



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea magistrale **in Ingegneria Edile**

**CARATTERIZZAZIONE MECCANICA DI CALCESTRUZZI FIBRO-RINFORZATI
AD ELEVATE PRESTAZIONI**

**MECHANICAL CHARACTERIZATION OF HIGH-PERFORMANCE FIBER-
REINFORCED CONCRETES**

Relatore:

Prof. **Giovanni Lancioni**

Tesi di Laurea di:

Claudia Didu

A.A. 2018/2019

INDICE

CAPITOLO 1:

- 1-1 Cenni storici
- 1-2 Caratteristiche generali dei conglomerati cementizi fibrorinforzati.
- 1-3 Classificazione del calcestruzzo fibrorinforzato
- 1-4 Composizioni generali UHPFRC
- 1-5 La matrice cementizia
- 1-6 Le Fibre
- 1-7 Le fibre d'acciaio
- 1-8 Fattori d'influenza sul comportamento delle fibre
- 1-9 Contenuto delle fibre e sagomatura

CAPITOLO 2

- 2-1 Comportamento meccanico
- 2-2 Proprietà chimico-fisiche (cambio di volume e fenomeni del ritiro)
- 2-3 Stagionatura del calcestruzzo
- 2-4 Durabilità del materiale
- 2-5 Meccanica della frattura dei calcestruzzi fibrorinforzati
- 2-6 Gli effetti delle fibre nel calcestruzzo
- 2-7 Deformazione da ritiro plastico
- 2-8 Vantaggi nell'uso del calcestruzzo fibrorinforzato con fibre d'acciaio
- 2-9 Proprietà reologiche di un conglomerato cementizio fibroso

CAPITOLO 3:

3-1 Prove di flessione proposte da diverse normative:

- ASTM C1018-97 normativa americana
- UNI 11039-2003
- UNI EN 14651
- RILEM TC 162-TDF

3-2 Attività di laboratorio

3-3 Confezionamento provini

3-4 Fasi operative

CAPITOLO 4

4-1 Prova di flessione sui calcestruzzi fibrorinforzati

4-2 Provino 70x70x280mm

4-3 Esecuzione getti

4-4 Provini 40x40x160mm

4-5 Risultati medi dei test a flessione 70x70x280mm

4-5-1 Risultati medi dei test a flessione 40x40x160mm

4-5-2 Discussione dei 2 risultati ottenuti

4-5-3 La duttilità

CAPITOLO 5:

5.1 Confronto dei calcestruzzi fibrorinforzati con le diverse normative.

CAPITOLO 6:

6-1 Conclusioni della prova

CAPITOLO 1

CALCESTRUZZO FIBRO RINFORZATO

1-1 Cenni storici

Nato agli inizi degli anni '60, il calcestruzzo fibrorinforzato ha col tempo acquistato sempre maggior importanza e diffusione, fino a diventare ai nostri giorni una importante e diffusa realtà nel mondo delle costruzioni. Fu denominato *Fibre Reinforced Concrete (FRC)*, perché nell'impasto cementizio di un normale calcestruzzo venivano disperse in maniera casuale delle fibre corte con l'intento di migliorarne la duttilità ed il comportamento a trazione e flessione. Da allora il calcestruzzo fibrorinforzato ha subito notevoli miglioramenti dovuti all'ampia sperimentazione di cui è stato oggetto e all'incremento delle capacità tecnologiche.

Una delle innovazioni che portò alla decisiva diffusione del nuovo prodotto è legata allo sviluppo degli additivi chimici, in grado di migliorare la lavorabilità della miscela fresca senza il bisogno di utilizzare eccessivi rapporti acqua/cemento che avrebbero compromesso la resistenza a compressione del materiale. Dal fibrorinforzato è stata poi derivata una categoria di composti cementizi denominati *High Performance Fibre Reinforced Concrete (HPFRC)*, i calcestruzzi fibrorinforzati ad alte prestazioni, caratterizzati da maggiori resistenze e capacità di dispersione energetica.

Le fibre sintetiche aumentano l'efficacia del rinforzo e riducono i problemi di corrosione.

Gli Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete sono definiti come materiali a matrice cementizia, aventi una resistenza a compressione maggiore di 150MPa. Le caratteristiche riscontrate in letteratura che accomunano tali materiali sono le seguenti:

- l'aggiunta sistematica di fibre metalliche al fine di garantire un comportamento non fragile alla miscela, aumentare la resistenza a trazione, a flessione e a taglio;
- resistenza a trazione diretta maggiore a 7-8 MPa;
- rapporto a/c inferiore di 0,25, tipicamente compreso tra 0,16 e 0,20 per garantire una porosità capillare prossima allo zero;
- elevata densità della miscela, ottenuta con alto contenuto di componenti finissimi;
- l'uso di additivi di ultima generazione per ridurre il rapporto a/c.

1-2 Caratteristiche generali dei conglomerati cementizi fibrorinforzati.

Gli UHPC (Ultra High Performance Concrete) sono calcestruzzi ad altissime prestazioni che presentano una migliore risposta meccanica rispetto ai calcestruzzi tradizionali. Il calcestruzzo fibrorinforzato, o FRC, è un conglomerato cementizio il cui impasto vede l'aggiunta di fibre al posto del tradizionale rinforzo con barre di acciaio. Tali fibre, a differenza delle barre d'acciaio di un normale calcestruzzo, non hanno la specifica funzione di aumentare la resistenza intrinseca della matrice cementizia, ma danno il loro contributo al fine di migliorare il comportamento post-fessurativo del materiale accrescendone la duttilità e la capacità di controllo di apertura delle fessure. Un adeguato dosaggio di fibre infatti, soprattutto se di tipo metallico, può influenzare il comportamento sforzo-deformazione di un provino sottoposto ad una prova di schiacciamento rendendo più lunga e meno ripida la fase discendente della curva (il cosiddetto ramo degradante o di *softening*); così come mostrato in Fig. 1.2.

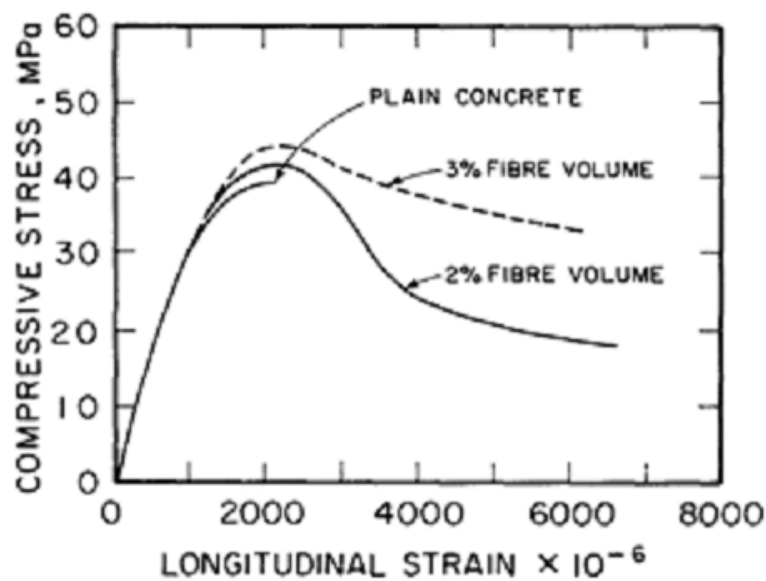


Figura 1.2 Comportamento a compressione di un FRC in funzione della percentuale di fibre

La resistenza a compressione del conglomerato non subisce tuttavia un vantaggio netto dalla presenza del rinforzo fibroso. Un evidente miglioramento si riscontra invece nel comportamento a trazione del materiale dove l'aggiunta di fibre, come già detto, aumenta la duttilità del conglomerato e la sua capacità di resistere alla propagazione delle fessure (tenacità). Nella fase precedente all'innescio del fenomeno fessurativo, il rinforzo fibroso non comporta significativi vantaggi; basti pensare a

grandezze come il modulo elastico a trazione (E_t) e la deformazione in corrispondenza dell'innescò della fessura (ϵ_f), che non vengono di fatto modificate. Le fibre svolgono quindi un "effetto di cucitura" delle aperture creando una sorta di ponte di collegamento (denominato *crack-bridging*) tra i lembi delle fessure stesse. Grazie a questo effetto la fibra garantisce al calcestruzzo una resistenza residua a trazione anche in fase post-fessurata consentendo il passaggio degli sforzi di trazione tra i due lembi delle aperture.

Le proprietà meccaniche che ne derivano sono riassumibili in due punti, funzione uno delle proprietà della matrice e l'altro dell'aggiunta fibrosa (quantità, tipologia e geometria delle fibre) ovvero:

- la possibilità del materiale di attingere a resistenze a compressione sistematicamente superiori ai 150 MPa, con un comportamento segnato da un'elevata rigidità;
- l'incremento della resistenza a trazione e della duttilità del composito ovvero la presenza di non trascurabili deformazioni a trazione.

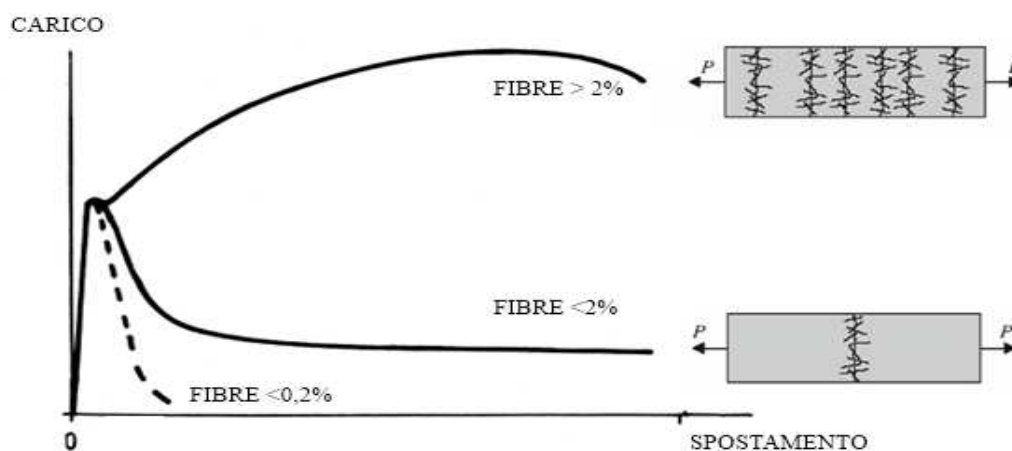


Figura 1.3: Comportamento a trazione di un FRC in funzione della percentuale di fibre

1-3 La classificazione del calcestruzzo fibrorinforzato

La classificazione del calcestruzzo fibrorinforzato si basa sulla resistenza residua a trazione post-fessurativa. Le curve distintive di un composto fibrorinforzato presentano tutte un tratto ascendente fino al momento della prima fessurazione, indipendentemente dalla tipologia di rinforzo utilizzata. Sarà l'andamento del tratto successivo a determinare il diverso comportamento del materiale composito. Le due diverse tipologie di comportamenti riscontrabili prendono il nome di "strain-softening" e "strain-hardening". In conformità a questo comportamento sono distinguibili i

calcestruzzi fibrorinforzati ordinari da quelli ad alte prestazioni, caratterizzati da una risposta strain-hardening a trazione accompagnata dalla formazione di fessure multiple ed una grande capacità di assorbimento di energia . Nella figura sono visibili i punti chiave alla definizione del comportamento del materiale. Per il primo comportamento ("strain-hardening") si vede che dopo il raggiungimento della tensione di prima fessurazione (σ_{cc}) la curva vede un aumento di tensione. Il punto di tensione massima verrà indicato con le coordinate (σ_{pc} , ϵ_{pc}).

