



**UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA**

Corso di Laurea in Ingegneria Edile

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura

**Studio della durabilità di matrici cementizie ad alte prestazioni
(UHPFRC) rinforzate con diverse tipologie di fibre corte.**

*Study of the durability of Ultra HighPerformance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC)
reinforced with different types of short fibers*

Relatore:

Prof. Ing. Jacopo Donnini

Tesi di Laurea di :

Valeria Carnicelli

Anno Accademico 2021/2022

INDICE

1.	INTRODUZIONE	3
1.1.	Evoluzione dei sistemi UHPFRC	3
1.2.	Inquadramento Normativo	5
1.3.	Caratterizzazione generale di UHPFRC	8
2.	COMPOSIZIONE DEI CALCESTRUZZI UHPC	12
2.1.	Cemento	13
2.2.	Gli aggregati	14
2.2.1.	Aggregati fini.....	16
2.2.2.	Aggregati grossolani.....	17
2.3.	I fumi di silice	17
2.4.	Altre aggiunte minerali	18
2.4.1.	Cenere di lolla di riso.....	19
2.4.2.	Ceneri volanti.....	19
2.4.3.	Scorie.....	20
2.4.4.	Polvere di vetro.....	20
2.5.	Additivi	20
2.6.	Le fibre	22
2.6.1.	Fibre di acciaio.....	24
3.	PRODUZIONE E MESSA IN OPERA	27
3.1.	Metodi basati sui modelli di impacchettamento delle particelle	29
3.2.	Metodo basato sulle prestazioni	30
3.3.	Messa in opera	31
4.	DURABILITÀ	35
4.1.	Effetti della permeabilità, corrosione dell'acciaio, carbonatazione, gelo e disgelo, reazioni alcali silice, resistenza agli attacchi chimici, resistenza all'abrasione, resistenza al fuoco	35
4.1.1.	Permeabilità all'acqua.....	36
4.1.2.	Permeabilità agli ioni cloruro.....	38
4.1.3.	Corrosione dell'armatura in acciaio.....	40
4.1.4.	La carbonatazione.....	41
4.1.5.	Resistenza ai cicli di gelo-disgelo.....	43
4.1.6.	Reazione alcali-silice.....	45
4.1.7.	Resistenza agli attacchi chimici.....	47
4.1.8.	Resistenza all'abrasione.....	48
4.1.9.	Resistenza al fuoco.....	49

4.2.	Influenza dell'aggregato grossolano.....	51
4.3.	Influenza delle fibre.....	53
4.4.	Tecnologie per migliorare la durabilità	54
5.	CONCLUSIONI	58
6.	BIBLIOGRAFIA	61

1. INTRODUZIONE

La nascita di calcestruzzi ad altissime prestazioni (UHPC) si può ricondurre agli anni '90. Il suo utilizzo in ambito sia ingegneristico che architettonico è cresciuto sempre più grazie alla sua elevata duttilità, ma soprattutto alla sua notevole durabilità rispetto ai calcestruzzi ordinari. Il calcestruzzo UHPC è un materiale a base cementizia fibrorinforzato che presenta non solo un'elevata resistenza a compressione ma anche una buona resistenza a trazione. Inoltre, il materiale grazie alla sua migliorata composizione ha una durabilità che è in grado di ridurre drasticamente i costi di manutenzione delle strutture e diminuire gli impatti ambientali sul materiale. Questa tesi è incentrata sullo studio del materiale, approfondendo la sua durabilità in correlazione alla sua composizione e agli agenti ambientali a cui il materiale è esposto.

1.1. *Evoluzione dei sistemi UHPFRC*

Il calcestruzzo ad altissime prestazioni (UHPC) è considerato uno dei materiali da costruzione più promettenti per le future infrastrutture grazie alle sue elevate proprietà meccaniche e alla sua notevole durabilità. È costituito da una combinazione di cemento portland, aggregato fine, fumo di silice, additivi superfluidificanti e fibre.

[1] La sua nascita va ricondotta agli inizi degli anni '70 in cui Yudenfreund et al. introdussero per la prima volta lo sviluppo di paste cementizie a bassa porosità e alta

resistenza a compressione, nello studio di Yundenfreund viene ottenuta una pasta cementizia con una resistenza alla compressione di circa 240 Mpa a 25°C dopo 180 giorni fornendo un trattamento speciale ai clinker e utilizzando un basso rapporto acqua-cemento. Con lo sviluppo di miscele pozzolaniche e le aggiunte di additivi superfluidificanti nei primi anni '80 vengono sviluppati da Bache e Birtchall et al. calcestruzzi DSP (densified with small particle) e calcestruzzi MDF (macro-defect free). Il concetto base delle paste cementizie MDF era quello di rimuovere i difetti macroscopici durante la fase di preparazione, di conseguenza le paste cementizie raggiungevano valori di resistenza a compressione di oltre 200 Mpa, tuttavia il costo estremamente elevato del materiale e il complicato processo di produzione ne limitavano la produzione. Il calcestruzzo DSP viene invece progettato per migliorare la densità del materiale, con la combinazione di fumo di silice, additivi superfluidificanti e condizioni di stagionatura può arrivare a raggiungere valori di resistenza alla compressione di 342 Mpa. A metà degli anni '80 vengono introdotte le fibre di acciaio per superare la fragilità del calcestruzzo, viene così sviluppato il calcestruzzo SIFCON che incorpora fino al 20% di fibre in acciaio, ciononostante presentava una scarsa lavorabilità che ne ha impedito quindi una più ampia applicazione. Infine, a metà degli anni '90 Richard e Cheyrezy, grazie ai progressi dei superfluidificanti, sviluppano il calcestruzzo RPC (reactive powder concrete) che presenta una lavorabilità superiore, viene considerato la pietra miliare nello sviluppo dei calcestruzzi UHPC. Dopo gli anni 2000 invece non si persegue più la ricerca del miglioramento della resistenza ma

l'attenzione nello sviluppo degli UHPC si sposta sul fattore ecologico ed economico, vengono così impiegati diversi metodi come la riduzione di contenuto di cemento e di fumo di silice, riduzione del contenuto di legante, sostituzione della sabbia di quarzo finemente macinata con sabbia convenzionale, riduzione del contenuto di fibre con sistemi di fibre ibride e utilizzo di stagionatura standard invece della stagionatura a caldo per ridurre il consumo energetico. Inoltre, molte centrali elettriche hanno modificato il processo di combustione per ottenere benefici ambientali, aumentando il contenuto di carbonio nelle ceneri volanti, il che può compromettere le proprietà dell'UHPC. Per questo motivo l'applicazione di un UHPC economico è effettuata solo per piccoli interventi come connessioni o giunti. [2] [3]

1.2. Inquadramento Normativo

Sul mercato italiano gli UHPC sono ancora poco presenti soprattutto a causa dell'attuale prescrizione normativa, che penalizza l'uso di calcestruzzi con resistenza a compressione superiore ai 55 MPa.

Le NTC 2018 considerano calcestruzzi ordinari quelli fino alla classe C90/105, ma per calcestruzzi 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:

1. Per le classi di resistenza superiori a C45/55, la resistenza caratteristica e tutte le grandezze meccaniche e fisiche che hanno influenza sulla resistenza e durabilità del conglomerato devono essere accertate prima dell'inizio dei lavori tramite un'apposita sperimentazione preventiva e la produzione deve seguire specifiche procedure per il controllo di qualità
2. Per classi di resistenza superiore a C70/85 si rinvia al caso C)

Tab. 4.1.I – *Classi di resistenza*

Classe di resistenza
C8/10
C12/15
C16/20
C20/25
C25/30
C30/37
C35/45
C40/50
C45/55
C50/60
C55/67
C60/75
C70/85
C80/95
C90/105

Figura 1 Classificazione CLS NTC 2018

In questo caso si fa riferimento infatti alla lettera C del capitolo 11.1 che prevede:

C) materiali e prodotti per uso strutturale non ricadenti in una delle tipologie A) o B.

In tali casi il fabbricante dovrà pervenire alla Marcatura CE sulla base della pertinente “Valutazione Tecnica Europea” (ETA), oppure dovrà ottenere un “Certificato di Valutazione Tecnica” rilasciato dal Presidente del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, previa istruttoria del Servizio Tecnico Centrale, anche sulla base di Linee Guida approvate dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, ove disponibili; con decreto del Presidente del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, su conforme parere della

competente Sezione, sono approvate Linee Guida relative alle specifiche procedure per il rilascio del “Certificato di Valutazione Tecnica”. [4]

Le citate Linee guida per questi calcestruzzi ad alte prestazioni esistono, sono state infatti emanate le “Linee guida sui calcestruzzi ad alta resistenza” (dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici), che presentano le seguenti definizioni:

-calcestruzzo ad alte prestazioni (AP): “conglomerato cementizio caratterizzato in generale da rapporto a/c minore di 0.45, avente resistenza caratteristica cubica superiore a 55 N/mm^2 , ed inferiore o uguale a 75 N/mm^2 ;

-calcestruzzo ad alta resistenza (AR): “conglomerato cementizio caratterizzato in generale da rapporto a/c minore di 0.35, avente resistenza caratteristica cubica superiore a 75 N/mm^2 ed inferiore o uguale a 115 N/mm^2 . [5]

Le prime raccomandazioni mondiali per la produzione e caratterizzazione dell’UHPFRC e la sua progettazione strutturale sono state pubblicate in Francia nel 2002. L’accettazione tecnica della progettazione, dei processi industriali e i precedenti soddisfacenti francesi di 15 anni di esperienza nella costruzione di componenti in UHPFRC ha reso possibile l’avvio del processo di normazione in Francia sulla base del consenso tecnico espresso nelle raccomandazioni dell’AFGC (Association Française de Génie Civil).

Sono stati elaborati tre documenti:

- la norma NF P18-470 per UHPFRC come prodotto da costruzione;

- la norma NF P18-710 per la progettazione di strutture in UHPFRC che costituisce aggiunta nazionale all'Eurocodice 2;
- la norma NF P18-451 per l'esecuzione di strutture in UHPFRC; [6]

Architecture of French standards for UHPFRC

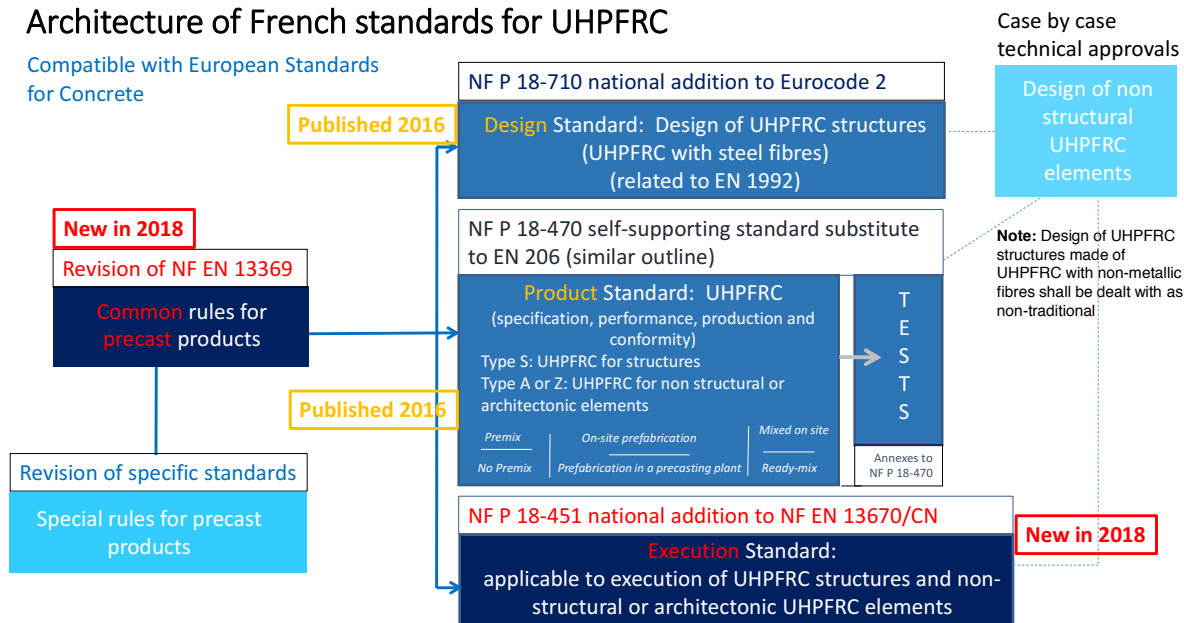


Figura 2 Schema Normativo per UHPFRC Francia

1.3. Caratterizzazione generale di UHPFRC

L'UHPFRC (Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete, ci si riferisce ad un materiale che contiene fibre di acciaio), sinonimo di UHPC, è il risultato di 3 idee principali, quali: il miglioramento della resistenza e della compattezza dei materiali tramite la riduzione del rapporto acqua-cemento reso possibile grazie all'aggiunta di additivi superfluidificanti; l'impegno di fibre di acciaio per fornire una capacità di trazione; la riduzione delle imperfezioni naturali dovuta alle dimensioni degli aggregati. Questa combinazione di concetti ha permesso di

ottenere un calcestruzzo ad altissime prestazioni con un valore di 150 MPa di resistenza alla compressione e 8 Mpa di resistenza a trazione tale da considerare l'eventuale eliminazione dell'armatura secondaria. [6] [7]

