Habeeb G, Bin Mahmud H. Study on Properties of Rice Husk Ash and Its Use as Cement Replacement Material. *Mater Res* 2010;13:185–90.
- [40] Kang SH, Hong SG, Moon J. The use of rice husk ash as reactive filler in ultra-high performance concrete. *Cem Concr Res* 2019;115:389–400.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.09.004>.
- [41] Breugel V. Ultra High Performance Concrete Made With Rice Husk Ash for Reduced Autogenous Shrinkage 2014:1–10.
- [42] Burroughs JF, Shannon J, Rushing TS, Yi K, Gutierrez QB, Harrelson DW. Potential of finely ground limestone powder to benefit ultra-high performance concrete mixtures. *Constr Build Mater* 2017;141:335–42.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.073>.
- [43] Kim H, Koh T, Pyo S. Enhancing flowability and sustainability of ultra high performance concrete incorporating high replacement levels of industrial slags. *Constr Build Mater* 2016;123:153–60.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.134>.
- [44] Zhu W, Bartos PJM, Porro A. Application of nanotechnology in construction. *Mater Struct* 2004;37:649–58. <https://doi.org/10.1007/bf02483294>.
- [45] Sobolev K, Gutiérrez MF. How nanotechnology can change the concrete world. *Am Ceram Soc Bull* 2005.
- [46] Liu C, He X, Deng X, Wu Y, Zheng Z, Liu J, et al. Application of nanomaterials in ultra-high performance concrete: A review. *Nanotechnol Rev* 2020;9:1427–44.
<https://doi.org/10.1515/ntrev-2020-0107>.
- [47] Kiliç A, Atiş CD, Teymen A, Karahan O, Özcan F, Bilim C, et al. The influence of aggregate type on the strength and abrasion resistance of high strength concrete. *Cem Concr Compos* 2008;30:290–6.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.05.011>.
- [48] Banthia N, Nandakumar N. Crack growth resistance of hybrid fiber reinforced cement composites. *Cem Concr Compos* 2003;25:3–9.
[https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(01\)00043-9](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(01)00043-9).
- [49] Yu R, Spiesz P, Brouwers HJH. Mix design and properties assessment of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC). *Cem Concr Res* 2014;56:29–39. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.11.002>.
- [50] Wu Z, Shi C, He W, Wu L. Effects of steel fiber content and shape on mechanical properties of ultra high performance concrete. *Constr Build Mater* 2016;103:8–14.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.11.028>.

- [51] Khayat KH, Meng W, Vallurupalli K, Teng L. Rheological properties of ultra-high-performance concrete — An overview. *Cem Concr Res* 2019;124:105828. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105828>.
- [52] Gong J, Ma Y, Fu J, Hu J, Ouyang X, Zhang Z, Wang H. Utilization of fibers in ultra-high performance concrete: A review. *Composite Part B: Engineering* 2022; Vol. 241.
- [53] Wille K, Naaman AE, El-Tawil S, Parra-Montesinos GJ. Ultra-high performance concrete and fiber reinforced concrete: Achieving strength and ductility without heat curing. *Mater Struct Constr* 2012;45:309–24. <https://doi.org/10.1617/s11527-011-9767-0>.
- [54] Hamada H, Alattar A, Tayeh B, Yahaya F, Almehsal I. Influence of different curing methods on the compressive strength of ultra-high-performance concrete: A comprehensive review. *Case Stud Constr Mater* 2022;17:e01390. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01390>.
- [55] Shen P, Lu L, He Y, Wang F, Hu S. The effect of curing regimes on the mechanical properties, nano-mechanical properties and microstructure of ultra-high performance concrete. *Cem Concr Res* 2019;118:1–13. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.01.004>.
- [56] Fehling E, Leutbecher T, Bunje K. Design relevant properties of hardened ultra high performance concrete. *Proc Int Symp Ultra High Perform Concr* 2004:327–38.