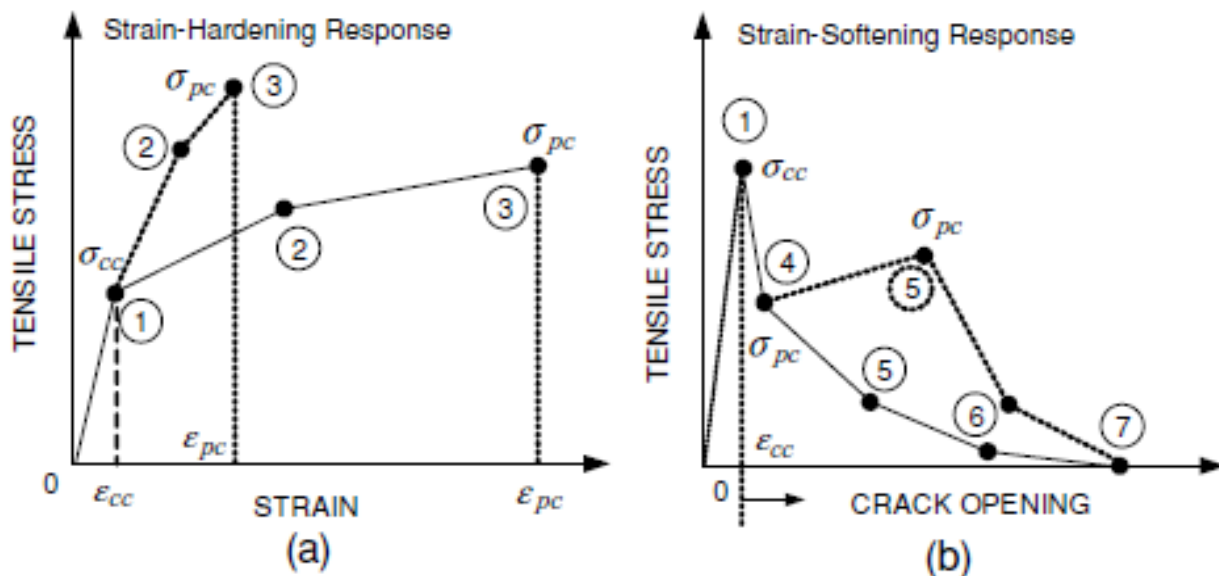
Nel caso di "strain-softening" invece una volta raggiunta la fessurazione si ha una risposta tensionale decrescente con dei possibili parziali recuperi di rigidità durante la fase fessurativa a seconda dell'utilizzo di fibre di acciaio ad alto modulo elastico, oppure nel secondo caso di fibre polimeriche o a basso modulo elastico.

Sia Le "Linee guida sul calcestruzzo strutturale" sia le "Linee guida sui calcestruzzi ad alta resistenza" (emanate dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici) 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/mm² , ed inferiore o uguale a 75 N/mm² ";
- 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/mm² ed inferiore o uguale a 115 N/mm² ".

Gli UHPFRC, che è anche sinonimo di UHPC, differiscono dalla prima generazione di calcestruzzi ad alte prestazioni detti High Performance Concrete o HPC per:

- la resistenza a compressione che è sistematicamente più alta dei 150 MPa;
- l'uso sistematico delle fibre che garantiscono che il materiale non sia fragile e che modificano la normale richiesta di rinforzi attivi e/o passivi;
- l'alta presenza di legante e per la particolare composizione della miscela.



Tipica curva sforzo-deformazione di un comportamento "strain-hardening" (a); Tipica curva sforzo-COD relativa di comportamento "strain-softening"(b).

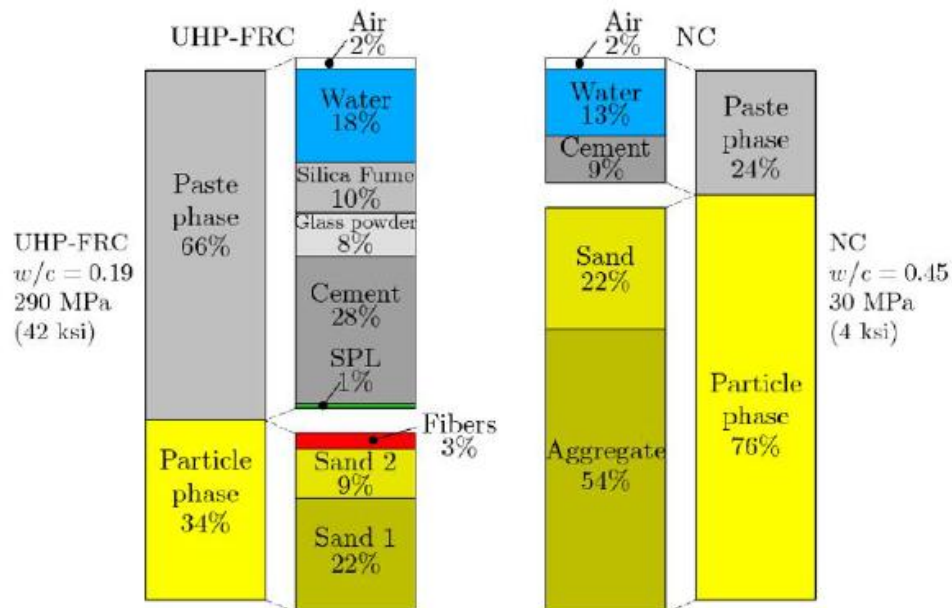
1-4 COMPOSIZIONE GENERALE:

E' possibile definire gli UHPFRC come un materiale che presenta, rispetto ai calcestruzzi ordinari ed a quelli ad alta resistenza, proprietà decisamente superiori in termini di resistenza, durabilità e stabilità sul lungo periodo, derivati in gran parte dalle caratteristiche dei suoi principali componenti, la matrice cementizia, le fibre e dalla loro interazione. Nella tabella successive sono indicati i principali componenti dell'impasto finale che differisce in maniera sensibile da quella di un calcestruzzo convenzionale per la selezione degli aggregati, per l'alto contenuto di cemento e per il bassissimo rapporto a/c, e che nella maggior parte dei casi riscontrati si raggruppano in tre parti:

- un premix, che comprende la miscela granulare composta da cemento, fumo di silice e vari aggregati quali quarzo macinato (o altra pietra tipo basalto o gabbro) e sabbia: la finezza degli inerti rende omogeneo e compatto l'impasto, il fumo di silice riduce la porosità (filler effect) che apporta un miglioramento dell'impermeabilità ed un incremento delle resistenza meccaniche;
- i liquidi, ovvero l'acqua, gli acceleranti e i superfluidificanti (o meglio quelli che vengono chiamati "range water reducing admixture material") usati poiché gli inerti, a causa della ridotta dimensione, tendono ad aggregarsi durante la lavorazione dell'impasto;
- le fibre, o metalliche per aumentare resistenza a trazione e duttilità (ad alto tenore di carbonio, 2% del volume; lunghe 12,7 mm e con diametro di 0,2 mm) o in polivinalcol (PVA, 4% del volume, con minore resistenza meccanica ma maggiore duttilità) o in polipropilene per ottenere una resistenza al fuoco migliorata.

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

Tabella 1 Esempio di composizione di un calcestruzzo ordinario, di un HPC e di UHPC [Spasojevic, 2008]



COMPOSIZIONE:

1- Il cemento:

I calcestruzzi ad alta resistenza richiedono l'impiego di cementi ad alta resistenza meccanica. La normativa europea distingue, come è noto, tre classi di resistenza a compressione dei leganti idraulici come riportato in Tabella 2, tratta dalla UNI EN 197-1 (2011), aggiornamento della norma UNI EN 197-1 (2006).

Classe	Resistenza a compressione (N/mm ²)			Tempo di inizio presa (min)	
	Resistenza iniziale		Resistenza normalizzata		
	2 gg	7 gg	28 gg		
32,5 N	-	≥ 16	≥ 32,5 ≤ 52,5	≥ 60	
32,5 R	≥ 10	-			
42,5 N	≥ 10	-	≥ 42,5 ≤ 62,5		
42,5 R	≥ 20	-			
52,5 N	≥ 20	-	≥ 52,5		≥ 45
52,5 R	≥ 30	-			

Tabella 2 - Classi di resistenza a compressione dei leganti idraulici

2- Gli aggregati:

Nel caso della produzione dei calcestruzzi ad alta resistenza, i materiali lapidei devono essere oggetto di particolari analisi, non solo in termini di curve granulometriche, ma anche di resistenza meccanica. Gli aggregati devono essere certamente conformi, con relativa certificazione CE, alla UNI EN 12620 (2008), e ai requisiti richiesti dalla UNI 8520-1(2005) e UNI 8520-2 (2005), unitamente alla UNI 8520-22 (2002) per la verifica delle espansioni accelerate dei provini di calcestruzzo, dovute alla potenziale reattività tra gli alcali contenuti nel cemento e certe forme di silice reattive presenti negli aggregati. Gli aggregati occupano una quota rilevante, in termini volumetrici, nella micro e macro struttura della miscela, e la loro qualità, sia fisica che meccanica, influenza anche le proprietà fisicomeccaniche finali del conglomerato cementizio. In particolare, nella scelta tra i diversi potenziali materiali vanno tenuti presenti la forma e la natura dei vari aggregati, incluso il loro diametro massimo, e l'aspetto prestazionale, cioè la loro resistenza meccanica. L'aumento della resistenza meccanica e del modulo di elasticità della matrice cementizia, mediante l'abbassamento dei rapporti acqua/cemento (a/c) o acqua/polveri (a/p), richiede parallelamente anche un aumento delle proprietà fisico-meccaniche dell'aggregato impiegato. La zona di transizione, identificata come quella parte della micro struttura in cui vi è l'adesione tra pasta o matrice cementizia e superficie esterna degli aggregati, rappresenta al contempo la zona più "debole" dalla

quale si propagano le micro fessurazioni nel momento in cui il calcestruzzo viene sollecitato. Per aumentare le capacità di adesione aggregato-pasta o matrice cementizia si deve fare impiego di filler e di aggiunte minerali, unitamente all'impiego di diametri massimi contenuti, che vanno, in genere, dai 12 ai 20 mm. I diametri massimi ridotti degli aggregati permettono non solo una posa in opera più agevole, ma anche il raggiungimento di una ottima omogeneità del calcestruzzo all'interno dei getti.

3- Gli additivi:

La particolare tipologia delle strutture realizzate con calcestruzzi HPC richiede di solito un'alta fluidità, con classi di consistenza di almeno S5. La tecnologia di progettazione degli HPC, inoltre, prevede di solito alti dosaggi di cemento, di aggiunte e di additivi, con una proporzione pasta/aggregati. Per questo motivo sempre maggiori quantità di HPC al giorno d'oggi sono realizzate e messe in opera con consistenza autocompattante in conformità alla norma UNI EN 206-9 (2010). I calcestruzzi ad alta resistenza e basso rapporto acqua/polveri sono caratterizzati da elevate viscosità della matrice cementizia, tali da creare non pochi problemi nella compattazione all'interno dei casseri da parte delle imprese esecutrici.