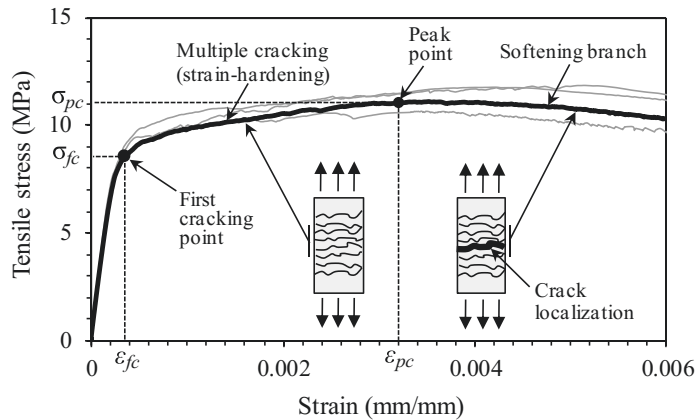


Figura 3 Sforzo-deformazione UHPFRC [2]

Per ottenere un materiale così resistente viene applicato un basso rapporto acqua-cemento solitamente intorno allo 0,2 con l'aggiunta di additivi e con un trattamento termico a 90°C. Di conseguenza le proprietà meccaniche di UHPFRC sono più significativamente influenzate dal tipo di materiali cementizi utilizzati, dalle condizioni di stagionatura e dalla dimensione degli aggregati rispetto a quelle di un calcestruzzo ordinario oltre che dalle caratteristiche di distribuzione delle fibre. L'elevata resistenza di questo materiale porta a una notevole riduzione del peso proprio delle strutture, stimato circa un terzo o la metà del messo proprio delle strutture realizzate con calcestruzzi ordinari, pertanto UHPFRC ha attirato l'attenzione da parte di molti progettisti che cercano di produrre strutture più sottili con la conseguente riduzione

dei costi di costruzione complessivi. In generale l'UHPFRC non viene utilizzato in applicazioni in cui un calcestruzzo ordinario soddisfa i criteri di prestazione a causa del suo elevato costo di produzione. Sono attualmente disponibili tre diversi metodi per ridurre il costo di UHPFRC come la riduzione della quantità di fibre di acciaio, la riduzione di polvere sostituendola con aggregati grossi e l'eliminazione di trattamenti termici. [2] L'UHPC è un calcestruzzo autocompattante e autolivellante e la sua lavorabilità è un fattore molto importante nella sua progettazione, viene solitamente studiata in base al valore di slump, molti risultati della letteratura mostrano che l'aggiunta di aggregati grossolani ha un impatto negativo sulla sua lavorabilità.

Il calcestruzzo ad altissime prestazioni è noto per fornire caratteristiche di durabilità altamente desiderabili in condizioni di esposizione avverse grazie alla sua elevata densità e omogeneità.

Dato il basso rapporto acqua-cemento (0,15-0,25), l'elevata densità, l'elevato contenuto di fibre che lo caratterizzano ($\geq 2\%$) e la corretta aggiunta di additivi chimici l'UHPC presenta una buona fluidità ed elevate proprietà meccaniche, inoltre ha una durabilità superiore al calcestruzzo ordinario poiché la sua matrice è quasi impermeabile all'anidride carbonica, al cloruro, al solfato etc. [7]

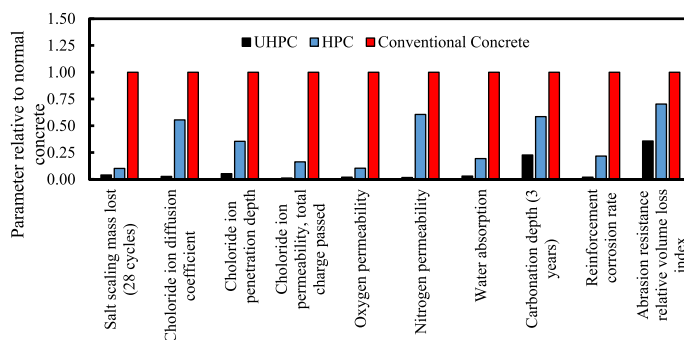


Figura 3. Valutazione della durabilità di UHPC, HPC, calcestruzzo convenzionale

Le proprietà di UHPFRC sono significativamente influenzate dal tipo di legante, dimensione e tipologia degli aggregati, filler e aggiunte minerali, additivi chimici condizioni di stagionatura, processi di produzione, distribuzione, tipologia e volume delle fibre.

2. Composizione dei calcestruzzi UHPC

Il calcestruzzo UHPC è definito come un materiale con proprietà nettamente superiori rispetto ai calcestruzzi ordinari sia in termini di resistenza che di durabilità. Esse derivano soprattutto dalle caratteristiche dei suoi principali componenti, ovvero la matrice cementizia e le fibre.

In generale la miscela cementizia si articola in tre gruppi di componenti fondamentali:

- Un premix, che comprende la miscela granulare composta da cemento, fumo di silice e aggregati;
- I liquidi, ovvero acqua e additivi
- Le fibre

I materiali costituenti vengono proporzionati attraverso un mix-design che bilancia il quantitativo di legante, aggregati, acqua e additivi per ottimizzare la miscela granulare che determina così una matrice cementizia a trama finissima e altamente omogenea.

[8]

Componenti [kg/mc]	Calcestruzzo ordinario	HPC	UHPC
Cemento Portland	<400	410	700-1000
Aggregato grosso	≈1000	920	0-200
Aggregato Fine, Sabbia	≈700	620	1000-2000
Fumi di Silice	-	40	200-300
Superfluidificanti	-	5	10-40
Acqua	>200	100-150	110-200
Fibre	-	-	>150
Rapporto a/c	>0.35	0.28-0.38	<0.24
Rapporto a/legante	-	<0.38	<0.22
Densità	2000-2800	2000-2800	>2500

Figura 4 Esempio di composizione di un calcestruzzo ordinario, di un HPC e di UHPC [Spasojevic, 2008]

2.1. Cemento

La scelta del tipo di cemento è di certo uno dei fattori più importanti per la caratterizzazione di un calcestruzzo UHPC perché esso ha una grande influenza sulle proprietà del materiale e sulla sua resistenza. Il cemento deve essere selezionato in base alla sua richiesta di acqua considerando che una maggiore quantità di acqua comporta una riduzione della resistenza a compressione della pasta cementizia. [9] A seconda delle condizioni ambientali e delle applicazioni i cementi che vengono utilizzati sono i tipi da I a V e il cemento bianco. Il tipo III e il cemento bianco sono i più utilizzati in quanto garantiscono una presa e uno sviluppo della resistenza rapidi grazie all'elevato contenuto di C3S mentre se non è richiesta un'elevata resistenza iniziale e si preferisce un ritiro relativamente basso si può utilizzare in alternativa il cemento di tipo I. [3]

Tipologia	Utilizzo
I	Da utilizzare quando le proprietà speciali specificate per qualsiasi altro tipo non sono richieste
IA	Cemento aerato per gli stessi utilizzi del tipo I, dove si desidera aerazione
II	Per uso generale, in particolare quando si desidera una moderata resistenza ai solfati
IIA	Cemento aerato per gli stessi utilizzi del tipo II, quando si desidera aerazione
II(MH)	Per uso generale, in particolare quando si desidera un moderato calore di idratazione e una moderata resistenza ai solfati
II(MH)A	Cemento aerato per gli stessi utilizzi del tipo II(MH), dove si desidera aerazione
III	Da utilizzare quando si desidera un'elevata resistenza iniziale
IIIA	Cemento aerato per gli stessi utilizzi del tipo III, dove si desidera aerazione
IV	Da utilizzare quando si desidera un basso calore di idratazione
V	Da utilizzare quando si desidera un'alta resistenza ai solfati

Figura 5 Tipologie di Cementi ASTM 2020 [10]

2.2. Gli aggregati

La forma, la struttura e la composizione mineralogica degli aggregati devono essere considerate quando si progetta l'UHPC, esse influiscono sul quantitativo di acqua necessario per la formazione del calcestruzzo. [9] Per la preparazione dell'UHPC si utilizza solitamente sabbia di quarzo finemente macinata con dimensioni comprese tra i 150 e 600 μm , vengono proposti degli aggregati alternativi, nella *Figura 6* sono mostrate le alternative e il loro effetti sulle diverse proprietà dell'UHPC. [3]

SCMs type		Silica fume	Rice husk ash	Fly ash		Slag	Glass powder
				Type C	Type F		
Chemical composition (% by mass)	SiO ₂	93.9	87.40	36.50	58.40	36.80	73.00
	Al ₂ O ₃	-	0.40	24.80	23.80	9.20	1.50
	Fe ₂ O ₃	0.59	0.30	5.20	4.19	0.76	0.40
	CaO	1.85	0.90	28.10	7.32	37.10	11.30
	MgO	0.27	0.60	5.00	1.11	9.50	1.20
	SO ₃	-	0.40	2.50	3.04	0.06	0.00
	LOI	0.30	4.60	0.50	2.13	5.10	0.60
Blaine (m ² /kg)		-	-	465	366	589	-
B.E.T. (m ² /kg)		18500	64700	-	3021	-	-
Specific gravity		2.2	2.05	2.70	-	2.90	Based on application
Particle shape factor		-	-	1.20	1.20	1.58	-
Typical content (by volume of binder, %)		5-25	20	40-60	10-30	30-50	-
Workability		↕	↓	↑	↑	↑	↑
28-day f'_c (MPa)		↕	↑ ~30%	↓ ~10%	↓ ~20%	↕	↑ ~25%
28-day autogenous shrinkage (μm/m)		↕	↓ ~80%	↓ ~25%	↓ ~35%	↓ ~15-65%	↔
Durability		↑	-	↔	↔	↔	↕
Reference		[83, 84]	[33, 85, 86]	[31, 87]	[46, 88, 89]	[31, 90]	[32, 91, 92]

Note: ↑ stands for increases, ↓ stands for lower, ↕ stands for increase or lower, ↔ stands for no significant impact, - stands for limited research, and f'_c stands for compressive strength. These are compared with the reference mixture in Table C in Appendix.

Particle shape factor stands for the degree of deviation from an ideal shape (When the value is closer to 1, the particle shape is closer to spherical).

Figura 6 Composizione chimica e proprietà fisiche di aggregati alternativi

L'UHPC è un calcestruzzo autocompattante e autolivellante e la sua lavorabilità è un fattore importante nella progettazione. La lavorabilità dell'UHPC viene di solito studiata in base ai valori di slump, molti studi mostrano che l'aggiunta di aggregati grossolani alla matrice di UHPC abbia un impatto negativo sulla lavorabilità. L'incremento di aggregato grossolano porta ad un aumento dell'impasto intorno all'aggregato con conseguente riduzione della fluidità, al tempo stesso determina la formazione di uno scheletro equivalente che aumenta la rigidità e le prestazioni a compressione del conglomerato cementizio. Tuttavia, i risultati di alcune ricerche suggeriscono che quando l'aumento di aggregato grossolano supera una certa soglia la resistenza a compressione di UHPC diminuisce. Sono stati condotti diversi studi sperimentali per determinare gli effetti della dimensione dell'aggregato sulla resistenza a compressione, sono state individuate quattro relazioni tra la resistenza a

compressione e la dimensione dell'aggregato: (a) diminuisce, (b) aumenta, (c) rimane invariata, (d) aumenta poi diminuisce con l'aumento della dimensione dell'aggregato grosso (Figura 7). [11]

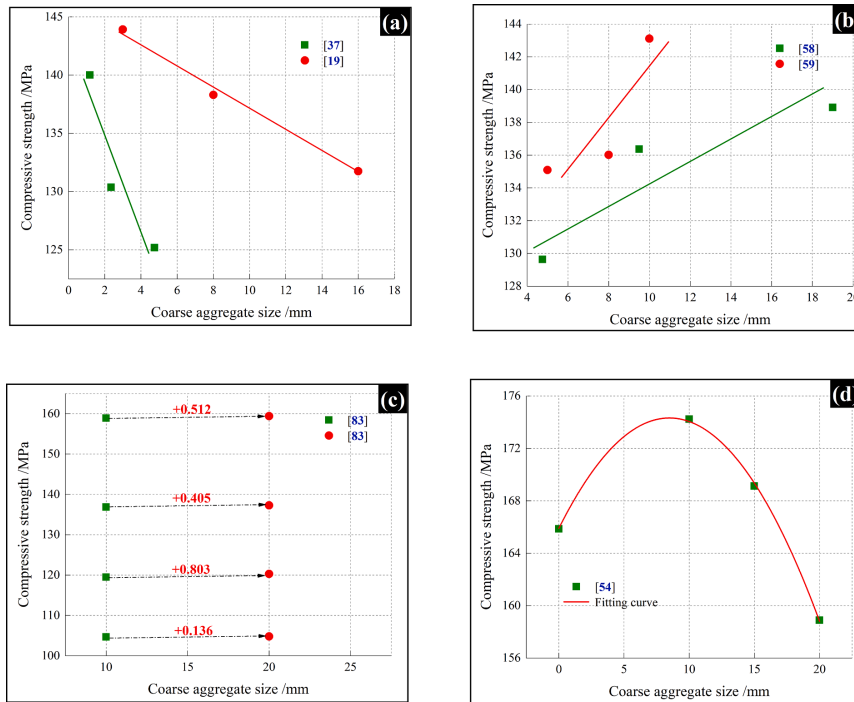


Figura 7 Relazione tra resistenza a compressione e dimensione degli aggregati

2.2.1. Aggregati fini

La sabbia di fiume è il principale aggregato fine, utilizzato per sostituire la sabbia di quarzo, tuttavia la dimensione della sabbia di fiume varia da 0mm a 4,75 mm ovvero 5-8 volte superiore a quella della sabbia di quarzo finemente macinata, di conseguenza la totale sostituzione può compromettere la densità, si va quindi a introdurre la sabbia calcarea che presenta un costo basso, una composizione omogenea e disponibilità a livello mondiale, grazie all'utilizzo di quest'ultima il costo delle materie prime per unità

di volume è stato ridotto del 40% senza sacrificare la capacità di lavoro e le prestazioni meccaniche. [3]