- [57] Naaman AE, Reinhardt HW. Proposed classification of HPPFRCC composites based on their tensile response. *Mater Struct Constr* 2006;39:547–55. <https://doi.org/10.1617/s11527-006-9103-2>.
- [58] Yoo DY, Park JJ, Kim SW, Yoon YS. Influence of reinforcing bar type on autogenous shrinkage stress and bond behavior of ultra high performance fiber reinforced concrete. *Cem Concr Compos* 2014;48:150–61. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.11.014>.
- [59] Yoo DY, Kim S, Kim MJ. Comparative shrinkage behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete under ambient and heat curing conditions. *Constr Build Mater* 2018;162:406–19. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.029>.
- [60] Corinaldesi V, Donnini J, Nardinocchi A. The influence of calcium oxide addition on properties of fiber reinforced cement-based composites. *J Build Eng* 2015;4:14–20. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2015.07.009>.
- [61] Corinaldesi V, Nardinocchi A. Influence of type of fibers on the properties of high performance cement-based composites. *Constr Build Mater* 2016;107:321–31. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.024>.
- [62] Nardinocchi A, Corinaldesi V. Study of ultra high performance fiber reinforced concrete with expansive and shrinkage reducing agents. *Adv Mater Res* 2014;980:137–41. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.980.137>.
- [63] Yoo DY, Banthia N, Kang ST, Yoon YS. Effect of fiber orientation on the rate-dependent flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. *Compos Struct* 2016;157:62–70. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.08.023>.
- [64] Song Q, Yu R, Shui Z, Wang X, Rao S, Lin Z. Optimization of fibre orientation and distribution for a sustainable Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC): Experiments and mechanism analysis. *Constr Build Mater* 2018;169:8–19. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.130>.

- [65] Wille K, El-Tawil S, Naaman AE. Properties of strain hardening ultra high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) under direct tensile loading. *Cem Concr Compos* 2014;48:53–66. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.12.015>.
- [66] He H, Dong W, Wu Z. Study on long-term expansive deformation of self-stressing concrete with combined restrictions of steel fibers and steel bar. vol. 452–453. 2011. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.452-453.533>.
- [67] Cao SP, Zhou QF, Peng YL, Li GX. Effects of expansive agent and steel fiber on the properties of the fly ash ceramsite lightweight aggregate concrete. vol. 357–360. 2013. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.357-360.1332>.
- [68] Collepardi M. CM and VM. Superplasticized Shrinkage-Compensating Concrete 1981;68:159–72.
- [69] Berke NS, Li L, Hicks MC, Bae J. Improving concrete performance with shrinkage-reducing admixtures. *Am. Concr. Institute, ACI Spec. Publ.*, vol. SP-217, 2003, p. 37–50.
- [70] M. TR and C. SHRINKAGE-COMPENSATING CONCRETES FOR SPECIAL STRUCTURES. n.d.
- [71] Collepardi MMATR. Penetration of Chloride Ions into Cement Pastes and Concrettes. *J Am Ceram Soc* 1972;55:534–5.
- [72] Pi Z, Xiao H, Liu R, Liu M, Li H. Effects of brass coating and nano-SiO₂ coating on steel fiber–matrix interfacial properties of cement-based composite. *Compos Part B Eng* 2020;189. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.107904>.
- [73] Corinaldesi V, Nardinocchi A, Donnini J. The influence of expansive agent on the performance of fibre reinforced cement-based composites. *Constr Build Mater* 2015;91:171–9. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.002>.
- [74] Li S, Mejlhede Jensen O, Yu Q. Influence of steel fiber content on the rate-dependent flexural performance of ultra-high performance concrete with coarse aggregates. *Constr Build Mater* 2022;318:125935. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125935>.
- [75] Dong S, Wang D, Wang X, Alessandro AD, Ding S, Han B, et al. Optimizing flexural cracking process of ultra-high performance concrete via incorporating microscale steel wires. *Cem Concr Compos* 2022;134:104830. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104830>.