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

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

4- Fumo di silice

I **Fumi di Silice** vengono impiegati per aumentare la densità del calcestruzzo in quanto le sferette di silice 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 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. In altre parole, la pasta cementizia diviene più resistente degli aggregati che diventano il punto debole del materiale assieme ad un piccolissimo volume posto a confine tra aggregato e matrice cementizia detto "zona di transizione". 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.

Tuttavia anche il calcestruzzo, presenta alcuni limiti prestazionali nel comportamento deformativo dovuto per lo più alla natura estremamente fragile del materiale e "strettamente connessi con la microstruttura densa del materiale e non già con la composizione chimica".

5- Le fibre

Le fibre si caratterizzano per il tipo di materiale e per i parametri geometrici quali la lunghezza, il diametro equivalente, il rapporto d'aspetto e forma (fibre lisce, uncinato, ecc.). La lunghezza della fibra può essere assunta pari alla distanza tra le estremità della fibra, l_f , o la lunghezza della linea d'asse della fibra, l_d . Il diametro equivalente è il diametro di un cerchio con area uguale all'area media della sezione trasversale della fibra.

1-5 La matrice cementizia

La matrice cementizia di un elemento FRC non ha grandi differenze rispetto a quella di un comune calcestruzzo; in entrambe gli elementi principali sono costituiti da cemento Portland, acqua e aggregati di varie dimensioni. In generale sono le particolari richieste di resistenza, compattezza e lavorabilità che l'elemento finito dovrà soddisfare a far dipendere la scelta delle qualità dei singoli componenti. Se si vorrà prediligere la compattezza del prodotto si andranno ad utilizzare aggregati a granulometria fine, che contribuiranno a creare un materiale più omogeneo e quindi maggiormente resistente a trazione. Inconveniente di tale scelta sarà la conseguente diminuzione della lavorabilità dell'impasto che può essere però migliorata aumentando il rapporto acqua/cemento; il tutto tenendo ben presente che la compressione di questo rapporto influisce sulla resistenza a compressione.

Questo problema è stato risolto dall'introduzione dai primi anni '70 di additivi chimici fluidificanti e superfluidificanti, che migliorano le proprietà allo stato fresco senza compromettere le caratteristiche del prodotto finito. Grande importanza hanno assunto negli anni in questo ambito i calcestruzzi autocompattanti (CSS) che, oltre a presentare il vantaggio di non aver bisogno di essere vibrati, sono in grado di gestire anche una grande quantità di fibre portando comunque ad una distribuzione omogenea senza fenomeni di segregazione.

Altra miglioria può essere compiuta, abbattendo anche i costi di produzione, sostituendo parte del cemento con aggregati minerali in particolare fine o con materiale pozzolanico come la loppa d'altoforno, la cenere volante e il fumo di silice che, oltre ad essere fini, durante il processo d'idratazione trasformano la calce Ca(OH)_2 , altamente alcalina, in gel C-S-H (silicati di calcio idrati) responsabile della

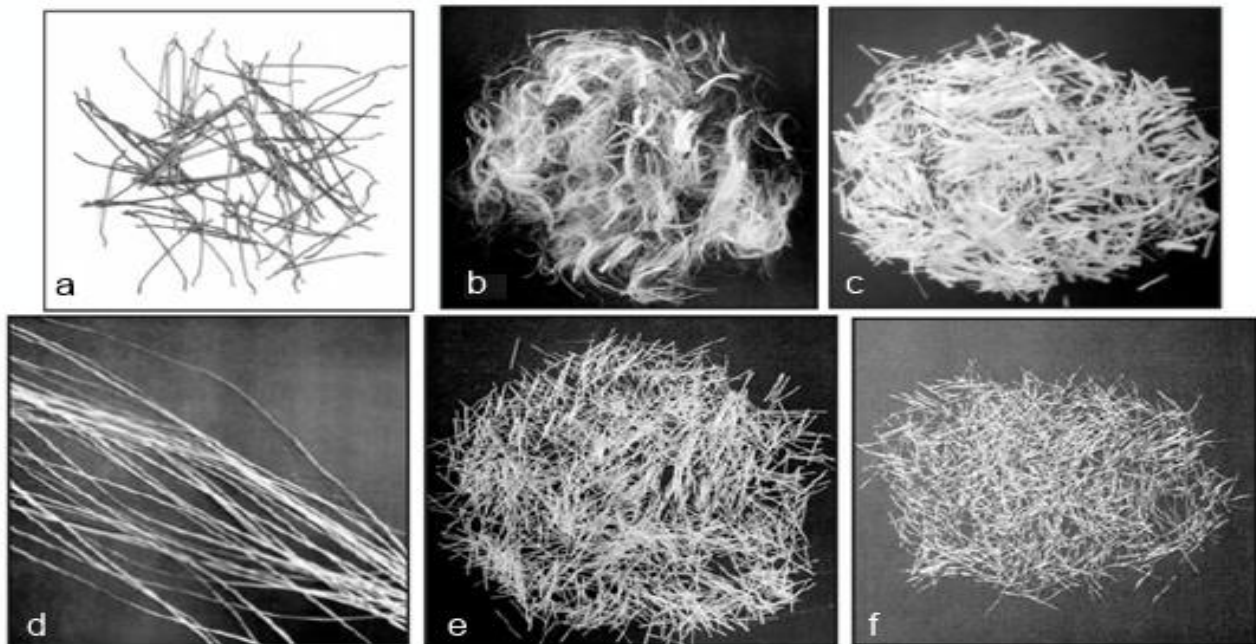
resistenza meccanica del calcestruzzo, creando così compositi UHPFRC (*Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete*). Anche le modalità di confezionamento della matrice influenzano l'efficienza del rinforzo dato dalle fibre inserite nell'impasto. Nel caso di grossi volumi di fibre lunghe, infatti, esse hanno la tendenza a raggrupparsi in grovigli (*fiber balling*) che compromettono l'omogeneità di diffusione all'interno dell'impasto e possono anche ostacolare alcune fasi del procedimento di getto. La soluzione al fenomeno indicato consiste nel produrre una matrice maggiormente viscosa e introdurre le fibre gradualmente controllando la velocità di miscelazione.

1-6 LE FIBRE

I calcestruzzi fibro-rinforzati sono calcestruzzi additivati con fibre corte di acciaio, di materiale inorganico quale carbonio o vetro, o di materiali di altra natura (polipropilene, grafite, kevlar, ecc.).

L'aggiunta di fibre conferisce al calcestruzzo, dopo la fessurazione, una significativa resistenza residua a trazione (detta anche tenacità), che è funzione di alcune caratteristiche proprie delle fibre (fattore di forma, contenuto in percentuale volumetrica, caratteristiche fisicomeccaniche, aderenza tra fibre e matrice) che sono in grado di incrementare significativamente l'energia assorbita nel processo di frattura. Una volta posto in opera, un calcestruzzo fibro-rinforzato acquista proprietà che dipendono anche da altri fattori connessi alle modalità di esecuzione e di messa in opera quali il grado di dispersione delle fibre, la forma e le dimensioni della struttura, l'eventuale anisotropia nella distribuzione, la direzione del getto. Si evidenzia che, per la produzione delle fibre, devono essere utilizzati materiali e componenti qualificati secondo le procedure applicabili. In particolare le fibre devono essere marcate CE, in accordo con le norme europee armonizzate EN 14889-1 (per le fibre realizzate in acciaio) e EN 14889-2 (per le fibre in materiale polimerico). I parametri previsti dalla norma armonizzata EN 14889-2 sono riportati in Tabella. In aggiunta, la confezione delle fibre deve riportare anche il lotto di produzione

Fibre di acciaio	Fibre polimeriche
Lunghezza [mm]	Polimero
Diametro equivalente [mm]	Lunghezza [mm]
Rapporto d'aspetto	Diametro equivalente [mm]
Forma	Rapporto d'aspetto
Resistenza a trazione(*) [MPa]	Forma
Modulo elastico(*) [GPa]	Resistenza a trazione [MPa]
Allungamento a rottura(*) [%]	Modulo elastico [GPa]
Densità [kg/m ³]	Allungamento a rottura [%]
	Massa volumica lineare [tex]
	Temperatura di transizione vetrosa e di fusione



Varie tipologie di fibre: macrofibre di acciaio (a), fibre di polipropilene (b), fibre di vetro(c), macrofibre sintetiche (d), microfibre di polipropilene (e) e di acciaio.

1-7 LE FIBRE D'ACCIAIO

Gli acciai utilizzati per produrre fibre sono generalmente acciai al carbonio o acciai legati (inox), questi ultimi utilizzati per strutture esposte in ambienti corrosivi, per strutture marine o per applicazioni con calcestruzzo refrattario. Le fibre di acciaio possono essere prodotte in diverse varianti, a seconda delle applicazioni. La forma più semplice ovvero quella liscia, usata in origine, oggi è raramente utilizzata in quanto le fibre lisce non sviluppano un legame sufficiente con la matrice cementizia. Viene quindi migliorata l'aderenza fibra-matrice uncinando le estremità o conferendo una forma ondulata a tutta la lunghezza della fibra.

VANTAGGI:

L'aumento della tenacità della matrice cementizia per la presenza delle fibre, può prevenire o almeno ridurre al minimo le fessurazioni dovute alle variazioni di temperatura e umidità relativa, inoltre può aumentare la resistenza nei confronti di carichi dinamici, causati da fenomeni di fatica, azioni sismiche o esplosioni. Tuttavia, i miglioramenti della resistenza dovuti alle aggiunte di fibre sono modesti, eccetto per volumi elevati di fibre. L'effetto principale delle fibre di acciaio è quello di migliorare la resistenza del conglomerato cementizio alla propagazione della fessura, ovvero la tenacità.

SVANTAGGI

Le fibre di acciaio possono subire effetti di corrosione, dovuti essenzialmente all'interazione chimico-fisica tra il metallo e l'ambiente circostante, che risulta in alterazioni delle proprietà tecnologiche del materiale, che possono compromettere la sua funzionalità.

Le fibre che hanno trovato il maggior impiego nella composizione di FRC in generale e di UHPC in particolare sono quelle d'acciaio. Tali fibre sono disponibili in lunghezze comprese tra 6 e 80 mm, con una sezione di area pari a 0.1-1.5 mm², con un diametro corrispondente di 0.15-1.2 mm.

L'obiettivo che si vuole raggiungere con l'inclusione di fibre nel calcestruzzo è di aumentare l'energia di frattura del materiale per realizzare strutture con elevati gradi di duttilità.