2.2.2. Aggregati grossolani

I principi di base per lo sviluppo di UHPC sono stati stabiliti di Richard e Cheyrezy in cui gli aggregati grossolani (cioè di dimensioni superiori a 4,75mm) sono generalmente eliminati. Ciò è attribuito agli effetti negativi degli aggregati grossolani infatti essi diminuiscono significativamente la densità iniziale, la concentrazione di tensioni al contatto tra gli aggregati porta alla debolezza della matrice di UHPC, la zona di transizione interfacciale (ITZ) tra aggregato grosso e matrice è più debole di quello tra sabbia a matrice. Tuttavia, sono stati riportati anche vantaggi sull'uso di aggregati grossolani, come diminuzione del volume della pasta cementizia e il miglioramento della resistenza alla penetrazione. [3]

2.3. *I fumi di silice*

Il fumo di silice è un costituente tipico ma critico per le miscele UHPC, sono particelle molto fini e sferiche, di colore grigio o bianco, con diametro medio inferiore nel 95% dei casi a 1 μm con un utilizzo tipico che va dal 5% al 25% a seconda del volume di legante. A causa delle piccole dimensioni delle particelle, l'aggiunta di fumo di silice migliora la densità, le microparticelle grazie alla loro struttura amorfa riempiono i vuoti

interstiziali tra i granuli di cemento e migliorano l'aderenza dei vari componenti, favorendo così la durabilità dell'UHPC. La reazione con la calce libera crea un gel di C-S-H molto resistente, inoltre l'utilizzo di fumo di silice migliora la zona di interfaccia tra pasta di cemento e aggregati riducendone lo spessore.

In particolare, è stato studiato che il fumo di silice aumenta la resistenza a compressione a 28 gg, migliora il legame tra fibre di acciaio e matrice cementizia, alte percentuali di fumo di silice aumentano significativamente sia il ritiro autogeno del calcestruzzo sia il ritiro plastico, mentre diminuiscono sostanzialmente le deformazioni dovute al creep. [3] [8]

2.4. *Altre aggiunte minerali*

Tra i materiali cementizi complementari oltre al fumo di silice, che è uno dei principali artefici delle straordinarie proprietà dei materiali cementizi innovativi [8], possiamo avere ceneri volanti, scorie, polvere di vetro, cenere di lolla di riso che vanno a ridurre i costi e migliorarne le proprietà. Sono caratterizzati da un'elevata quantità di SiO_2 e CaO reattivo che promuovono l'idratazione del cemento attraverso reazioni pozzolaniche e/o idrauliche [3].

2.4.1. Cenere di lolla di riso

La cenere di lolla di riso viene utilizzata solitamente in sostituzione parziale o integrale del fumo di silice nonostante abbia un'area superficiale più elevata che la rende più incline ad assorbire acqua libera, questo ne comporta una diminuzione della lavorabilità. [3]

2.4.2. Ceneri volanti

Le ceneri volanti di tipo C e di tipo F sono utilizzate nello sviluppo di UHPC, le ceneri volanti di tipo C subiscono reazioni sia idrauliche che pozzolaniche, mentre quelle di tipo F subiscono principalmente una reazione pozzolanica a causa della mancanza di CaO; esse sostituiscono comunemente il cemento con rapporti in volume del 40%-60% per il tipo C e del 10%-30% del tipo F. La forma delle particelle di ceneri volanti è più sferica rispetto al cemento, il che riduce l'attrito interparticellare e ne aumenta così la lavorabilità. Le ceneri volanti possono attenuare il ritiro poiché è disponibile più acqua libera per mantenere l'umidità relativa nei pori, a causa della minore reattività all'idratazione, la sostituzione del cemento con cenere volante ritarda il processo di idratazione andando a migliorare la microstruttura a lungo termine favorendo la durabilità. [3]

2.4.3. Scorie

A seconda dei principali ossidi metallici, le scorie utilizzate nell'UHPC possono includere scorie di ferro, scorie di rame, scorie di bario. Sono solitamente utilizzate per sostituire il cemento con un rapporto di sostituzione del 30%-60% a seconda del volume di legante. Le particelle di scorie hanno forme angolari che aumenta l'attrito interparticellare riducendo così la lavorabilità rispetto all'utilizzo della stessa quantità di ceneri volanti. Analogamente alle ceneri volanti la minor reattività all'idratazione tende a perfezionare la microstruttura dell'UHPC. [3]

2.4.4. Polvere di vetro

La polvere di vetro viene utilizzata per sostituire il cemento o il fumo di silice nell'UHPC con un rapporto di sostituzione che va dal 10% al 50%. La superficie liscia della polvere di vetro contribuisce a ridurre l'attrito tra le particelle inoltre la microstruttura densa della polvere di vetro le conferisce un basso assorbimento superficiale dell'acqua pertanto la sua aggiunta migliora la lavorabilità. [3]

2.5. Additivi

Gli additivi sono utilizzati per modificare le proprietà dell'UHPC fresco e/o indurito. Vengono utilizzate diverse tipologie di additivi che conferiscono alla miscela diverse proprietà. Possiamo trovare additivi che modificano la viscosità composto da polimeri

solubili in acqua , i più utilizzati sono i derivati dell'etere di cellulosa e i polisaccaridi di origine microbica; additivi per la riduzione del ritiro composto da sostanze chimiche organiche, agisce riducendo la tensione superficiale nella soluzione dei pori della matrice UHPC; agenti espansivi che sono polveri in grado di generare prodotti espansivi durante l'indurimento dell'UHPC, la sollecitazione espansiva compensa la sollecitazione di ritiro e quindi riduce il ritiro dell'UHPC (Figura 8). [3]

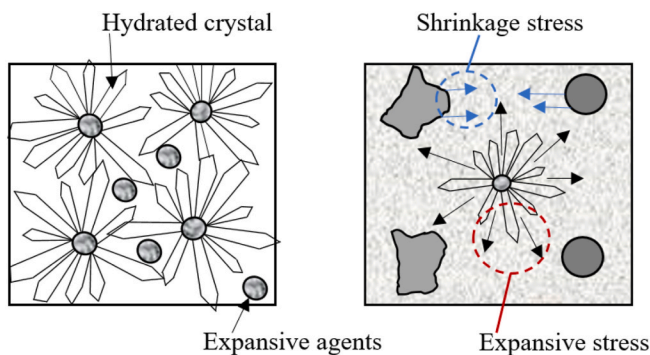


Figura 8 Meccanismo degli agenti espansivi

L'additivo più utilizzato per questa tipologia di calcestruzzi è l'additivo superfluidificante, in grado di mantenere basso il rapporto acqua/cemento e alta la lavorabilità. Questi additivi sono stati introdotti anche per far fronte all'aggiunta di fumi di silice, i quali richiedono un'elevata quantità di acqua a causa delle dimensioni finissime, quindi per mantenere una buona lavorabilità della miscela. I vantaggi derivanti dal loro utilizzo sono sicuramente la buona lavorabilità consentita e con la riduzione del rapporto acqua/cemento il conseguente aumento della resistenza e della durabilità della miscela. [8]

2.6. Le fibre

Per le sue caratteristiche naturali il calcestruzzo presenta alcuni difetti quali l'elevata fragilità, bassa resistenza a trazione e bassa resistenza alla fessurazione. Per ovviare a questi inconvenienti vengono incorporate le fibre nel calcestruzzo per aumentarne la resistenza. Le fibre possono essere generalmente classificate in tre tipi, in base alla loro struttura: fibre metalliche, fibre sintetiche, fibre minerali. Le fibre più comunemente utilizzate in UHPC includono fibre di acciaio, fibra PE, fibra PVA, fibra PP, fibra di carbonio e fibra di basalto. Le fibre di acciaio con il loro alto modulo di Young, carico di rottura e un'eccellente stabilità a temperatura ambiente sono considerate le fibre più idonee per la realizzazione di calcestruzzi UHPC. Le fibre PP, PVA e PE hanno una resistenza a trazione inferiore rispetto alle fibre di acciaio, il loro utilizzo è consigliato per migliorare la resistenza al fuoco del materiale mentre le fibre di carbonio hanno la più alta resistenza alla trazione e modulo di Young, possono migliorare le proprietà meccaniche e ridurre il ritiro autogeno del calcestruzzo con un piccolo dosaggio. [12]

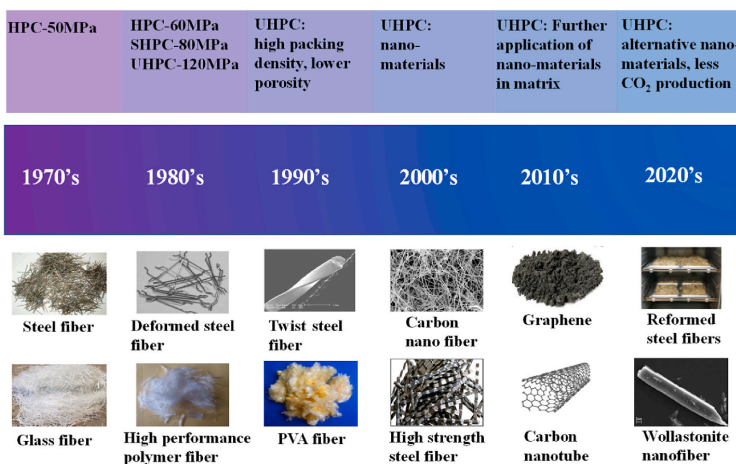


Figura 9 Diverse tipologie di fibre e il loro sviluppo negli anni

Le elevate prestazioni di UHPC non sono determinate solo dalla composizione del materiale ma sono fortemente influenzate anche dall'orientamento e dalla dispersione della fibra, quindi dalla direzione di colata, geometria della cassaforma e proprietà reologiche della miscela. La direzione del flusso ha un impatto significativo sull'orientamento delle fibre, è stato studiato infatti che le fibre tendono ad allinearsi lungo la direzione del flusso, l'orientamento può essere migliorato aumentando la distanza di getto come, ad esempio, può avvenire per elementi longitudinali come pilastri o travi. Da diversi studi è emerso che le prestazioni di UHPC aumentano quando la direzione del flusso risulta perpendicolare alla direzione di trazione dell'elemento. Altro fattore influente per lo studio delle caratteristiche della miscela cementizia di UHPC è la geometria delle casseforme, esse hanno un effetto significativo in quando le fibre che si trovano in prossimità delle pareti sono naturalmente allineate alla cassaforma, si verifica il così detto "effetto parete", solo quando la distanza dalla cassaforma è inferiore o uguale alla metà della lunghezza delle fibre; l'effetto parete è maggiore per esemplari più piccoli, questo porta a un "size effect" che indica che campioni con diverse dimensioni performano diversamente a causa della differenza di orientamento delle fibre. Su campioni in larga scala l'effetto parete è inferiore quindi anche le prestazioni sono inferiori rispetto a campioni su piccola scala; tuttavia, se le strutture su larga scala presentano sezioni strette può verificarsi un orientamento delle fibre locale più elevato e maggiori capacità a flessione.

Per ottenere migliori prestazioni di UHPC, i ricercatori hanno sviluppato diversi dispositivi di colata, lo scopo di utilizzare diversi dispositivi è quello di ottimizzare i modelli di flusso per promuovere l'allineamento delle fibre lungo la direzione di trazione principale. Sono stati studiati quattro dispositivi: dispositivo a L; scivolo a 30 gradi, sessola convenzionale, canale di allineamento delle fibre e tavolo vibrante. I primi due dispositivi possono garantire un elevato allineamento delle fibre, tuttavia il rischio di blocco aumenta con l'aumentare della lunghezza delle fibre e del volume (per il dispositivo a L). [13]

2.6.1. Fibre di acciaio

Le fibre di acciaio sono le fibre più comunemente utilizzate negli UHPC, con l'aumento del contenuto di fibre di acciaio dallo 0% al 2% in volume, la resistenza a flessione a 28 giorni e la tenacità dell'UHPC sono aumentate rispettivamente del 120% e del 3360%. [3] Per garantire la dispersione uniforme delle fibre e ottenere una soddisfacente lavorabilità l'aggiunta di fibre di acciaio è controllata al di sotto del 3% in volume. Un maggior contenuto di fibre di acciaio aumenta il contatto superficiale tra le fibre e la matrice portando a una maggiore forza coesiva e una ridotta lavorabilità. [12]

Alla fine degli anni '90 Naaman ha sviluppato un nuovo tipo di fibra di acciaio twisted chiamato fibra "Torex" (*Figura 11*), questa fibra realizzata con filo di acciaio ad altissima resistenza è progettata per avere una geometria poligonale a sezione trasversale che

la rende disponibile alla torsione lungo il suo asse. Con questo tipo di fibra si raggiungono valori di sollecitazione massima tre volte superiori a quelle delle fibre di acciaio dritte e corte, sulla base di questa migliorata capacità anche la resistenza a trazione e la resistenza alla deformazione post-cracking sono sostanzialmente migliorate.