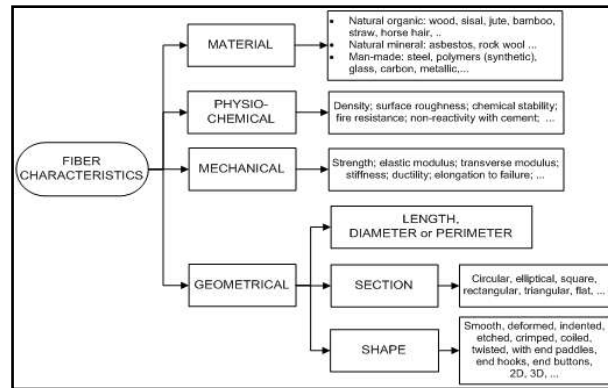
L'introduzione di elementi fibrosi dunque non deve concorrere tanto all'aumento della resistenza ultima, quanto a realizzare un meccanismo dissipativo di energia.

La resistenza a trazione raggiunge normalmente i 2400 MPa e talvolta supera i 3000 MPa ed hanno una densità specifica pari a 7800 Kg/mc. Presentano sezione circolare o rettangolare e sono prodotte mediante taglio o tritatura da fili d'acciaio, lamiere metalliche e barre d'acciaio. Le fibre sono di solito schiacciate o deformate all'estremità presentando o un uncino o una piccola testa atta a migliorare il legame tra fibre e matrice cementizia.

L'uso delle fibre d'acciaio implementa la microstruttura della matrice cementizia, influenzando le proprietà meccaniche del composito grazie alla migliorata capacità di trasferimento dei carichi (o anche capacità portante, bearing capacity) in fase fessurata.

Infatti, al momento della rottura della matrice, le fibre distribuite al suo interno arrestano il processo di rottura intervenendo con un meccanismo a ponte (bridging mechanism) che limita la propagazione delle fessure, impedendo al contempo il processo di fuoriuscita delle fibre stesse (il cosiddetto "fiber pull out"), grazie sia alla loro superficie ruvida sia alla presenza degli ancoraggi di estremità, in grado di fornire entrambi una migliore aderenza con la pasta cementizia.

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



Caratteristiche delle fibre:

- 1- natura organica (come la cellulosa, sisal, juta, bambù, crine di cavallo, ecc); minerale naturale (come l'amianto, lana di roccia, ecc); e artificiale come acciaio, titanio, vetro, carbonio, polimeri o sintetica.
- 2- è funzione delle proprietà fisico / chimiche: densità, rugosità superficiale, stabilità chimica, non reattività con la matrice cementizia, resistenza al fuoco o infiammabilità , ecc
- 3- è funzione delle proprietà meccaniche come resistenza alla trazione, modulo elastico, rigidità, duttilità, allungamento al fallimento, proprietà di adesione superficiale.
- 4- corrisponde alle caratteristiche geometriche della fibra: lunghezza, diametro o perimetro, trasversali forma e profilo longitudinale.

1-8 FATTORE D INFLUENZA SUL COMPORTAMENTO DELLE FIBRE

Sono dunque notevoli gli effetti che comportano l'aggiunta di fibre nella miscela: si ha un relativo aumento della resistenza a compressione (anche del 25%) ed un notevolissimo incremento di quella a trazione, con valori anche raddoppiati rispetto a calcestruzzi della stessa tipologia ma privi di rinforzo fibroso. Numerosi sono però i fattori che influenzano la capacità delle fibre di implementare le proprietà del materiale, tra cui ricordiamo l'orientamento e la distribuzione delle fibre, il fattore di forma (ovvero rapporto tra lunghezza e diametro delle fibre, l_f / d_f), il rapporto di fibre in funzione del volume totale (contenuto volumetrico) ed il rapporto con gli altri componenti della miscela. .

Tuttavia, non conta solo il contenuto di fibre ed il suo rapporto con gli altri componenti. Le prestazioni del materiale infatti sono influenzate dalla configurazione e tipologia delle fibre e dal loro contenuto volumetrico. In linea generale le fibre deformate garantiscono migliori prestazioni strutturali in quanto forniscono un migliore contributo in fase micro e macro-fessurata e a flessione, mentre quelle dritte, solitamente molto corte, aumentano di contro la resistenza diretta a trazione,

arrestando lo sviluppo delle micro fessurazioni sotto carichi estremi, penalizzando talvolta la lavorabilità della miscela.

Quindi con fibre deformate (altamente attorcigliate) viene aumentata la resistenza a trazione e la deformazione al punto di picco.

Il comportamento post picco del materiale è governato dalla resistenza a trazione delle fibre lungo il piano di rottura. Di solito, le fibre non raggiungono lo snervamento anche se nella sezione di rottura del materiale fuoriescono a causa della loro ridotta lunghezza di incorporamento. Un comportamento ottimale post-picco è garantito dalla presenza di un gran numero di fibre attraverso il piano di rottura: più fibre attraversano tale piano nella regione di post-picco, maggiore sarà la resistenza alla fuoriuscita, denotando una tenacità migliorata.

Quindi le proprietà del materiale dipenderanno anche da parametri che rappresentano la spaziatura delle fibre o il numero di fibre per unità di area. Si tratta di parametri di difficile valutazione, dato che in linea di massima la distribuzione delle fibre nella matrice è del tutto casuale. In tal modo avviene che, miscele con lo stesso contenuto volumetrico presentino un numero differente di fibre passanti per il piano di rottura, comportando di conseguenza una differente risposta meccanica. La valutazione di tale parametro può essere determinata valutando l'orientamento e la distribuzione delle fibre nella matrice.

L'orientamento e la distribuzione delle fibre dipendono anche dal dosaggio e dalle dimensioni dei provini, nonché dalla lavorabilità del materiale allo stato fresco e dal metodo di compattazione. 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. Infine le modalità di compattazione (ad esempio su tavole vibranti o per costipazione manuale) condizionano tali parametri soprattutto in riferimento a campioni cilindrici o prismatici utilizzati per caratterizzare il materiale.

L'interfaccia tra matrice e fibre:

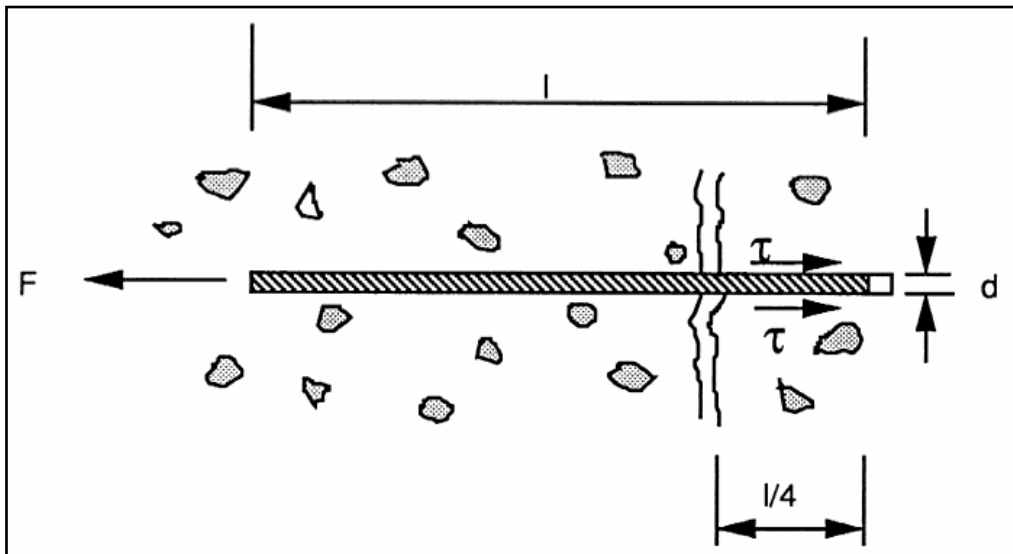
L'interfaccia tra matrice e fibra assume un ruolo importantissimo nello sviluppo delle proprietà del calcestruzzo fibrorinforzato.

L'aderenza tra matrice e fibra è principalmente la resistenza del vincolamento tra questi due componenti. La natura di questa resistenza non è univocamente determinata, poiché per alcuni tipi di fibre, come ad esempio le fibre d'acciaio, il vincolamento è totalmente dovuto all'attrito, entrando quindi in gioco parametri quali la scabrezza e la forma della superficie delle fibre, mentre per fibre come quelle di vetro il vincolamento è in parte chimico e in parte dovuto ad attrito. In tutti i casi l'interfaccia è una zona attraverso la quale le proprietà si trasferiscono da un componente all'altro del composito.

La resistenza del vincolamento quindi è influenzata dalle condizioni superficiali della fibra. Il pull-out di una fibra dalla matrice cementizia è una prova usata per caratterizzare appunto l'aderenza tra fibra e matrice.

La tensione ultima che può sopportare il materiale fibrorinforzato (σ_{po}) si ottiene moltiplicando il numero delle fibre (N) che attraversano l'unità di superficie del composito per la tensione di pull-out (σ_f) relativa ad una singola fibra.

$$\sigma_{po} = \sigma_f \cdot N$$

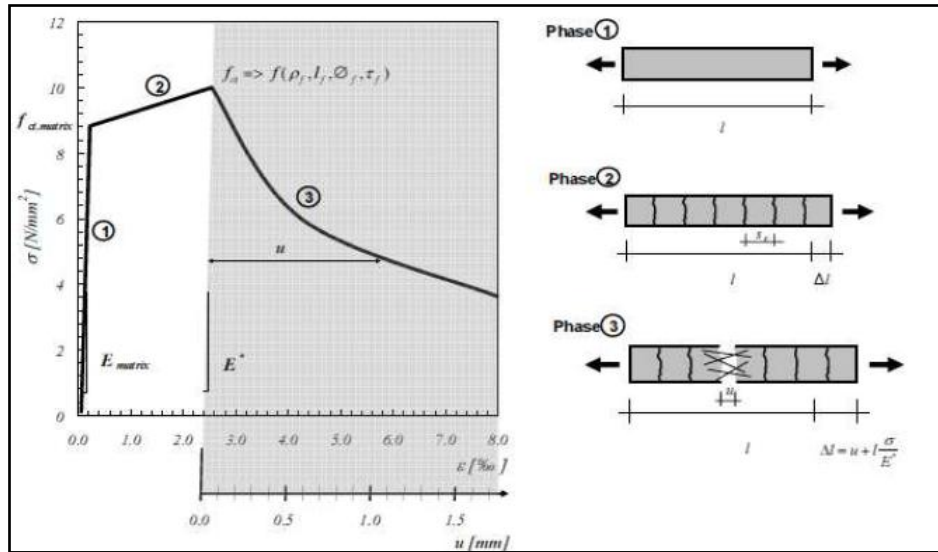


La lunghezza significativa di pull-out è $l/4$, dove l è la lunghezza della fibra. Questo valore è convenzionale e rappresenta la media dei due casi estremi, ovvero che non ci sia il fenomeno del pull-out ($l=0$) e che il valore di l sia pari a $1/2$. Ponendo che il valore massimo di tensioni tangenziali τ che si possono scambiare fibra e matrice sia noto, e assumendo che questo valore non cambi con l'angolo formato dalla fibra con la fessura, la forza per estrarre una fibra dalla matrice si può valutare come:

$$N_{pull-out} = \tau P_f l/4$$

dove P_f è il perimetro della fibra.