Recentemente Yoo et al. Hanno proposto un altro metodo per migliorare le prestazioni a flessione del calcestruzzo UHPFRC con fibre di acciaio lunghe dritte, aumentando la lunghezza della fibra la resistenza a flessione, la capacità di deflessione e la resistenza del calcestruzzo sono notevolmente aumentate, ciò è dovuto al fatto che con la maggiore lunghezza della fibra viene aumentata anche l'area di legame tra la fibra stessa e la matrice. [2]

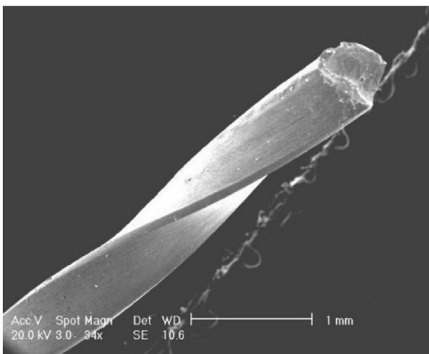


Figura 11 Esempio di fibra torex

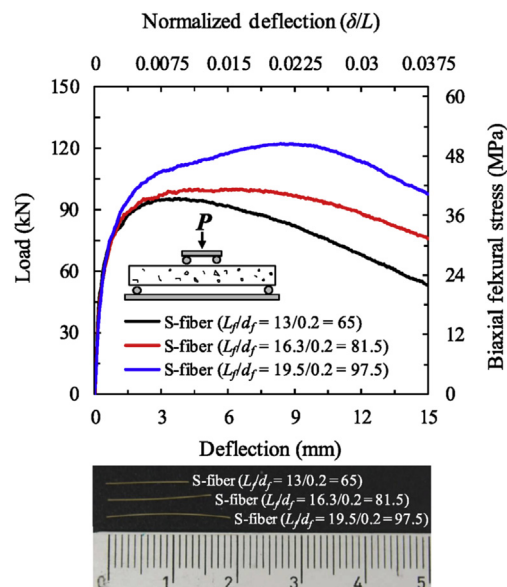


Figura 10 Risposta a flessione biassiale UHPFRC

L'ottimizzazione dell'orientamento e della distribuzione delle fibre contribuisce a migliorare il comportamento meccanico dell'UHPC. L'orientamento delle fibre può essere utilizzato per stimare il grado di allineamento delle fibre lungo la direzione della sollecitazione di trazione. Un orientamento più elevato indica che ci sono più fibre orientate in corrispondenza della direzione di trazione che aiuta a frenare la crescita della fessura, portando così a una maggiore resistenza. [12]

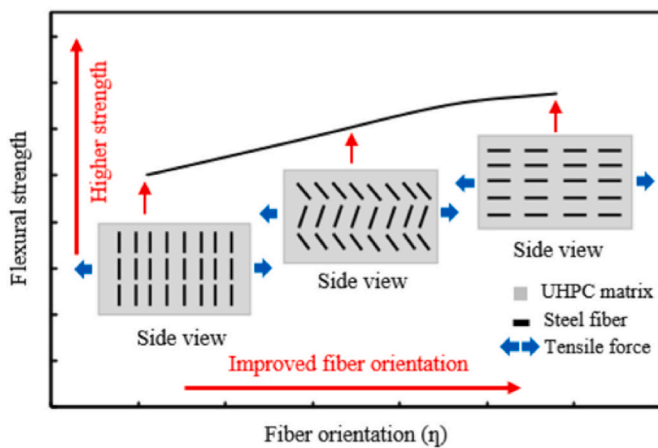


Figura 12 Relazione tra orientamento delle fibre e resistenza a flessione di UHPC

3. Produzione e messa in opera

I calcestruzzi UHPC sono caratterizzati da una elevatissima resistenza a compressione e maggiore durabilità rispetto a calcestruzzi tradizionali, caratteristiche possibili grazie all'impiego di superfluidificanti che consentono un basso rapporto acqua/cemento.

La produzione di un UHPC avviene inizialmente seguendo una formulazione nominale in funzione dell'opera in cui dovrà essere utilizzato, successivamente verrà confermata la validità del materiale e infine verrà monitorato con successivi test di controllo.

Nel corso degli anni sono state studiate diverse formulazioni al fine di garantire prestazioni elevate sia allo stato indurito che allo stato fresco, per il raggiungimento di tali prestazioni si è visto che il calcestruzzo UHPC deve rispettare le seguenti indicazioni:

- L'utilizzo di un cemento fine in grado di ridurre la domanda di acqua;
- Utilizzo di rapporto aggregati fini/cemento intorno a 1,4;
- Utilizzo di fumi di silice con un basso contenuto di carbonio;
- Utilizzo di particelle di fumi di silice più grandi rispetto alle convenzionali al fine di ridurre la superficie specifica e quindi la richiesta di acqua;
- Utilizzo di polveri di silice o altre polveri in contenuto del 25% del peso del cemento;
- Utilizzo di superfluidificanti in grado di garantire un'ottima fluidità della pasta cementizia;

- Utilizzo di un rapporto acqua/cemento compreso tra 0,16 e 0,27. [14]

Cemento (Tipo I)	SF	Sabbia	Polveri sottili	SP	Acqua	Riferimento
1	0.3	1.4	0.3	0.027	0.15	Graybeal (2006)
1	0.25	1.1	0.3	0.016	0.25	Park et al. (2008)
1	0.25	1.4	0.25	0.014-0.024	0.22	Wille et al., 2011c
1	0.25	1.1	0.3	0.067	0.2	Park et al. (2011)

Figura 13 Composizione tipo UHPC



Figura 14 Fasi della composizione del materiale

Le miscele UHPC vengono progettate per ottenere un'elevata densità di impacchettamento delle particelle, che contribuisce a una bassa porosità, elevata

resistenza meccanica e impermeabilità; il modello teorico più utilizzato per progettare UHPC è quello di Anderson e Adreassen; tuttavia, questo metodo considera solo le particelle in condizioni asciutte e ciò potrebbe non rispecchiare la realtà; pertanto, è stato introdotto anche il metodo della densità di impacchettamento a umido. Tuttavia, la massima densità di impacchettamento non sempre determina le migliori prestazioni, per cui viene sviluppato anche il metodo basato sulle prestazioni.

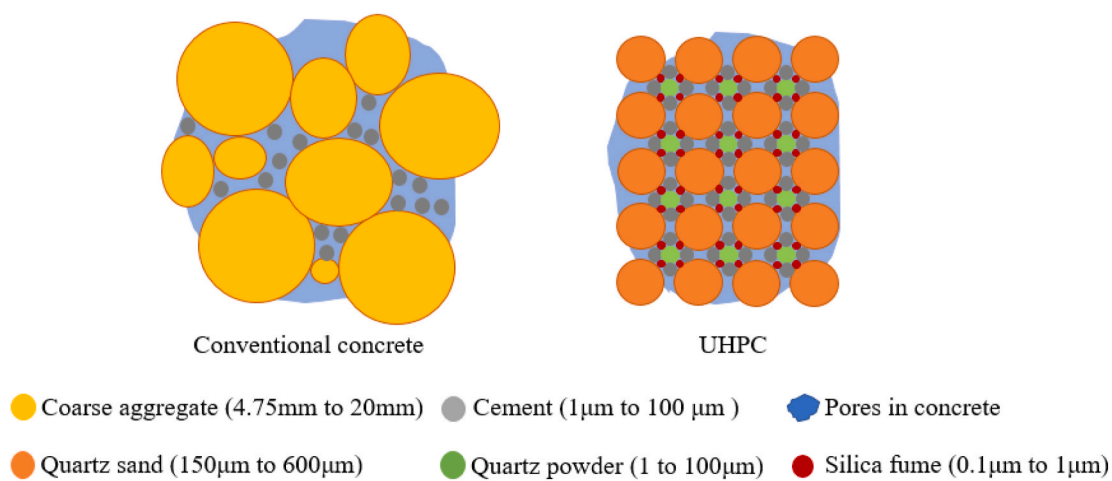


Figura 15 Confronto tra impacchettamento particelle UHPC e calcestruzzo ordinario

3.1. *Metodi basati sui modelli di impacchettamento delle particelle*

Esistono due modelli tipici a secco per la progettazione della miscela, discreto e continuo. Il modello continuo è quello preferito per la progettazione di UHPC perché consente di ottenere uno scheletro delle particelle più denso che considera l'effetto della dimensione minima delle particelle, tuttavia questo non considera l'effetto dell'acqua la quale svolge un ruolo significativo nello sviluppo delle prestazioni di UHPC, infatti quando le particelle fini sono asciutte l'elevato attrito delle particelle

ostacola l'aumento della densità di impacchettamento mentre quando le particelle sono sature, o sovra sature, le forze di attrito sono quasi nulle, inoltre l'aggiunta di superfluidificanti può influenzare lo spessore del film di acqua sulle particelle e quindi la sua densità di impacchettamento.

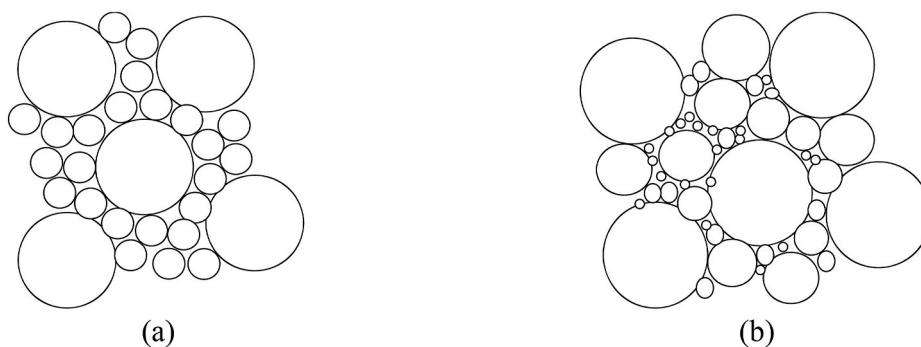


Figura 16 Due differenti modelli di impacchettamento delle particelle: (a) modello discreto (b) modello continuo

3.2. Metodo basato sulle prestazioni

Per progettare miscele UHPC in conformità alle prestazioni desiderate per le diverse applicazioni sono stati proposti metodi basati sulle prestazioni. In primo luogo, la combinazione dei leganti prevede tre sottofasi: selezione dei leganti in base alle caratteristiche di fluidità, limitazione delle combinazioni di leganti considerando l'impacchettamento delle particelle, in fine selezione delle combinazioni di leganti in base alle proprietà reologiche. In secondo luogo, il rapporto acqua/cemento viene determinato considerando la lavorabilità e la resistenza a compressione a 28 giorni. Il vantaggio principale del metodo basato sulle prestazioni è che i parametri di

progettazione della miscela, come il contenuto di fibre e il rapporto acqua/legante possono essere determinati direttamente e con precisione in base alle prestazioni stabilite in fase di progetto. [3]

3.3. *Messa in opera*

La messa in opera dei calcestruzzi UHPC deve essere effettuata seguendo delle specifiche disposizioni tenendo in considerazione la fluidità del composto e la sua elevata capacità auto compattante. In fase di gettata è raccomandata un'altezza di caduta inferiore ai 0,50 metri ed è consigliato sempre un getto continuo poiché si potrebbe innescare l'essiccazione della superficie e si renderebbe necessaria l'operazione di cucitura tra i diversi strati. Il getto del calcestruzzo viene sconsigliato con una temperatura al di sotto dei 5°C e quando la temperatura esterna è superiore ai 35°C, devono essere presi degli accorgimenti simili a quelli raccomandati per i calcestruzzi ordinari. I campioni prelevati dalla gettata vengono testati a compressione poco prima di rimuovere le casseforme, la stagionatura deve essere svolta con particolare attenzione per avere un bleeding molto basso, se non del tutto inesistente, inoltre è necessario evitare l'essiccazione prima della presa e la microfessurazione dopo la presa. [8]

L'impiego delle fibre all'interno della miscela UHPC compromette e influenza negativamente la lavorabilità del calcestruzzo fresco, nonostante l'efficacia delle fibre

aumenti con l'aumentare del fattore di forma (rapporto tra la lunghezza e il diametro delle fibre l_f/d_f), maggiore è il loro contenuto, maggiore è la difficoltà nella lavorazione della miscela. In generale più piccolo è il diametro delle fibre (elevato fattore di forma) più è difficile disperdere le fibre, minore è la lunghezza più facile è la dispersione, questo perché fibre lunghe e con un diametro piccolo tendono ad agganciarsi tra di loro. [8] Nella progettazione preliminare di un calcestruzzo UHPFRC si deve tener conto quindi della dispersione e dell'orientamento delle fibre, fibre uniformemente disperse determinano una maggiore resistenza a flessione. Una dispersione uniforme migliora l'effetto di incapsulamento della malta e di conseguenza le proprietà interfacciali fibra-matrice aumentano; la dispersione può essere controllata attraverso la viscosità della malta, in generale il coefficiente di dispersione delle fibre (α) aumenta con la viscosità e con esso anche la resistenza a flessione e la tenacità della matrice cementizia. [3]

Data l'elevata fluidità del calcestruzzo UHPFRC è importante evitare la segregazione delle fibre. Uno studio effettuato da Boulekbache et al. riporta che le fibre si orientano in maniera diversa in base al flusso del fluido, infatti questo esercita forze e momenti sulle fibre che possono allinearsi perpendicolarmente o parallelamente alla direzione del flusso, vengono studiati due diversi metodi per la messa in opera:

- gettando il calcestruzzo da un'estremità permettendogli di fluire verso l'altra estremità;
- gettando il calcestruzzo al centro permettendogli di fluire verso entrambe le estremità

Dai risultati si evince che le travi in cui il calcestruzzo è stato gettato da un'estremità abbiano una capacità di carico di circa il 15% maggiore rispetto a quelle gettate al centro. [2] L'orientamento delle fibre ottimale si riscontra quando le fibre sono allineate lungo la direzione della tensione di trazione, i metodi di colata mostrano quindi un effetto significativo sull'orientamento delle fibre. Si può notare come le dimensioni del provino influenzino l'orientamento delle fibre, infatti è migliore in prossimità della cassaforma, campioni più sottili hanno un orientamento delle fibre migliore. L'orientamento delle fibre viene migliorato anche aumentando la lunghezza dello stampo, lo stampo è diviso in tre zone:

- zona di regolazione in cui le fibre iniziano a riorientarsi;
- zona ottimizzata in cui la maggior parte delle fibre si allineano alla direzione del flusso;
- zona di ridisordine in cui le fibre sono disordinate a causa della riduzione della velocità del flusso

Poiché un S_{aver} (area media delle fibre) basso rappresenta un buon orientamento delle fibre ed esso diminuisce con l'aumento della distanza di flusso e aumenta nell'estremità opposta dello stampo, quando la lunghezza del getto viene aumentata, ad esempio da 400 mm a 1000 mm, la lunghezza della zona ottimizzata aumenta, passando da 0 a 280 mm (*Figura 17*). [3]

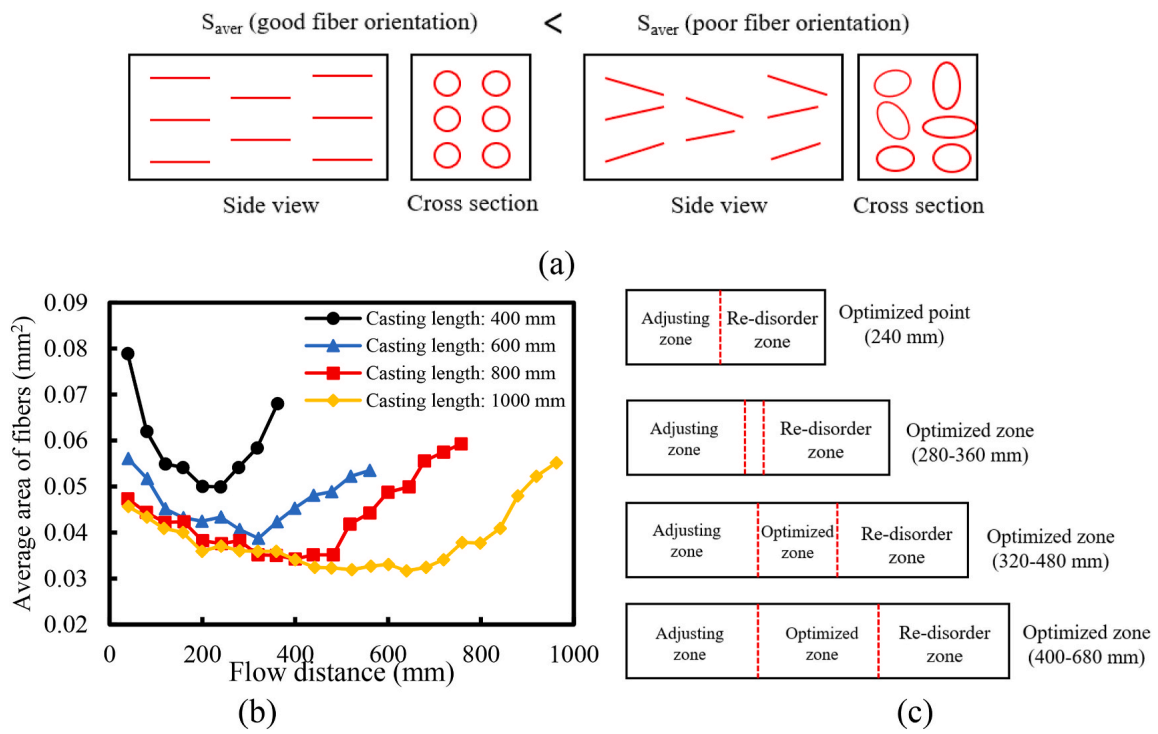


Figura 17 (a) Effetto dell'orientamento delle fibre (b) variazione di S_{aver} con distanza di getto (c) Zona ottimizzata in diverse lunghezze

4. Durabilità

Il calcestruzzo ad altissime prestazioni è una nuova generazione di calcestruzzo rinforzato con fibre che presenta proprietà meccaniche e di durabilità superiori rispetto ai calcestruzzi ordinari. [15] In questo capitolo verrà approfondita la risposta ai problemi di durabilità causati da agenti esterni, l'influenza della presenza dell'aggregato grosso nella miscela cementizia, l'influenza delle fibre, nel dettaglio il loro orientamento e la loro lunghezza, come modificano le caratteristiche della miscela e infine quali tecnologie vengono utilizzate per il controllo e il miglioramento della durabilità.

4.1. Effetti della permeabilità, corrosione dell'acciaio, carbonatazione, gelo e disgelo, reazioni alcali silice, resistenza agli attacchi chimici, resistenza all'abrasione, resistenza al fuoco

I problemi di durabilità delle strutture in calcestruzzo, come la corrosione delle armature, la reazione alcali-silice, l'attacco dei solfati e l'azione del gel-disgelo, associati alla fessurazione da sollecitazioni meccaniche, termiche e chimiche, sono inevitabili. Ciò può non solo accelerare il deterioramento delle strutture in calcestruzzo, riducendone così la vita utile, ma anche aumentare il costo del ciclo di vita a causa di una manutenzione periodica. Il calcestruzzo tradizionale non è sempre adatto alle applicazioni in ambienti particolarmente aggressivi, pertanto, lo sviluppo di

calcestruzzi ad altissime prestazioni con una durabilità superiore e una lunga durata è fondamentale. [1]

4.1.1. Permeabilità all'acqua

La permeabilità all'acqua del calcestruzzo può dare alle sostanze chimiche, come gli ioni cloruro, la possibilità di diffondersi al suo interno e provocare la corrosione delle armature o delle fibre di acciaio. L' UHPC è caratterizzato da una porosità minore e da una microstruttura molto più densa rispetto al calcestruzzo convenzionale. [9] Nella *figura 18* possiamo notare come l'andamento dell'assorbimento dell'acqua di C30, C80, RPC200, RPC200C rispetto al tempo di esposizione, l'RPC200 ha mostrato un coefficiente di assorbimento dell'acqua significativamente inferiore.

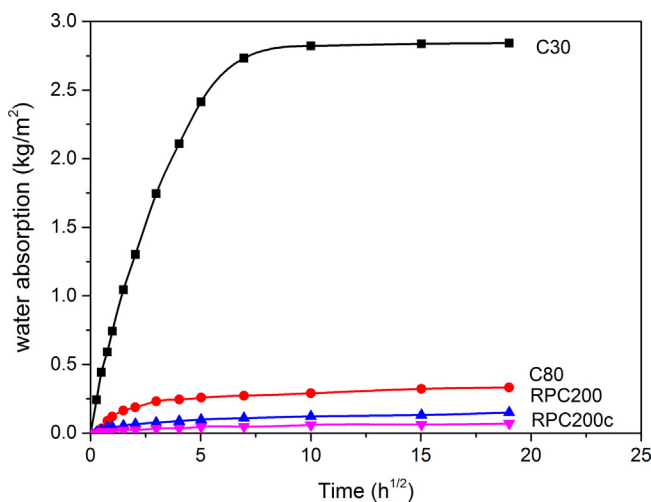


Figura 18 Assorbimento dell'acqua di C30,C80,RPC200,RPC200c

La permeabilità all'acqua del calcestruzzo è influenzata principalmente dal rapporto acqua/cemento, dall'uso di SCM (Supplementary Cementing Materials), dal diametro dei pori e dalla loro connessione. Dobias et al. hanno rilevato che il coefficiente di assorbimento di acqua dell'UHPC a 90 giorni era circa cinque volte inferiore a quello del CC. Il coefficiente di permeabilità ai gas dell'UHPC è risultato inferiore a quello del CC, la minore porosità capillare può ridurre l'aspirazione capillare e l'intrusione di gas o soluzione aggressive con conseguente riduzione delle permeabilità. L'uso di SCM, in particolare di fumo di silice può favorire la formazione di C-S-H grazie alle reazioni pozzolaniche con conseguente riduzione dei pori e miglioramento delle discontinuità.

[1] Studi condotti da Aashat Arora et al. hanno valutato la durabilità di UHPC mediante test sull'umidità e trasporto ionico a 28 giorni in cui vengono riportati i valori di assorbimento dell'acqua in funzione del tempo. L'assorbimento è calcolato come il rapporto tra la variazione di massa del provino e la sua area della sezione trasversale e la densità dell'acqua, è stato osservato che i calcestruzzi UHPC mostrano dei valori di assorbimento molto bassi rispetto ai calcestruzzi ordinari (*Figura 19*). [16]

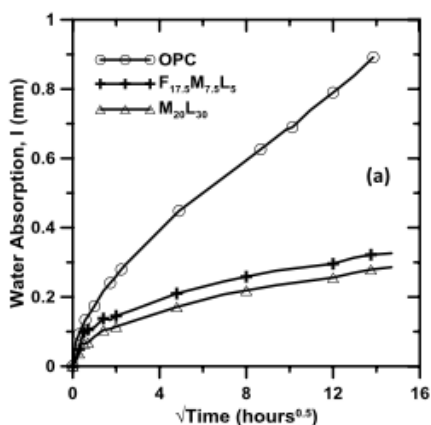


Figura 19 Assorbimento dell'acqua in funzione del tempo

4.1.2. Permeabilità agli ioni cloruro

È stato identificato che la resistenza alla penetrazione degli ioni cloruro è uno dei fattori più critici nella resistenza del calcestruzzo. È noto che il calcestruzzo che ha una maggiore tolleranza al cloruro ha anche una maggiore durabilità. Una serie di variabili come il rapporto acqua/cemento, le condizioni di esposizione, il regime di indurimento e la durata dell'esposizione determinano il grado di penetrazione del cloruro. I cloruri possono essere suddivisi in cloruri liberi e legati, a seconda del metodo di legame. Lo ione cloruro legato chimicamente può reagire con i componenti del cemento per formare poi prodotti salini. La penetrazione di ioni cloruro liberi nell'acciaio, ovvero nel calcestruzzo fibrorinforzato, può provocare la passivazione delle armature di acciaio o della soluzione che viene utilizzata per la passivazione delle armature utilizzata per proteggere le stesse dalla corrosione. Tale corrosione porterebbe al deterioramento delle armature e quindi delle strutture in calcestruzzo riducendone così la vita propria. [9] Per valutare la permeabilità agli ioni cloruro del calcestruzzo si utilizzano comunemente dei metodi di prova accelerati, tra cui il test rapido di permeabilità ai cloruri (RCPT) e il metodo di Nordest NT Build 443.

Table 1
Chloride ion diffusion coefficient of UHPC.

Ref.	Curing condition	W/B	Steel fiber volume	Medium solution	Testing age	Chloride ion diffusion coefficient ($\times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$)
Roux et al. [33]	Pressurized before and during setting at a pressure of 60 MPa and water cured for 28 d at 20 °C	0.14	2%	3% NaCl	1 y	0.2
Pierard and Cauberg [67]	Moist curing (20 °C at 95% relative humidity)	0.18	0	16% NaCl	56 d	4.0
Liu et al. [61]	90 °C steam for 1d then 90 °C hot water till room temperature	0.15	2.6%	10% NaCl	–	4.1
Thomas et al. [68]	20 °C for 2 d + 90 °C curing for 2d	0.12	2%	Seawater	28 d	1.3
Scheydt and Müller [69]	Heat treated at 90 °C for 3d	0.21	2.5%	3% NaCl	63 d	1.3
Pierard et al. [70]	20 °C and 95% RH for 90 d	0.21	2%	16% NaCl	3 m	2.3

Il coefficiente di diffusione degli ioni cloruro dell'UHPC varia da $0,2 \times 10^{-13}$ a $4,1 \times 10^{-13}$ m^2/s a seconda del rapporto acqua/cemento, dal regime di indurimento, concentrazione della soluzione media, volume di fibre di acciaio ed età di prova.

A causa dei diversi ambienti di prova e delle proporzioni di miscela utilizzate in letteratura è difficile fare un confronto quantitativo delle permeabilità al cloruro dei UHPC, ciononostante possiamo constatare che il coefficiente di diffusione di UHPC è inferiore di almeno un ordine di grandezza rispetto ai calcestruzzi convenzionali, ad esempio Roux et al. hanno riportato che i coefficienti di diffusione degli ioni cloruro di C30, C80 e UHPC erano rispettivamente $1,1 \times 10^{-13}$; $6,0 \times 10^{-13}$ e $0,2 \times 10^{-13}$ m^2/s .