1-9 IL CONTRIBUTO DELLE FIBRE:

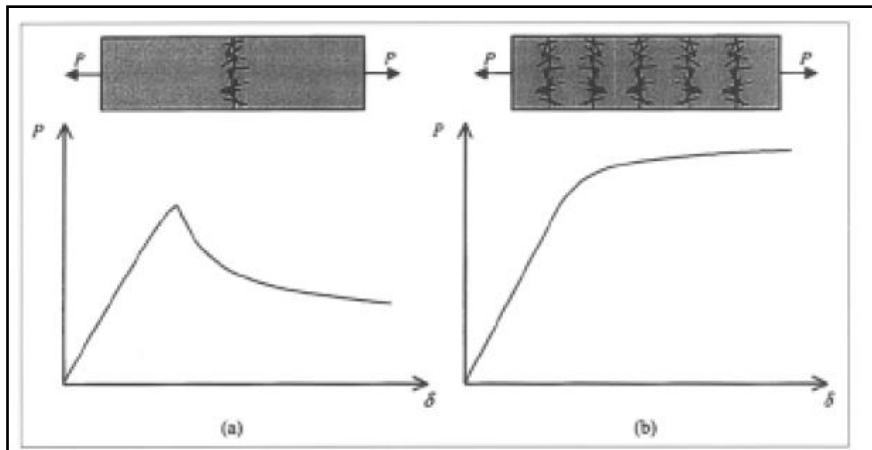


Il contributo meccanico fornito dalle fibre è chiaramente visibile dunque nella fase 2 e 3 del diagramma. L'interazione meccanica tra fibre e matrice cementizia limita l'apertura della fessure, ne favorisce lo sviluppo, instaurando un meccanismo a ponte che trasferisce la tensione da un lato all'altro della fessura.

Tale fenomeno determina, a seconda della sua capacità di dissipare energia e dell'efficacia del comportamento delle fibre, differenti tipologie di rottura che determinano o meno la nascita di un processo di incrudimento del materiale. Se le fibre si rompono o fuoriescono all'inizio del processo fessurativo, o non sono in grado di sostenere aumenti di carico una volta formatasi la prima microfessura, la resistenza di prima fessurazione è anche la resistenza ultima e siamo in presenza di un processo degradante, governato dall'apertura di una singola fessura.

Se di contro le fibre sono in grado di sostenere un grande carico dopo la formazione delle prima fessura, inizia a svilupparsi la multi-micro-fessurazione, che comporta un incremento della deformazione complessiva e un incrudimento (o pseudo-incrudimento) del materiale. Tale incrudimento è assicurato dalla dissipazione dell'energia durante la fuoriuscita delle fibre, in funzione della resistenza d'attrito tra fibre e matrice.

In ogni modo tale resistenza non deve essere tanto alta da comportare la rottura delle fibre, dato che il meccanismo preferenziale prevede esclusivamente il processo di fuoriuscita.



È stato dimostrato (Spasojevic, 2008) che, vista la sua forte implicazione nelle applicazioni strutturali, il processo di multi-micro-fessurazione deve essere un processo stabile e può essere descritto in via semplificata nel seguente modo.

Quando avviene la prima fessurazione della matrice per $f_{ct,m}$ il carico sopportato da un'unità di area per la matrice viene trasferito alle fibre e quindi deve valere la seguente disequazione:

$$(\sigma_f \cdot V_f) \geq (f_{ct,m} \cdot V_m) + (\sigma'_f \cdot V_f)$$

Dove:

σ_f = è la resistenza ultima delle fibre

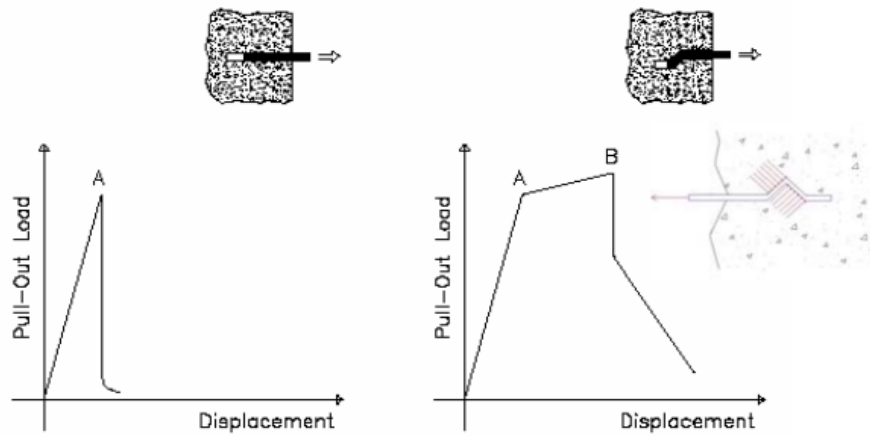
V_m = è il volume della matrice ovvero $V_m = 1 - V_f$

σ'_f = è la resistenza delle fibre prima della rottura della matrice ovvero $\sigma'_f = E_f \epsilon_{cm}$

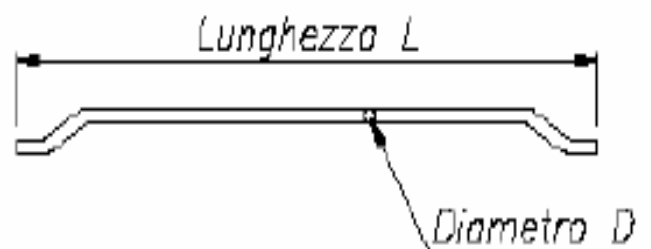
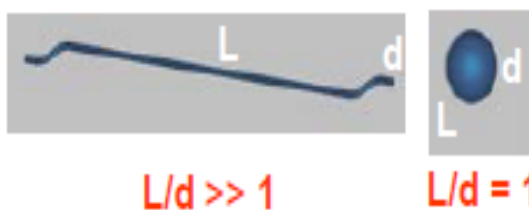
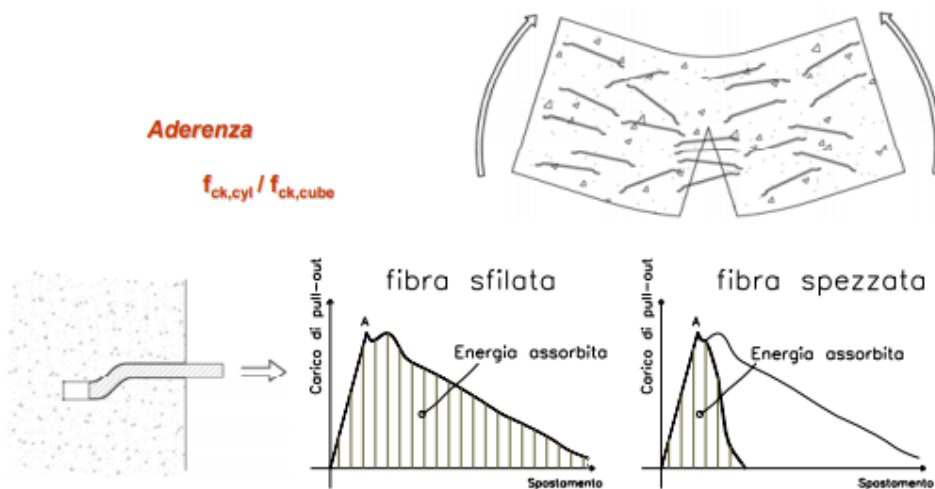
Tale processo è quindi strettamente connesso alla duttilità del materiale che è funzione però anche del contenuto volumetrico.

SAGOMATURA DELLE FIBRE:

La sagomatura delle fibre è fondamentale per la dissipazione di energia nella fase di sfilamento della fibra



UNI 11037: Fibre di acciaio da impiegare nel confezionamento di conglomerato cementizio rinforzato



CAPITOLO 2

2-1 COMPORTAMENTO MECCANICO

PROPRIETA' MECCANICHE DEI CONGLOMERATI CEMENTIZI FIBRORINFORZATI

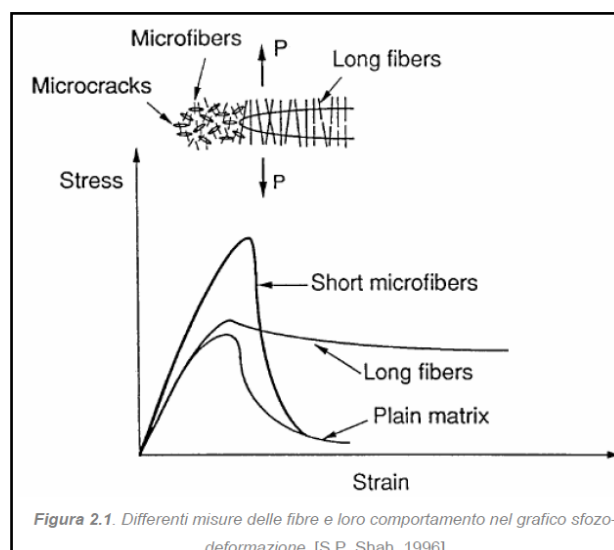
Prima di trattare le prestazioni meccaniche, è bene rammentare che le norme nazionali sul calcestruzzo fibrorinforzato prescrivono un dosaggio minimo di fibre nell'impasto. È il caso della norma UNI 11039-1 - Calcestruzzo rinforzato con fibre d'acciaio, la quale fissa un valore minimo di 25 kg/m^3 , ammettendo dosaggi inferiori che siano giustificati attraverso dati sperimentali ottenuti in sede di prequalifica del fibrorinforzato, nei casi seguenti:

- per rapporti di aspetto delle fibre maggiori di 60;
- in applicazioni speciali, per esempio getti con spessore paragonabile alla lunghezza delle fibre.

Secondo le Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Strutture di Calcestruzzo Fibrorinforzato, CNR-DT204/2006. Il dosaggio minimo di fibre per impieghi strutturali non deve essere inferiore allo 0.3% in volume.

La presenza di un certo numero di fibre in una matrice cementizia può favorire l'effetto di bridging, ovvero la trasmissione della tensione attraverso una fessura, nelle microfessure, provocando anche un aumento della resistenza massima del composito. Lo sviluppo e l'aumento di dimensioni delle fessure chiama in gioco l'ausilio di fibre più lunghe per poter ottenere il fenomeno di bridging, e questo può essere alla base dell'arresto della propagazione delle fessure nel materiale.

Come si vede dalla figura 2.1, combinando fibre di varie dimensioni nel conglomerato fibrorinforzato si può ottenere un aumento nella resistenza massima, oltre al raggiungimento di una tenacità post picco.



2-2 PROPRIETA' CHIMICO-FISICHE

Come tutti i materiali, il calcestruzzo varia il suo volume al variare della temperatura e come altri materiali è soggetto al fenomeno del creep. Ma questa non è l'unica variazione volumetrica che il materiale presenta. A seconda delle condizioni di maturazione, il calcestruzzo di solito si restringe e talvolta si dilata, a causa soprattutto di attacchi di origine chimica, come quelle dovute ai solfati o alla thaumasite. Se esaminiamo poi i ritiri plastici, quelli autogeni o termici e quelli a secco, si nota che l'origine delle variazioni volumetriche è sempre la stessa: la comparsa di tensione di trazione che si generano nel calcestruzzo fresco a seguito dell'essiccazione (ritiro plastico) o nel calcestruzzo indurito a causa di autoessiccazione (ritiro autogeno) e grazie alla essiccazione (ritiro a secco).