Pertanto, l'UHPC dimostra di avere una resistenza alla permeabilità agli ioni cloruro superiore, sebbene i risultati delle prove accelerate non riproducano le condizioni reali che il calcestruzzo sperimenterebbe in campo. [1]

L'aumento della temperatura di stagionatura accelera l'idratazione del cemento e promuove l'idratazione secondaria e la formazione di C-S-H prodotto che contribuisce alla resistenza, inoltre, l'aggiunta di SCM influenza notevolmente la permeabilità attraverso i seguenti effetti: effetto pozzolanico, effetto riempitivo, effetto di semina o nucleazione ed effetto chimico addizionale. [1]

4.1.3. Corrosione dell'armatura in acciaio

La corrosione indotta dal cloruro delle armature in acciaio nei conglomerati cementizi è la principale causa di deterioramento. Poiché la permeabilità agli ioni cloruro nell'UHPC è estremamente bassa questo mostra un'elevata resistenza alla corrosione. Ghafari et al. hanno utilizzato il test di corrosione accelerata per la valutazione della velocità di corrosione delle barre di acciaio in HPC e in UHPC, il tempo di fessurazione nell'HPC risultava inferiore alla metà di quello dell'UHPC, la corrosione delle barre di acciaio infatti risultava pari a $0,01 \mu\text{m}/\text{anno}$, molto inferiore al livello limite di $1 \mu\text{m}/\text{anno}$. [1]

Fan et al. hanno studiato l'influenza delle fibre rivestite di ottone e zinco sulla resistenza elettrica dell'UHPC e sulla resistenza alla corrosione delle barre di acciaio incorporate, il test prevedeva l'immersione di campioni di UHPC in una soluzione di NaCl al 3,5% di volume per un anno. I risultati hanno mostrato che non è stato rilevato alcun cloruro e la densità di corrente di corrosione è stata circa $0,01 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, indicando così l'assenza di corrosione della barra di acciaio. [1] Viene analizzato anche il comportamento delle armature in un calcestruzzo fessurato, l'UHPC che presenta una porosità molto bassa e un forte legame tra calcestruzzo e armatura, mostra i prodotti della corrosione nell'area fessurata, il motivo principale del deterioramento causato dalla corrosione non è la scheggiatura del calcestruzzo ma la riduzione della sezione trasversale dell'acciaio, si può notare come i prodotti della corrosione sono per la

maggior parte solo sulla superficie della barra nell'intorno della fessura e non all'interno del calcestruzzo. È stato dimostrato che una leggera corrosione delle fibre in acciaio utilizzate per il calcestruzzo UHPFRC potrebbe aumentare la loro presa e la successiva frizione tra la matrice cementizia e le barre di armatura e sorprendentemente aumentare la forza di adesione delle fibre di acciaio nel calcestruzzo. [17]

4.1.4. La carbonatazione

La carbonatazione è la reazione chimica della CO_2 presente nell'ambiente con i prodotti di idratazione del cemento, come l'idrossido di calcio $Ca(OH)_2$. Questa reazione produce $CaCO_3$ e abbassa il valore del pH del calcestruzzo circa a 9, a tale valore di pH lo strato di ossido protettivo che circonda l'armatura si rompe portando così alla corrosione dell'acciaio e infine alla fessurazione delle strutture in calcestruzzo. La carbonatazione verrà rallentata se il calcestruzzo è molto asciutto, a causa della mancanza di acqua nella quale disciogliere la CO_2 , di contro in un calcestruzzo con un'eccessiva umidità si crea una barriera protettiva alla penetrazione della CO_2 e si rallenta così il processo di carbonatazione. Giocano un ruolo significativo nella carbonatazione il rapporto acqua/cemento, il grado di resistenza alla compressione e la porosità del calcestruzzo; infatti, maggiore sarà il rapporto acqua/cemento maggiore è la porosità e più alta è la velocità di carbonatazione; grazie al suo basso rapporto

acqua/cemento e al contenuto di acqua limitato l'UHPC presenta una microstruttura molto densa e una dimensione dei pori molto piccola, la carbonatazione in esso si verifica molto raramente. [1]

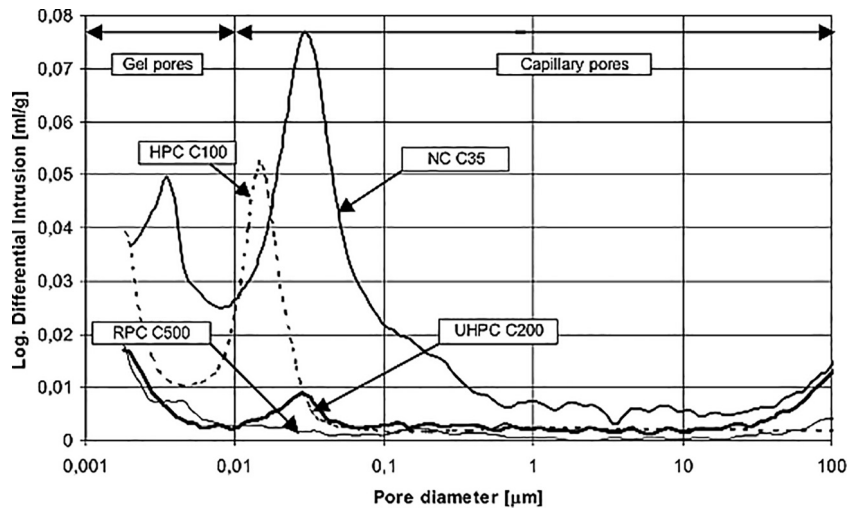


Figura 21 Dimensione dei pori di CC, HPC, UHPC

Test di carbonatazione accelerata sono stati effettuati da Piérard et al., viene studiata su prismi aventi una sezione trasversale di 100 x 100 mm². Prima dei test i prismi vengono essiccati in forno a 50°C per 14 giorni e posti in una camera a temperatura e umidità controllate a 20 ± 2 °C e 60 ± 5 RH per altri 7 giorni. Vengono poi esposti in un'atmosfera con l'1% di CO₂ per un invecchiamento accelerato e controllata la loro carbonatazione attraverso un indicatore acido/base spruzzato sulla superficie del provino. Dopo l'esposizione di un anno nell'atmosfera con l'1% di CO₂ la profondità di carbonatazione è stato osservata essere 1,5-2 mm.

Il coefficiente di carbonatazione può essere calcolato con la formula:

$$X_c = K_C \sqrt{t}$$

dove X_c è la profondità di carbonatazione al tempo t e k_c rappresenta il coefficiente di carbonatazione. Da un punto di vista pratico il coefficiente di carbonatazione può essere usato in maniera predittiva per stimare la profondità di carbonatazione in condizioni reali in funzione del tempo, per fare un confronto i calcestruzzi ordinari presentano un $K_c=1,5 \text{ mm}\sqrt{gg}$ mentre un UHPC hanno un $k_c=0,1 \text{ mm}\sqrt{gg}$. [18]

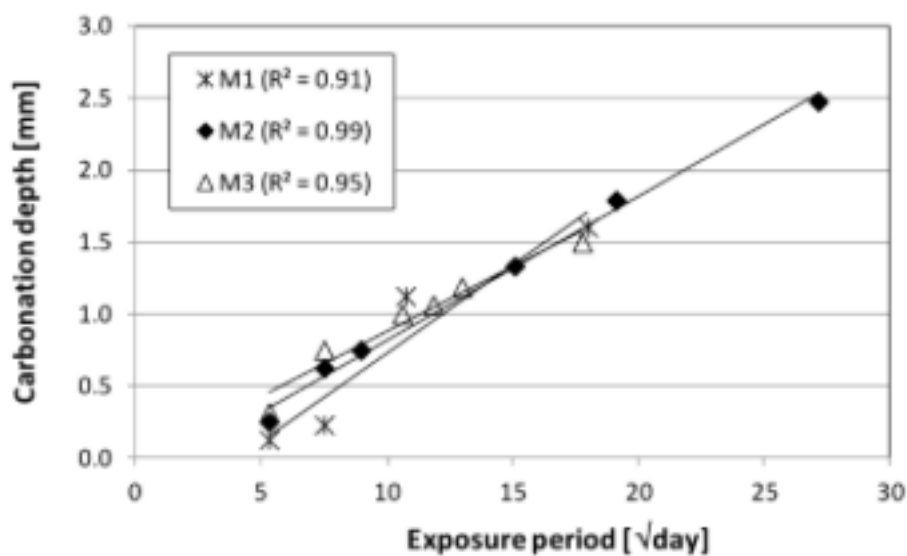


Figura 22 Profondità di carbonatazione/ esposizione atmosfera al 1% di CO2

4.1.5. Resistenza ai cicli di gelo-disgelo

Il danno causato dal gelo-disgelo si verifica nel calcestruzzo quando le molecole d'acqua si congelano e si espandono oltre i limiti di volume dello stesso, di conseguenza il calcestruzzo si deteriora, soprattutto quando la pressione che si sviluppa è maggiore della sua resistenza a trazione, con una conseguente dilatazione e rotture interne. Nella maggior parte dei casi il deterioramento del calcestruzzo causato da gelo-disgelo porta ad avere fessurazioni casuali, desquamazione

superficiale, deterioramento dei giunti. Si ha un effetto negativo sia sulle proprietà meccaniche e di permeabilità ma anche su altre proprietà di durabilità del calcestruzzo.

[9] I calcestruzzi fibrorinforzati ad altissime prestazioni presentano una resistenza ai cicli di gelo-disgelo superiore poiché presentano una matrice altamente impermeabile con una ridotta porosità capillare, diversi studi hanno rilevato che l'UHPC non dimostra alcun deterioramento dopo 300/600 cicli di gelo-disgelo.

Normalmente, il calcestruzzo che viene sottoposto all'azione di gelo-disgelo tende a perdere massa a causa della scagliatura del materiale e subisce una diminuzione del modulo dinamico relativo con la comparsa di microfessurazioni, tuttavia uno studio condotto da Lee et al. e Graybeal, sul calcestruzzo fibrorinforzato ad altissime prestazioni, hanno riscontrato un aumento di massa dello 0,2% dopo 125 cicli di gelo-disgelo e un aumento del modulo dinamico relativo, questo incremento di massa e del modulo dinamico relativo può essere attribuito all'acqua assorbita e/o alla continua idratazione durante il processo di gelo-disgelo. [1]

È stato rivelato che alcuni campioni di UHPC possono perfino auto-riparare le microfessure quando vengono immersi in acqua dopo o durante il deterioramento, grazie alla presenza di un'elevata quantità di particelle di cemento non idratate. In questo modo è possibile recuperare le proprietà meccaniche dell'UHPC dal deterioramento dovuto all'azione di gelo e disgelo. Questo fenomeno di autorigenerazione è stato studiato da Graybeal, nella sua ricerca ha analizzato le variazioni di massa e il comportamento meccanico di campioni di UHPC non trattato,

trattato con aria, trattato con vapore, immersi in acqua senza essere sottoposti a condizioni di gelo-disgelo. Dallo studio è emerso che i campioni hanno guadagnato un incremento di massa di 0,25% - 0,35% inoltre anche la resistenza alla compressione dei campioni di UHPC non trattati e trattati con vapore è aumentata rispettivamente del 12% e del 3% rispetto a quella dei campioni trattati con aria. [1]

4.1.6. Reazione alcali-silice

Il problema chiamato comunemente “pop out” del calcestruzzo è una delle forme di degrado chimico del calcestruzzo che si innesca in presenza di aggregati caratterizzati da una particolare composizione mineralogia, la più comune è la reazione alcali-silice (ASR) che si verifica in presenza di silice amorfa. [19]

Questa reazione espansiva deleteria può ridurre gradualmente la vita utile, la capacità di carico e persino la sicurezza delle strutture in calcestruzzo, il che può portare a elevati costi di sostituzione o addirittura alla demolizione della struttura. La reazione alcali-silice è lenta ed espansiva e può richiedere 10-15 anni prima di manifestarsi, tuttavia è tra le principali cause di degrado di importanti strutture ed infrastrutture in calcestruzzo. [20] La ricerca sulla reazione alcali-silice in UHPC è ancora limitata, l'ASR è uno dei principali problemi di durabilità che porta a un degrado prematuro della struttura, avviene in condizione di umidità che porta alla formazione di un gel, questo assorbe l'acqua circostante e si espande in volume andando a esercitare sollecitazioni

sul calcestruzzo circostante provocando crepe e scheggiature. [21] Graybeal ha valutato la risposta di UHPC alla reazione alcali-silice studiando dei provini con dimensioni di 25 x 25 x 280 mm sottoposti a una soluzione di idrossido di sodio per 2-4 settimane a 80°C. I valori di espansione dei provini trattati e non trattati termicamente a 28 gg erano rispettivamente dello 0,012% e dello 0,002% , valori inferiori al limite di 0,2% specificato nelle ASTM C1260. [1]

Gli effetti negativi dell'ASR nelle strutture in calcestruzzo possono essere diminuiti controllando il contenuto di alcali, riducendo al minimo la silice reattiva, riducendo l'esposizione all'acqua e aggiungendo additivi inibitori di espansione alcali-silice. [21]



Figura 23 Rotture in NSC e UHPC

4.1.7. Resistenza agli attacchi chimici

Le strutture in UHPC esposte in ambienti marini subiscono attacchi chimici, come solfati, cloruri etc... che portano alla corrosione delle armature e alla fessurazione della superficie. In una struttura che è esposta ad acqua marina per diversi anni vengono riscontrati diversi strati alterati, la carbonatazione, l'attacco di magnesio, l'attacco di solfati e la formazione di gesso. [1]