- Il ritiro autogeno è una conseguenza della contrazione chimica che avviene nella pasta di cemento quando l'acqua idrata le particelle di cemento. L'idratazione crea circa l'8% di vuoti.
- Il ritiro a secco avviene quando il calcestruzzo si asciuga in aria secca, cosicché perde parte della sua acqua interna e conseguentemente massa. 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 HPC/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. All'interno di un elemento sottile in HPC con rapporto a/c di 0.35, costantemente soggetto a stagionatura nell'acqua, non si formano menischi né tensioni di trazione né ritiro autogeno. Ma quando il rapporto a/c scende sotto lo 0.35 (UHPC) oppure se consideriamo la parte centrale di un grande elemento in HPC con rapporto a/c pari a 0.35, la microstruttura del calcestruzzo può essere così densa che la penetrazione dell'acqua viene fermata e si sviluppa l'autoessiccamento in alcune parti del calcestruzzo. Infatti, quando le particelle di cemento vengono idratate con l'acqua proveniente da un sorgente esterna vi è un incremento nel volume assoluto del cemento che riempie alcuni pori e capillari. In questo caso è più opportuno parlare di ritiro isotermico più che di autogeno, dato che un ritiro autogeno si riferisce ad un ritiro che avviene in un sistema chiuso. 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 autogeno non si sviluppa nel HPC fintanto che i pori ed i capillari sono interconnessi e vi è l'apporto di acqua esterna, ma quando la continuità dei pori e dei capillari viene interrotta, allora e soltanto in quel caso si sviluppa il fenomeno del ritiro autogeno all'interno della pasta di cemento di un composito ad alte prestazioni. Il ritiro a secco (idraulico) 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 HPC/UHPC è un fenomeno lento a causa della ristrettezza dei capillari e della loro scarsa connessione. Un'altra grande differenza tra il ritiro a secco e quello autogeno risiede nel fatto che il primo si sviluppa dalla superficie verso l'interno, mentre il secondo è omogeneo ed isotropico, nella misura in cui le particelle di cemento e di acqua sono ben disperse all'interno del materiale. Ci sono perciò differenze notevoli tra un calcestruzzo ordinario ed un HPC/UHPC rispetto al ritiro. La pasta di cemento ordinario mostra un rapido ritiro a secco anisotropico mentre la pasta di un HPC sviluppa un ritiro autogeno isotropico se non stagionato ad acqua. Tali differenze hanno importanti ricadute sia per quanto riguarda la maturazione del calcestruzzo sia per la sua durabilità.

2-3 STAGIONATURA DEL CALCESTRUZZO

La stagionatura di un HPC/UHPFRC è alquanto differente rispetto a quella di un calcestruzzo ordinario a causa del differente comportamento di ritiro. Se l'HPC/UHPC non viene da subito stagionato nell'acqua, è incline a sviluppare un discreto ritiro plastico dato che non è protetto dall'acqua di bleeding e successivamente può sviluppare un notevole ritiro autogeno dovuto per lo più alla rapidità con cui avviene l'idratazione. Mentre le membrane utilizzate per la stagionatura provvedono a fornire una adeguata protezione per il calcestruzzo ordinario (che è insensibile al ritiro autogeno), nell'HPC/UHPFRC possono soltanto prevenire il fenomeno del ritiro plastico ma non riescono ad inibire quello autogeno. Il periodo critico della maturazione di qualsiasi HPC inizia dalla posa in opera fino a 2-3 giorni dopo e il quello più critico è tra le 12 e le 36 ore. Infatti, il breve periodo durante il quale deve essere applicata l'acqua di maturazione viene considerato come un significativo vantaggio rispetto ad un calcestruzzo ordinario. La migliore stagionatura del HPC avviene mediante inondamento e nebulizzazione: uno di questi due metodi dovrebbe essere utilizzato il prima possibile, immediatamente dopo la posa in opera o la finitura. Un ritardante di evaporazione ("evaporation retarder") può essere applicato contemporaneamente per prevenire il ritiro plastico. Se, per qualsiasi ragione, non è possibile attuare né l'inondamento né la nebulizzazione per un periodo di 7 giorni, allora la superficie del calcestruzzo deve essere coperta con una tela umida o preferibilmente con un tessuto organico precedentemente bagnato ("prewetted geotextile"). Inoltre, è stato osservato che quando un qualsiasi calcestruzzo viene sottoposto a stagionatura all'acqua durante la presa, non si ritira ma piuttosto si gonfia. La stagionatura ad acqua può essere interrotta dopo 7 giorni poiché la gran parte del cemento presente sulla superficie del calcestruzzo è stato idratato e quindi non possono essere ricavati ulteriori vantaggi da tale operazione. Dopo 7 giorni di stagionatura all'acqua, l'HPC dimostra un lento ritiro idraulico (a secco) dovuto alla

compattezza della sua microstruttura e che quello autogeno ha già seccato i pori più grandi. Allora, teoricamente la miglior cosa da fare è di dipingere l'HPC o di usare un sigillante cosicché l'acqua che resta nel calcestruzzo può essere trattenuta per contribuire all'idratazione. Non ci sono veri vantaggi nel dipingere o sigillare un calcestruzzo molto poroso dato che è impossibile ottenere un rivestimento assolutamente impermeabile, in ogni caso si può rivelare come una cosa facile ed in parte efficace. È stata provata la sostituzione parziale degli aggregati grossi con un equivalente volume di aggregati leggeri saturi per controbilanciare dall'interno il ritiro autogeno. Infatti gli aggregati agiscono come piccoli serbatoi d'acqua e possono riempire i pori fini creatisi nel processo di idratazione. Pertanto, l'acqua di tali aggregati è asciugata assieme a quella contenuta nei capillari fini.

2-4 DURABILITA' DEL MATERIALE:

Il nuovo materiale si contraddistingue per l'essere maggiormente ecologico dato che i componenti, sono utilizzati al loro massimo, al fine di produrre un materiale che presenti un ciclo vitale più lungo. Ad ogni modo, sappiamo che il calcestruzzo non è un materiale eterno se confrontato con il tempo geologico. Ogni calcestruzzo infatti concluderà il proprio ciclo vitale diventando calcare, argilla o sabbia di silice, ovvero le più stabili forme del calcio, silice, acciaio ed alluminio. Se si osserva la microstruttura di due paste di cemento con rapporto a/c di 0.65 e di 0.25 possiamo notare delle differenze sostanziali: nella pasta con rapporto di 0.25, ci sono più grani di cemento e di conseguenza minore acqua per unità di volume cosicché i grandi di cemento sono più vicini gli uni agli altri rispetto a quanto accade in una pasta con rapporto 0.65. Questa differenza si manifesta nella differente tipologia delle paste idratate. Una pasta con rapporto 0.65 è molto porosa e ricca di prodotti dell'idratazione cristallizzati, mentre una con 0.25 è molto compatta ed è essenzialmente composta da prodotti di idratazione simili ad un gel. La differenza maggiore dal punto di vista micro strutturale tra una pasta ad alto rapporto a/c ed una a basso, risiede nella grande differenza del comportamento meccanico e di durabilità sia della pasta sia della zona di transizione. Si è già visto che in un calcestruzzo ad alte prestazioni, gli aggregati grossi possono essere il collegamento più debole nel calcestruzzo, dal momento che la pasta di cemento ha drasticamente aumentato la sua resistenza diminuendo il rapporto a/c.

La durabilità di un materiale in un determinato ambiente può essere determinata nel corso del tempo, così risulta difficile predire con esattezza la longevità di un HPC dovuta alla mancanza di dati in merito ad HPC esposti ad ambienti molto duri per più di 5-10 anni, eccezion fatta forse per alcune piattaforme petrolifere del mare del Nord,

che sono in funzione da più di 25 anni. Dobbiamo ricordare che i primi utilizzi degli HPC, negli anni sessanta e settanta, sono state applicazioni interne come colonne in edifici elevati che non erano soggette a condizioni ambientali severe. Le applicazioni esterne degli HPC 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 HPC sotto condizioni esterne. Ma, sulla base delle esperienze con gli i calcestruzzi ordinari, possiamo con sicurezza affermare che l'HPC è più duraturo. Infatti, l'esperienza fatta con gli i calcestruzzi ordinari ci informa che la durabilità del calcestruzzo è governata, in larga parte, della permeabilità e dalla severità dell'ambiente. È facile valutare le condizioni estreme di un ambiente in funzione del HPC dato che la pasta di cemento è un materiale essenzialmente poroso e basico e che contiene acqua che può congelarsi. Tali considerazioni inducono semplicemente ad esaminare come l'ambiente condizioni ognuna di queste caratteristiche. D'altro canto, non è sempre semplice valutare come gli agenti aggressivi possano penetrare facilmente il calcestruzzo. Per esempio, il flusso dell'acqua attraverso un calcestruzzo con rapporto a/c di 0.7 è facile da misurare, ma tale flusso si fermerebbe in uno con a/c 0.4, indipendentemente dallo spessore del campione e dalla quantità di pressione applicata. Pertanto, la questione critica rimane come stabilire appropriatamente la permeabilità di un HPC (quindi con basso rapporto a/c e una microstruttura molto compatta).

2-5 MECCANICA DELLA FRATTURA DEI CALCESTRUZZI FIBRORINFORZATI

Un parametro fondamentale quando si vuole studiare il comportamento meccanico di un materiale è la tenacità.

Questa è l'energia dissipata per provocare la formazione di una nuova superficie unitaria di frattura in un corpo sottoposto a tensione.

Durante il processo di propagazione della fessura, l'energia attivante il principio di separazione, è fornita chiaramente dal lavoro delle forze esterne e dalla diminuzione di energia elastica immagazzinata nel corpo, che dipende dalle caratteristiche geometriche del corpo, dal materiale e dalle forze esterne stesse.

Un aspetto importante, è che le modalità di propagazione della fessura in strutture costituite dallo stesso materiale e geometricamente simili dipendono dalla dimensione della struttura.

L'obiettivo che si vuole raggiungere con l'inclusione di fibre nel calcestruzzo è di aumentare l'energia di frattura del materiale per realizzare strutture con elevati gradi di duttilità.

L'introduzione di elementi fibrosi dunque non deve concorrere tanto all'aumento della resistenza ultima, quanto a realizzare un meccanismo dissipativo di energia. La strada che si deve intraprendere è quella di produrre materiali cementizi fibrosi in cui la fibra si sfilava lentamente dissipando energia.