L'unico modo di inibire la corrosione dell'acciaio e la scagliatura della superficie è quella di progettare un calcestruzzo denso e aumentare il copriferro della struttura, poiché il meccanismo di aggressione è collegato alla facilità con la quale gli ioni possono penetrare all'interno del calcestruzzo, è ovvio che una matrice densa come quella di UHPC costituisce una protezione migliore ai agenti marini. [8]

Per notare segni evidenti di un attacco chimico in UHPC è necessario molto tempo a causa della sua struttura estremamente densa, Yang e Huang hanno riscontrato che la resistenza a compressione e flessione dei campioni di UHPC dopo 180 gg di immersione in acqua dolce e in acqua marina erano superiori alle resistenze di partenza, ciò viene attribuito alla continua idratazione delle particelle di cemento non idratate nel calcestruzzo, [1] da alcuni test dell'UNB, su delle travi prelevate a Treat Island nel Maine (US) negli anni 2009 e 2010, è stato rilevato attraverso carotaggi sulle stesse, che tutti i campioni prelevati erano in condizioni eccellenti senza nessuna evidenza di incrostazioni superficiali, perdita di materiale o scagliature e che

l'esposizione delle travi all'ambiente marino non ha apportato alcuna regressione delle proprietà meccaniche. [22]

4.1.8. Resistenza all'abrasione

La resistenza all'abrasione è una proprietà critica per le strutture in calcestruzzo, gli studi sulla resistenza all'abrasione del calcestruzzo ordinario sono ben noti mentre la ricerca sul comportamento all'abrasione del calcestruzzo ad altissime prestazioni è limitata. Ricerche condotte da Liu Y. E Wei Y. hanno dimostrato che un calcestruzzo che presenta basalto e aggregato grossolano, attraverso la valutazione delle perdita di massa e della profondità di abrasione, presenta una buona resistenza meccanica e un'eccellente resistenza all'abrasione poiché la loro perdita di massa e profondità di abrasione era solo circa un terzo rispetto a quella del calcestruzzo ordinario, la matrice densificata dell'UHPC ha un effetto importante su tale resistenza rispetto all'aggregato grosso o alle fibre di acciaio che contribuiscono invece maggiormente alla resistenza meccanica dell'UHPC. [23] Graybeal ha studiato tre superfici di UHPC per testare la sua resistenza all'abrasione: colate in uno stampo di acciaio, sabbiate e rettificate in conformità con la norma ASTM C944. I risultati di tale studio hanno indicato che i campioni polimerizzati a vapore mostrano una resistenza all'abrasione molto elevata rispetto ai campioni non trattati, grazie alla polimerizzazione a vapore i campioni con superfici colate nello stampo di acciaio hanno dimostrato una resistenza all'abrasione

maggiore rispetto ai campioni con superficie sabbiata o rettificata. Lee et al. hanno condotto uno studio sulla verifica di resistenza all'abrasione di CC, HPC e UHPC, i risultati hanno mostrato che dopo 500/1000 cicli il CC ha mostrato una riduzione del peso del 32% e del 67%, il calcestruzzo HPC rispettivamente dell'86% e del 67%, mentre i valori corrispondenti dell'UHPC sono risultati circa 8 e 4 volte superiori a quelli del CC e HPC. [1]

Abrasion coefficients of CC, HPC, and UHPC measured according to aggregate abrasion testing (ASTM C131) [119]

Duration (cycles)	Material types		
	CC	HPC	UHPC
500	0.68	0.86	0.95
1000	0.33	0.67	0.92

Figura 24 Coefficienti di abrasione di CC, HPC, UHPC

4.1.9. Resistenza al fuoco

Il calcestruzzo è un eccellente materiale da costruzione resistente al fuoco grazie alla sua bassa conducibilità termica e all'elevata capacità termica, è improbabile che si verifichi una rottura esplosiva nel calcestruzzo se il suo contenuto di umidità è inferiore al 4%. Tuttavia, l'assenza di pori capillari e la bassa quantità di acqua libera nell'UHPC lo rendono molto più incline alla rottura esplosiva a causa dell'aumento di pressione e del gradiente termico non uniforme durante il riscaldamento. [1] Quando il calcestruzzo ad altissime prestazioni è sottoposto a temperature elevate, fino a 1400°C, si mostrano varie regioni fisico-chimiche, tra cui la perdita di acqua libera e acqua di legame, la decomposizione di Ca(OH)_2 , C-S-H, CaCO_3 e la fusione del

calcestruzzo. Abid et al. hanno dimostrato che la relazione tra resistenza alla compressione residua e temperatura dell'UHPC è caratterizzata da tre fasi distinte: fase iniziale di stabilizzazione e recupero dai 150°C ai 350 °C, fase di perdita di resistenza dai 350°C a 800°C, fase di perdita totale di resistenza dopo 800°C. L'aumento iniziale della resistenza a compressione è dovuto all'indurimento a secco e all'idratazione continua delle particelle di cemento non idratate a seguito del riscaldamento; la perdita di resistenza nella seconda fase è dovuta alla decomposizione di $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e alla rottura del legame C-S-H. La perdita totale di resistenza dopo 800°C è dovuta alla completa decomposizione del legame C-S-H e alla parziale decomposizione del CaCO_3 che porta a gravi fessurazioni. Alcuni studi hanno dimostrato che la perdita di resistenza a compressione dei provini di UHPC varia dal 30% al 50% dopo un riscaldamento a 1000°C. L'aumento del contenuto di fibre può ridurre la perdita di resistenza grazie al contenimento della propagazione delle fessure, infatti ricerche hanno dimostrato che con un contenuto di fibre di acciaio di 1%, 2%, 3% la resistenza a compressione è aumentata rispettivamente del 24%, 4% e 3% dopo un riscaldamento a 200°C. [1] Xiangwei Liang et al. hanno studiato un totale di sei miscele (con l'utilizzo di sabbia di quarzo o scorie come aggregato fine, con o senza fibra di acciaio, fibra di PP o fibre ibride) per sviluppare un UHPC con un'eccellente resistenza al fuoco. Dai risultati dei test si evidenzia che la maggior parte della perdita di massa delle miscele con fibre di PP si verifica a temperature tra i 200°C e i 400 °C per evaporazione dell'acqua; la pressione generata dal vapore contribuisce notevolmente al

comportamento esplosivo, fattore controllabile attraverso le fibre di PP; le fibre di acciaio potrebbero ridurre le probabilità e l'intensità delle scheggiature da stress termico e incompatibilità tra aggregati e pasta cementizia; l'aggiunta di scorie in acciaio riduce la quantità di CH formatosi a seguito dell'idratazione. [24]

4.2. *Influenza dell'aggregato grossolano*

L'aggiunta di aggregati grossolani all'UHPC ne degrada generalmente le prestazioni a flessione poiché tale incremento determina una maggiore formazione di zone deboli (ITZ) all'interno della microstruttura, aumenta la fragilità del materiale.

Come già noto il calcestruzzo fibrorinforzato ad altissime prestazioni ha eccellenti proprietà meccaniche e il suo modulo elastico è molto più alto rispetto a un calcestruzzo convenzionale, però l'aumento del modulo elastico è molto inferiore all'aumento della sua resistenza a compressione il che fa sì che la sua resistenza a compressione non possa essere pienamente utilizzata, pertanto è importante migliorare il modulo elastico in modo efficace per l'applicazione ingegneristica di UHPC. Il modulo elastico è strettamente legato alla composizione del materiale, un calcestruzzo fibrorinforzato ad alte prestazioni con presenza di aggregato grossolano (UHPC-CA) presenta una struttura molto rigida, tutti gli studi finora effettuati hanno confermato che con l'aumento del contenuto di aggregato grosso aumenta linearmente anche il modulo elastico.

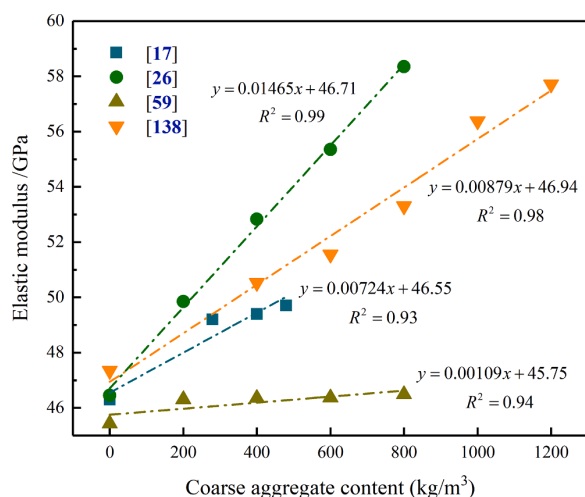


Figura 25 Modulo elastico in relazione al contenuto di aggregato grosso

Da diversi test su l'UHPC-CA condotti da Yang et al. è emerso che esso non solo ha un'elevata resistenza alla permeabilità dell'acqua ma anche un'eccellente resistenza alla penetrazione degli ioni cloruro. A causa della porosità estremamente bassa dei UHPC-CA, il tasso di degrado è molto più lento, ovvero c'è un aumento significativo della durabilità, i pori sono molto piccoli e discontinui, riducendo così il flusso del reagente all'interno del materiale, con conseguente riduzione del deterioramento. La bassa igroscopicità e la bassa capacità di assorbimento dell'acqua, in calcestruzzi UHPC con presenza di aggregato grossolano, spiegano il loro alto livello di resistenza al gelo e disgelo.

Negli ultimi anni sono stati condotti alcuni studi sul comportamento esplosivo ad alte temperature nei calcestruzzi UHPC-CA, la resistenza allo spalling da esplosione è leggermente migliore di quella in un materiale in assenza di aggiunta di aggregato grossolano, questo perché esso favorisce il miglioramento della conducibilità termica del calcestruzzo, riducendone così il gradiente di temperatura interno. [11]

4.3. *Influenza delle fibre*

È stato osservato che la fluidità dell'UHPC è diminuita marginalmente con l'aumento della lunghezza e del dosaggio delle fibre, ad esempio è stata osservata una riduzione del 13% della fluidità dell'UHPC per le miscele che incorporavano il 6% del volume della miscela in fibre rispetto a quella della miscela senza aggiunta di fibre. La miscela che incorpora fibre d'acciaio mostra un comportamento più duttile, questo viene attribuito alla limitazione dell'espansione laterale da parte delle fibre di acciaio, con conseguente maggiore tolleranza alla deformazione assiale.

Il dosaggio di fibre d'acciaio nelle miscele cementizie ha prodotto un numero relativamente minore di pori connessi con conseguente microstruttura più densa, diminuisce così il volume di vuoti permeabili, migliorando la durabilità. Dalle prove di penetrabilità agli ioni cloruro (RCPT) condotte da Ahlborn et al. si evince che UHPC presenta una resistenza alla penetrazione degli ioni cloruro superiore, da questi studi possiamo osservare che il dosaggio della fibra di acciaio ha avuto un effetto significativo, ad esempio le miscele che incorporavano il 3% e il 6% di fibre di acciaio da 8mm hanno mostrato valori di Coulomb inferiori, rispettivamente 27 e 35, rispetto a quelli della miscela di controllo senza aggiunta di fibre, ciò quindi è da attribuire alla fibre di acciaio che possono limitare la formazione e la crescita di fessure da ritiro

plastico e da essiccazione, con conseguente diminuzione della penetrabilità e aumento della durabilità. [15]

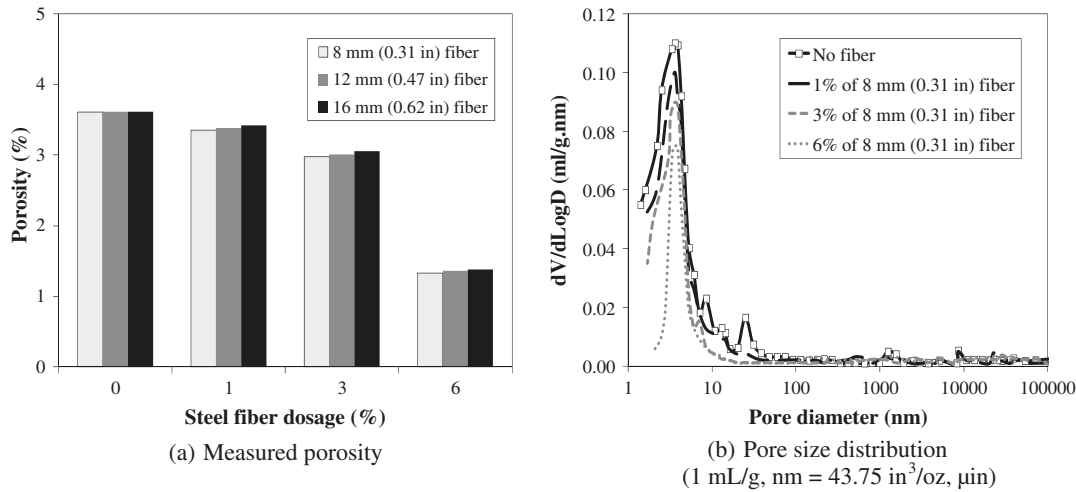


Figura 26 Misurazione della porosità di UHPC con diverse lunghezza e dosaggi di fibre

4.4. Tecnologie per migliorare la durabilità

L'UHPC presenta una durabilità superiore grazie alla sua matrice densa, nella figura 27 vengono elencate le specifiche tecniche, i parametri, i valori tipici e i metodi di prova per valutare la durabilità dell'UHPC.

Table 5
Test methods, specification, and suggested value of UHPC durability.

Test method	Specification	Parameters	Suggested value	Reference
Water adsorption	ASTM C642	Permeability	<0.005	[265]
Water sorptivity	ASTM C1585	Sorptivity coefficient	<0.044 kg/m ² /h ^{0.5}	[266, 267]
Alkali-aggregate reaction	ASTM C1567	Expansive percentage	<0.1%	[36,91]
Sulfate resistance	ASTM C1012	Length change	≈0	[268, 269]
Fire resistance	ASTM E119	Residual f_c'	<20%	[170, 270]
Rapid chloride permeability	ASTM C1202	Charge Passed	<100 coulombs	[271, 272]
Freezing-thawing resistance	ASTM C666	Durability factor	>95%	[36,273]
Carbonation	ISO 1920-12:2015	Carbonation depth	<3 mm	[268, 274]
Abrasion resistance	ASTM C944	Wearing depth	<1 mm	[36]

Figura 27 Valutazione della durabilità di UHPC

L'impermeabilità dell'UHPC è stata dimostrata da test di adsorbimento e permeabilità dell'acqua, che giustificano l'elevata resistenza all'intrusione di ioni chimici dannosi. Esistono però problemi di durabilità che possono essere attribuiti all'uso inappropriato di materiali porosi (ad esempio SAP e sabbia porosa); allo sviluppo di fessure sotto carico e alla reazione alcali-aggregato quando si utilizzano materiali riciclati come aggregato da lavorazione del calcestruzzo o vetro riciclato. Sono state pensate delle soluzioni a questi problemi di durabilità:

1. Ottimizzare il contenuto di materiali porosi per ottenere una microstruttura densa

L'applicazione di sabbia porosa densa come agente di polimerizzazione di UHPC ha ridotto efficacemente il ritiro autogeno, un uso eccessivo di sabbia porosa potrebbe compromettere la resistenza alla corrosione delle barre di acciaio, infatti quando il contenuto di sabbia porosa supera il valore ottimale, la porosità totale dell'UHPC aumenta significativamente. Per mitigare l'effetto negativo il rapporto di sostituzione della sabbia dovrebbe essere limitato al valore ottimale, al di sotto di tale valore, l'introduzione di sabbia porosa favorisce la reazione di idratazione e i prodotti di idratazione riempiono i pori che contribuiscono a compensare la porosità introdotta.

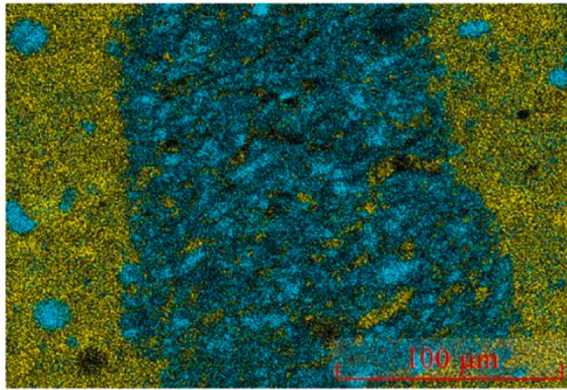


Figura 28 Interfaccia matrice, in blu Si, in giallo Ca

2. Controllo dell'ampiezza delle fessure per la resistenza alla corrosione

La proprietà di impermeabilità dell'UHPC può proteggere efficacemente le armature in acciaio al suo interno, tuttavia le fessure sono inevitabili per le strutture in calcestruzzo, queste forniscono brevi percorsi che facilitano la migrazione di ioni aggressivi. Il più delle volte le fessure sono accompagnate da un distacco tra acciaio e UHPC che può danneggiare il film passivo sulle barre di acciaio e accelerare ulteriormente la corrosione. In questo senso l'autorigenerazione delle fessure nell'UHPC è importante per la durabilità a lungo termine, essa è attribuita al basso grado di idratazione del cemento, una volta fessurate le particelle non idratate dell'UHPC sono esposte all'umidità e all'aria, producendo prodotti di idratazione. L'uso di fibre sintetiche nell'UHPC è promettente per controllare l'ampiezza delle fessure, infatti il calcestruzzo è così più incline a modelli di microfessurazione multipla piuttosto che localizzata,

pertanto il numero di fessure aumenta ma la larghezza di ciascuna fessura si riduce.

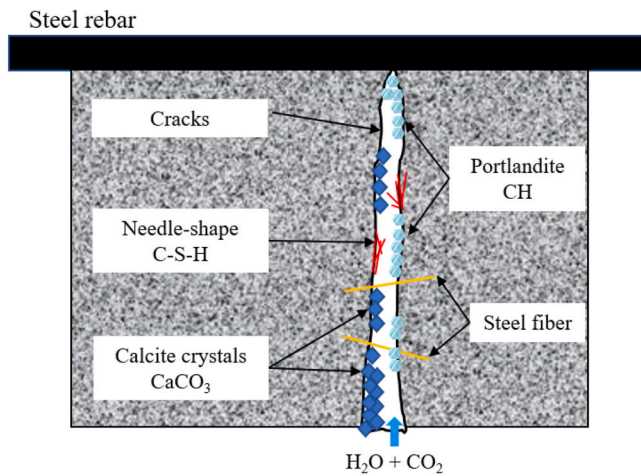


Figura 29 Processo di autorigenerazione di UHPC

3. Limitare la dimensione delle particelle dei materiali reattivi per la resistenza all'ASR

Gli aggregati e le polveri reattive, come il vetro di scarto o l'aggregato derivante dal calcestruzzo riciclato sono stati utilizzati per sviluppare miscele UHPC economicamente vantaggiose. In presenza di un pH elevato il legame Si-O-Si del vetro si rompe e reagisce con gli ioni alcalini che possono produrre gel ASR. Per attenuare il potenziale di fessurazione dell'ASR il diametro massimo delle particelle di polvere di vetro deve essere inferiore alla dimensione media dei pori di UHPC, in modo che l'ASR prodotto dalla polvere di vetro non possa fessurare la matrice di UHPC. [3]

5. Conclusioni

Questa tesi ha riguardato lo studio di composti cementizi ad alte prestazioni (*Ultra High Performance Concrete*, UHPC). Il principale obiettivo della tesi è stato effettuare un excursus valutativo riguardo alle caratteristiche di questo materiale per quanto riguarda la storia evolutiva nel corso degli anni, le norme in vigore che regolano la sua applicazione, la sua composizione, la sua progettazione preliminare e la relativa messa in opera e la sua durabilità.

Il calcestruzzo fibro rinforzato ad altissime prestazioni è un materiale innovativo che nonostante abbia a disposizione i più moderni strumenti metodologici e scientifici presenta delle caratteristiche migliorabili sia per i suoi componenti sia per la sua durabilità e il suo impiego nelle strutture.

Questi materiali sono il frutto di ricerche scientifiche che rispondono a esigenze del mondo dell'ingegneria e dell'architettura consentendo quindi la realizzazione di strutture leggere grazie alla sua elevata resistenza meccanica, che permette di ridurre significativamente le sezioni resistenti delle strutture. I costi di manutenzione delle infrastrutture saranno sicuramente ridotti in quanto la vita stessa dell'infrastruttura è più alta ma in generale tutti costi legati alla vita utile in termini di sostenibilità economica ed ambientale.

In conclusione il calcestruzzo fibro rinforzato ad altissime prestazioni è risultato essere un materiale che è in grado di coniugare ottime prestazioni meccaniche e durabilità

grazie alla sua microstruttura molto compatta e mostra la sua competitività nei confronti di strutture costruite con diverse metodologie, in particolare il suo punto di forza maggiore è nel suo basso livello di degrado soprattutto negli ambienti aggressivi e in particolare l'assenza di fenomeni fessurativi che possono influire negativamente sulla vita utile dei manufatti.

La poca diffusione del materiale attualmente è in parte riconducibile alla poca chiarezza delle norme vigenti rispetto ad un materiale con tali prestazioni ma anche dalla non familiarità dell'industria nei confronti del prodotto e dai costi iniziali di produzione elevati rispetto ad un calcestruzzo tradizionale. Ad oggi sono necessari studi complementari in materia di durabilità per quanto riguarda la stabilità degli idrati ed il rischio di eventuali reazioni chimiche interne, ulteriori sforzi di ricerca dovrebbero riguardare inoltre la progettazione sismica con UHPFRC e lo sviluppo di soluzioni "Know how" per l'industria delle prefabbricazioni.

Sono stati formalizzati degli indicatori di durabilità all'interno di una ricerca "Indicatori di durabilità" sviluppata dall'AFREM al fine di caratterizzare l'UHPFRC utilizzando gli stessi indicatori già noti per i calcestruzzi tradizionali: la porosità dell'acqua, la permeabilità all'ossigeno, il coefficiente di diffusione degli ioni cloruro e il contenuto di portlandite, in *figura 30* sono riportati i diversi valori riscontrati, la scelta di tali indicatori e la specificazione dei criteri d'accettabilità di tali parametri sono essenziali per avere un approccio alla durabilità orientato alla definizione delle prestazioni da ottenere.

	OC	HPC	VHPC	UHPFRC
Porosità dell'acqua (%)	12-16	9-12	6-9	1.5-6
Permeabilità all'ossigeno (%)	10^{-15} a 10^{-16}	10^{-17}	10^{-18}	$<10^{-19}$
Coefficiente di diffusione del trizio (mq/s)	$2 \cdot 10^{-11}$	$2 \cdot 10^{-12}$	10^{-13}	$2 \cdot 10^{-14}$
Contenuto di portlandite (Kg/mc)	76	86	66	0

Figura 30 Indicatori di durabilità

6. Bibliografia

- [1] Z. W. e. a. Junquan Li a, «Durability of ultra-high performance concrete - A review,» Aprile 2020.
- [2] N. B. Doo-Yeol Yoo, «Mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete: A review,» *Elsevier Ltd*, Agosto 2016.
- [3] W. M. e. a. Jiang Du, «New development of ultra-high-performance concrete (UHPC),» *Elsevier Ltd*, Agosto 2021.
- [4] D. Ministeriale, *NORME TECNICHE PER LE COSTRUZIONI*, 17 Gennaio 2018.
- [5] C. S. d. L. P. S. T. Centrale, *Linee guida per l'identificazione, la qualificazione, la certificazione di valutazione tecnica ed il controllo di accettazione dei calcestruzzi fibrorinforzati FRC (Fiber Reinforced Concrete)*.
- [6] S. B. e. a. François Toutlemonde, «Twenty years-long French experience in UHPFRC application and paths opened from the completion of the standards for UHPFRC,» *HAL*, Aprile 2021.
- [7] N. B. Y.-S. Y. Doo-Yeol Yoo, «Predicting the flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete,» *Elsevier Ltd*, Settembre 2016.
- [8] Russo, *Tesi di Dottorato Calcestruzzi ad Altissime Prestazioni: Proprietà e Comportamento Meccanico*, 2011.
- [9] Y. Q. e. a. Rahat Ullah, «Ultra-High-Performance Concrete (UHPC): A State-of-the-art-Review,» *MDPI*, Giugno 2022.
- [10] ASTM, *ASTM C150/C150M-20. Standard specification for portland cement*, ASTM International, 2020.
- [11] Z. Y. e. al., «Mechanical properties, durability and application of ultra-high-performance concrete containing coarse aggregate (UHPC-CA): A review,» *Elsevier Ltd*, Aprile 2022.
- [12] Y. M. e. a. Jihao Gong, «Utilization of fibers in ultra-high-performance concrete: A review,» *Elsevier Ltd*, Maggio 2022.
- [13] M. M. I. e. al., «A review of existing codes and standards on design factors for UHPC placement and fiber orientation,» *Elsevier Ltd*, Luglio 2022.
- [14] N. A. P.-M. G. Wille K., «Ultra high performance concrete with compressive strength exceeding 150 Mpa (22 ksi): a simpler way,» *ACI Materials Journal*, 2011.
- [15] S. A. e. al., «Exploring mechanical and durability properties of ultra-high performance concrete incorporating various steel fiber lengths and dosages,» *Elsevier Ltd*, Dicembre 2014.
- [16] A. A. e. al., «Material design of economical ultra-high performance concrete (UHPC) and evaluation of their properties,» *Elsevier Ltd*, Giugno 2019.

- [17] A. Rafiee, *Computer Modeling and Investigation on the Steel Corrosion in Cracked Ultra High Performance Concrete*, Kassel University, Agosto 2012.
- [18] B. D. N. C. Julie Piérard, «Evaluation Of Durability Parameters of UHPC Using Accelerated Lab Tests,» *Belgian Building Research Institute (BBRI)*.
- [19] N. UNI, *La reazione Alkali-Agregati nei calcestruzzi: Revisione della norma UNI8520-22*.
- [20] C.-W. Tang, «Susceptibility to Expansive Reactions of a Greener UHPC: Micro to Macro-Scale Study,» *MDPI*, 2022.
- [21] S. A. e. al., «Investigation of Alkali-Silica Reactivity in Sustainable Ultrahigh Performance Concrete,» *MDPI*, Maggio 2021.
- [22] M. T. e. al., «Marine Performance of UHPC at Treat Island,» *Universty of New Brunswick*.
- [23] Y. W. Yalin Liu, «Abrasion resistance of ultra-high performance concrete with coarse aggregate,» *Mater Struct*, 2021.
- [24] C. W. Y. S. Z. C. Z. L. Xiangwei Liang, «Development of ultra-high performance concrete with high fire resistance,» *Elsevier Ltd*, Giugno 2018.