2-6 GLI EFFETTI DELLE FIBRE NEL CALCESTRUZZO

Il calcestruzzo possiede una scarsa tenacità ovvero una pessima attitudine a resistere in stato post-fessurato. Con l'introduzione delle fibre strutturali si raggiungono valori di tenacità che dipendono dal quantitativo/volume di fibre, dalla prestazione del calcestruzzo che le ospita e dalla geometria delle stesse. Posto, infatti, che il collasso dei calcestruzzi fibrosi possa avvenire solo per sfilamento delle fibre (mai per rottura delle stesse) è fondamentale che le fibre siano conformate in maniera da opporsi allo sfilamento stesso. Per questo motivo le fibre metalliche appaiono piegate o sagomate in differenti maniere come pure le fibre sintetiche dotate di generoso diametro equivalente. La capacità delle fibre sintetiche più sottili non sagomate di opporsi allo sfilamento (e contribuire a generare un composito tenace), può essere invece correlato al rapporto d'aspetto e alla numerosità delle fibre stesse. Al fine di valutare la corretta lunghezza delle fibre strutturali, è bene relazionarla con il diametro massimo dell'aggregato in modo che sia intorno al doppio di tale valore. Per contro l'aumento della numerosità delle fibre a parità di volume, impone una seria attenzione nei confronti della lavorabilità del calcestruzzo influenzata dalla superficie specifica delle fibre introdotte. Quindi, la progettazione della miscela deve essere fatta considerando già la presenza delle fibre, poiché, per esigenze di messa in opera, interessa la consistenza del "calcestruzzo fibrorinforzato" nel suo complesso e non la lavorabilità di un calcestruzzo normale a cui vengono aggiunte le fibre, che chiaramente, "soffrirà" in termini di lavorabilità, poiché gli vengono inseriti degli elementi non previsti e che alterano il proporzionamento iniziale degli ingredienti. Il calcestruzzo dovrà poi essere formulato in maniera da possedere una importante attività "adesiva" nei confronti delle fibre al fine di generare un sistema adatto allo scopo. Per questo motivo, a parità di prestazione meccanica, è preferibile che il calcestruzzo abbia un adeguato volume di pasta che tenga conto anche del volume di fibre introdotto.

2-7 DEFORMAZIONE DA RITIRO PLASTICO

La deformazione da ritiro plastico si sviluppa durante le prime 5-10 ore dalla fase di getto. Essa dipende dal rapporto acqua/cemento, dalle condizioni termiche, igrometriche e di ventilazione dell'ambiente. Tale fenomeno si manifesta mediante delle rotture evidenti sulla superficie che possono compromettere la resistenza del manufatto che si sta realizzando. Il ruolo delle fibre all'interno della matrice, è quello

di contrastare il fenomeno fessurativo causato dal ritiro plastico, in particolare le fibre polimeriche risultano essere molto efficienti. La presenza delle fibre, infatti, non riduce il fenomeno evaporativo dell'acqua di impasto, ma consente di incrementare la resistenza a trazione della matrice cementizia, rendendola maggiore della tensione di trazione indotta dal ritiro plastico, evitando così la fessurazione.

2-8 VANTAGGI NELL'USO DEL CALCESTRUZZO FIBRORINFORZATO CON FIBRE D'ACCIAIO:

- Sostituzione o riduzione dell'armatura tradizionale
- Riduzione dei costi relativi alla manodopera
- Riduzione delle problematiche relative al corretto posizionamento delle armature (copriferrì, sovrapposizioni, distanziatori, ecc...)
- Miglior comportamento alla fessurazione
- Maggior durabilità (degrado delle armature con espulsione del copriferrì)
- Maggiore resistenza agli urti e all'abrasione
- Migliore resistenza alla fatica

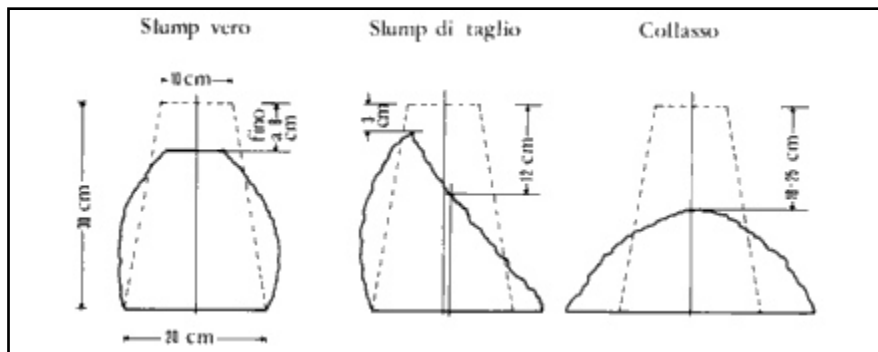
2-9 PROPRIETA' REOLOGICHE

Le proprietà reologiche di un conglomerato cementizio fibroso sono l'insieme delle caratteristiche che ne definiscono il comportamento allo stato fresco. Le principali proprietà reologiche sono:

- lavorabilità,
- segregabilità.

Una prova che misura la lavorabilità del calcestruzzo, sia ordinario che fibroso, può essere effettuata mediante l'abbassamento del cono di Abrams. È una prova veloce e semplice, idonea per un controllo di qualità sul calcestruzzo proveniente dalla stessa lavorazione, piuttosto che per calcestruzzi confezionati con materiali diversi.

L'apparecchiatura consiste di un tronco di cono aperto alle due estremità che viene appoggiato su una base metallica non assorbente e riempito dall'alto con tre strati successivi di calcestruzzo costipati con modalità standardizzate. Sollevando il cono, l'impasto, per l'azione della forza di gravità, tende a spandersi sulla base d'appoggio fino a che non si raggiunge un equilibrio tra le forze interne resistenti e quelle esterne. Dopo aver sollevato il cono si misura l'abbassamento (slump) del calcestruzzo rispetto all'altezza originale. La prova è eseguita seguendo la norma UNI EN 12350-2. Si possono verificare tre tipi di slump. In base alla misura dell'abbassamento si può catalogare il calcestruzzo secondo classi di consistenza (tabella 1.1).



Classe di consistenza	Abbassamento al cono [mm]	Denominazione
S1	da 10 a 40	Umida
S2	da 50 a 90	Plastica
S3	da 100 a 150	Semifluida
S4	da 160 a 210	Fluida
S5	oltre 210	Superfluida

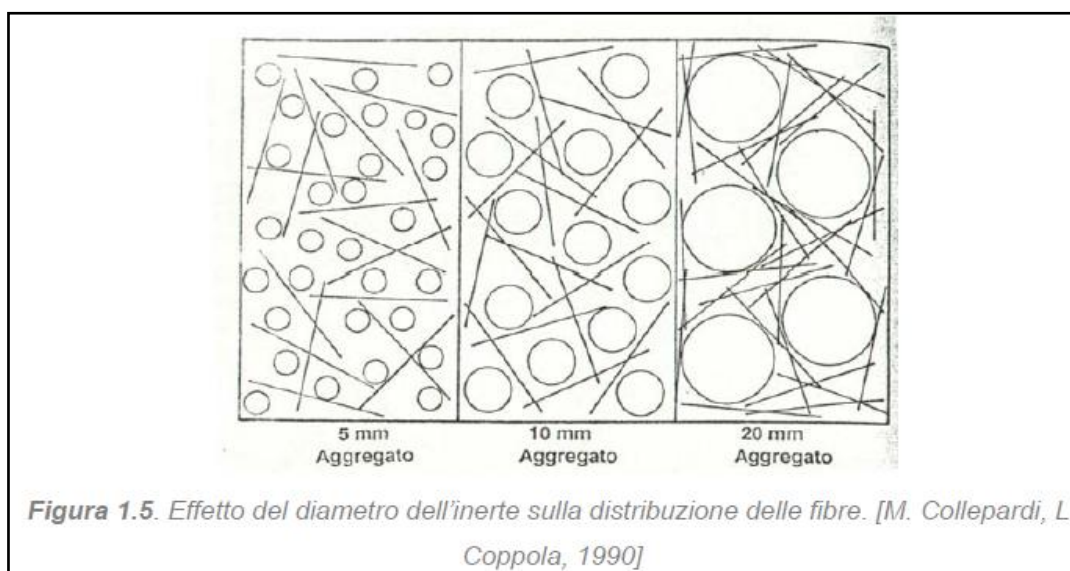
Tabella 1.1. Classi di consistenza.

Un'altra prova, sempre soggetta a queste limitazioni, è il Flow Test che può essere utilizzato per calcestruzzi che prima dell'aggiunta di fibre presentano un abbassamento al cono di Abrams superiore ai 100 mm. Invece la misura della lavorabilità dei calcestruzzi che prima dell'inclusione di fibre hanno un abbassamento al cono di Abrams di 2-3 cm, può essere valutata in modo corretto utilizzando il consistometro di Vebè. Quest'ultima è sicuramente la prova più rappresentativa per quanto riguarda la lavorabilità del calcestruzzo fibrorinforzato, in quanto simula la compattazione che il materiale subirà nella fase di posa in opera. Con questa prova si misura lo sforzo necessario per compattare il calcestruzzo. Il calcestruzzo fresco viene posto in un cono simile a quello usato per lo slump test. Questo cono è montato su una piattaforma che viene messa in vibrazione con una velocità prestabilita nel momento in cui il cono stesso viene tolto. A questo punto viene misurato il tempo necessario al calcestruzzo per essere compattato. Il tempo tiene conto dell'influenza della forma e del volume degli inerti, del contenuto d'aria, della presenza di additivi e dell'attrito superficiale delle fibre. Inoltre la prova consente di individuare il volume critico di fibre, superato il quale non è possibile realizzare una compattazione completa usando le tradizionali tecniche di costipamento. I valori sia dello slump che del tempo di Vebè denotano una perdita di lavorabilità nel calcestruzzo all'aumentare del volume di fibre introdotte nella matrice. È poi interessante notare a parità di volume di fibre l'effetto che hanno fibre di diverso

materiale sulla lavorabilità, in particolare la diminuzione della fluidità della miscela è più accentuata se si aggiungono fibre polipropilene.

Gli altri parametri che influenzano la lavorabilità di un materiale fibroso sono quelli relativi alla geometria delle fibre e alla dimensione degli inerti. Infatti, qualora vengano utilizzate fibre con un rapporto d'aspetto maggiore di 100, queste durante il mescolamento possono addensarsi in grovigli che difficilmente riescono ad essere eliminati.

Nel caso in cui le fibre vengano incluse in un calcestruzzo piuttosto che in una malta la perdita di lavorabilità è ancora più accentuata, in quanto le fibre sono separate da inerti che hanno dimensioni superiori alla spaziatura media delle fibre stesse (figura 1.5).



Pur seguendo accorgimenti particolari, la presenza di fibre in un materiale cementizio ne pregiudica la lavorabilità. Per diminuire questo fenomeno si può optare per fibre con un rapporto d'aspetto non elevato, però questo comporta un abbassamento del carico massimo sopportabile, quindi una diminuzione del rapporto d'aspetto comporta un aumento del volume di fibre se non si vuole compromettere la duttilità post-fessurativa. Pertanto bisogna aumentare la frazione di sabbia nel calcestruzzo e scegliere inerti con pezzatura limitata. Un ulteriore accorgimento può essere l'impiego di cenere volante e additivi aeranti, ciò permette di ottenere calcestruzzi plastici con lavorabilità molto buone. L'impiego di additivi superfluidificanti consente di ottenere calcestruzzi fibrosi con una buona lavorabilità se il volume di fibre non è eccessivo o se il rapporto d'aspetto è inferiore a 100. Perdite di lavorabilità grandi non possono essere compensate solo con l'aggiunta di additivi, in quanto alti dosaggi di additivi portano ad un'eccessiva fluidità della matrice che tende quindi a segregarsi

dalle fibre e dagli inerti. In questa situazione è consigliato l'uso di fumo di silice in aggiunta all'additivo; in questo modo il calcestruzzo presenta un'elevata viscosità a riposo ed una buona fluidità in movimento, eliminando i problemi di segregazione. La tendenza alla segregazione di un calcestruzzo, ovvero la separazione dei suoi costituenti, sia ordinario che fibroso viene valutata attraverso una prova che consiste nel far cadere un volume fissato di calcestruzzo da un'altezza prestabilita su di una base a forma di cono. Da questa prova si riesce a determinare il rapporto tra il peso degli inerti che rimangono nella malta prima e dopo la prova; questo rapporto è detto grado di stabilità, ed è l'opposto della segregazione.

Un ultimo aspetto che compromette la stabilità, è il fenomeno del ritiro plastico. Quando il calcestruzzo si trova in un ambiente in cui la velocità di evaporazione dell'acqua è alta, si instaurano tensioni di trazione che non vengono sopportate dal materiale, data la sua giovane età. Questo inconveniente si evita proteggendo il calcestruzzo in stagionatura mediante pellicole antievaporanti e mantenendo sempre umide le pareti del getto. Un altro metodo per eliminare le fessure dovute a ritiro plastico consiste nell'introdurre nella matrice un quantitativo di fibre plastiche tali da incrementare la resistenza a trazione della matrice, rendendola maggiore della sollecitazione di trazione dovuta a ritiro plastico.

CAPITOLO 3

3-1 PROVE DI FLESSIONE PROPOSTE DA DIVERSE NORMATIVE

La prova quindi più significativa per un provino di calcestruzzo fibrorinforzato è proprio quella a flessione. I risultati di questa prova permettono la caratterizzazione della tenacità del materiale attraverso uno o più dei seguenti parametri: assorbimento di energia, indici correlati alla capacità di assorbire energia, resistenza equivalente a flessione e altri parametri che descrivono il comportamento post-fessurativo. La caratterizzazione della resistenza a flessione può essere determinata secondo diverse modalità, ognuna corrispondente ad un riferimento normativo diverso. Tutte le prove, sebbene si differenzino tra loro, sono tese a determinare la resistenza a flessione e l'aumento di duttilità provocato dalle fibre. Da ognuna di queste prove si determina mediamente che l'introduzione di fibre d'acciaio lascia sostanzialmente invariata la tensione di prima fessurazione della matrice, ma consente di ottenere una resistenza a flessione superiore al valore corrispondente del calcestruzzo senza fibre.

Tra le tipologie di prova valide per la determinazione della resistenza a flessione:

- a) tipologia è la prova di carico su quattro punti;
- b) prova di carico su tre punti con provino intagliato;
- c) tipologia di prova denominato "plate test" (meno utilizzato).

Le prove che verranno successivamente analizzate sono quelle riferite alla normativa:

- **ASTM C1018 - 97** normativa americana;
- **UNI EN 11039 - 2003**
- **UNI EN 14651** normativa italiana;
- **RILEM TC 162 - TDF** normativa comunitaria.

- **ASTM C1018-97**

Questa prova serve per stimare parametri correlati alla tenacità e legati all'area sottesa dalla curva sforzo-deflessione.

I parametri determinati vengono chiamati indici di tenacità e sono ottenuti dividendo l'area sottesa dalla curva sforzo-deflessione fino a valori prestabiliti di deflessione per l'area sottesa dalla stessa curva fino al valore di deflessione corrispondente alla prima fessurazione (a partire da questo punto la curva carico-deflessione assume un andamento non lineare).

Gli indici di tenacità sono dunque numeri adimensionali, e sono così definiti:

- **I5**: numero ottenuto dividendo l'area corrispondente ad una deflessione pari a 3 volte la deflessione di prima fessurazione (δ) per l'area corrispondente a prima fessurazione.

- I10: numero ottenuto dividendo l'area corrispondente ad una deflessione pari a 5,5 volte la deflessione di prima fessurazione (δ) per l'area corrispondente a prima fessurazione.
- I20: numero ottenuto dividendo l'area corrispondente ad una deflessione pari a 10,5 volte la deflessione di prima fessurazione (δ) per l'area corrispondente a prima fessurazione.

Vengono anche introdotti dei fattori, sempre adimensionali, di resistenza residua:

- R5,10: numero ottenuto dalla relazione $20 \cdot (I10 - I5)$.
- R10,20: numero ottenuto dalla relazione $10 \cdot (I20 - I10)$.

Questi valori caratterizzano il livello di resistenza ancora disponibile dopo il raggiungimento della prima frattura. La presenza di fibre può in certi casi aumentare significativamente gli indici di tenacità e i fattori di resistenza residua, mentre in altri casi si registrano incrementi rilevanti solo nella resistenza corrispondente alla prima fessurazione e non negli indici di tenacità e i fattori di resistenza residua. Per trovare questi valori vengono utilizzati travetti di conglomerato cementizio fibrorinforzato di 350 mm per la lunghezza e 100 mm x 100 mm per la sezione trasversale. Questi provini vengono sottoposti a flessione su quattro punti (fig. 2.26); la macchina di prova deve lavorare in controllo di spostamento, poiché lavorando a controllo di carico non si potrebbe determinare il tratto di curva σ - ϵ dopo la fessurazione.

Il carico deve essere applicato al provino senza provocare contributi torsionali, per non compromettere i risultati della prova.

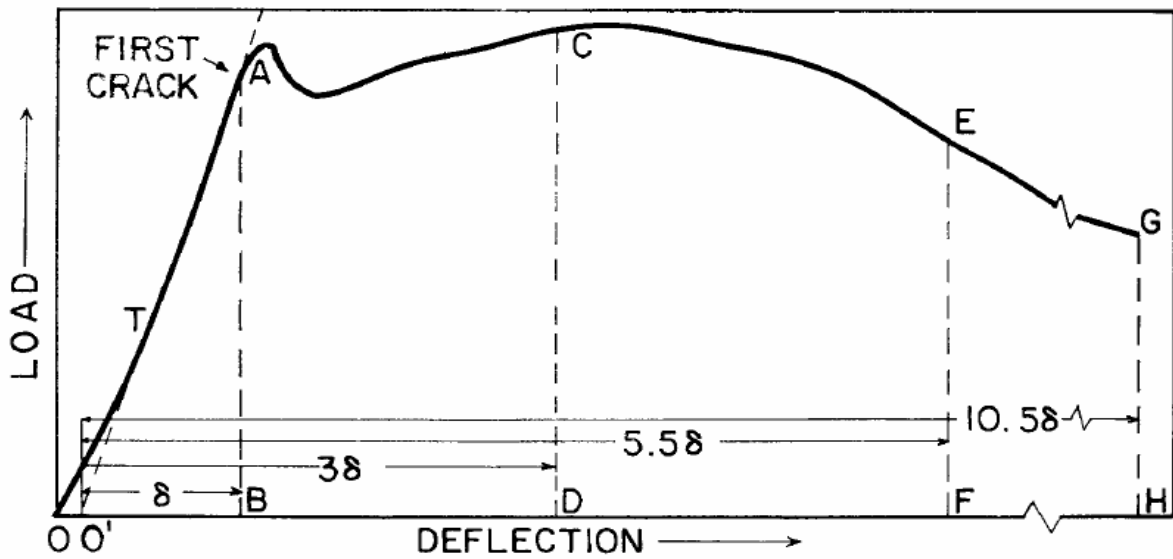


Figura 2.26. Fotografia del macchinario di prova di carico su quattro punti. [ASTM C 1018-97]

La misura della deflessione del provino può essere effettuata nella mezzeria e deve essere eseguita mediante trasduttori elettronici. Il carico è applicato mediante snodi che permettono la rotazione, come illustrato in figura precedente, ed è misurato con l'ausilio di trasduttori.

Le curve che si ottengono sono essenzialmente di due tipi: il primo in cui il tratto che precede la prima fessurazione presenta un andamento concavo (fig. 2.27 a), e un secondo in cui questo tratto è convesso (fig. 2.27 b). In entrambi i casi il punto corrispondente alla prima fessurazione (punto A) è il punto in cui la curva presenta un netto cambiamento di pendenza.

a)



b)

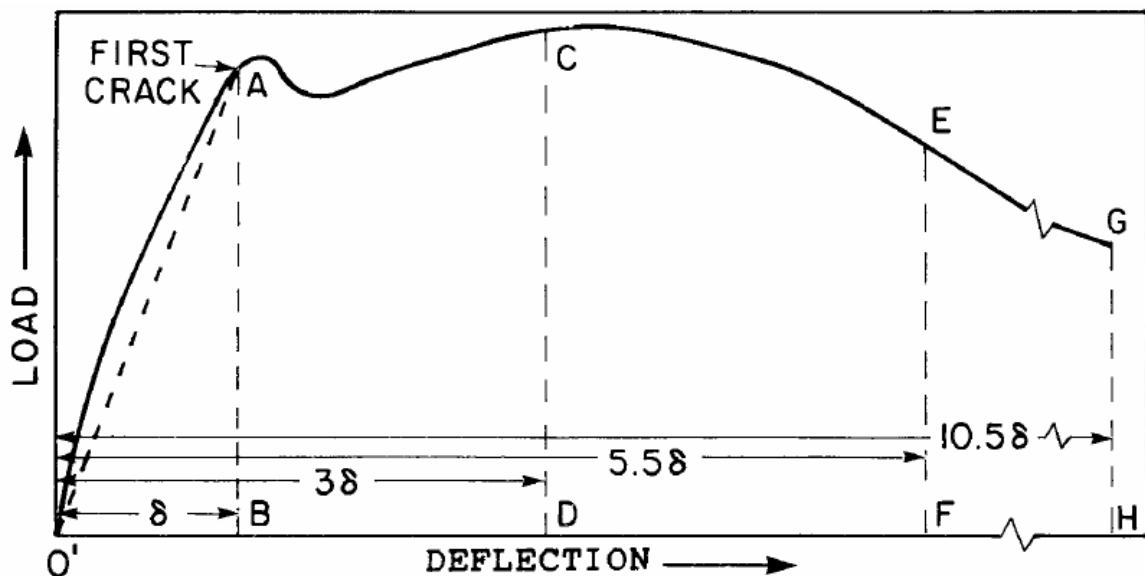


Figura 2.27. Caratteristiche della curva sforzo-deflessione: a) primo tratto concavo, b) primo tratto convesso. [ASTM C 1018-97]

Questa prova richiede un minore tempo di preparazione rispetto a test che prevedono provini intagliati, ma ciò non è detto che comporti una maggiore economicità. Infatti per provini con bassi contenuti di fibre si può formare una fessura instabile che determina l'esito negativo della prova e quindi la necessità di utilizzare un nuovo campione.

- UNI EN 11039 - 2003

Questa norma definisce le caratteristiche ed i requisiti del calcestruzzo rinforzato con fibre d'acciaio e descrive per provini costituiti da questo materiale un metodo di prova per la determinazione della resistenza a prima fessurazione e degli indici di duttilità.

Il provino deve avere dimensioni 150 mm x 150 mm x 600 mm. La macchina di prova utilizzata è conforme alla norma UNI EN 12390-4 per quanto riguarda: la misurazione della forza, l'accuratezza dell'indicazione della forza, la frequenza della taratura e la sicurezza.

Si tratta di una prova a quattro punti; il dispositivo di applicazione del carico è costituito da:

- due cilindri superiori;
- un elemento in grado di ripartire equamente ed uniformemente il carico applicato alla macchina di prova tra i due rulli;
- due cilindri inferiori di supporto;

Lo schema di carico è rappresentato in figura 2.28.

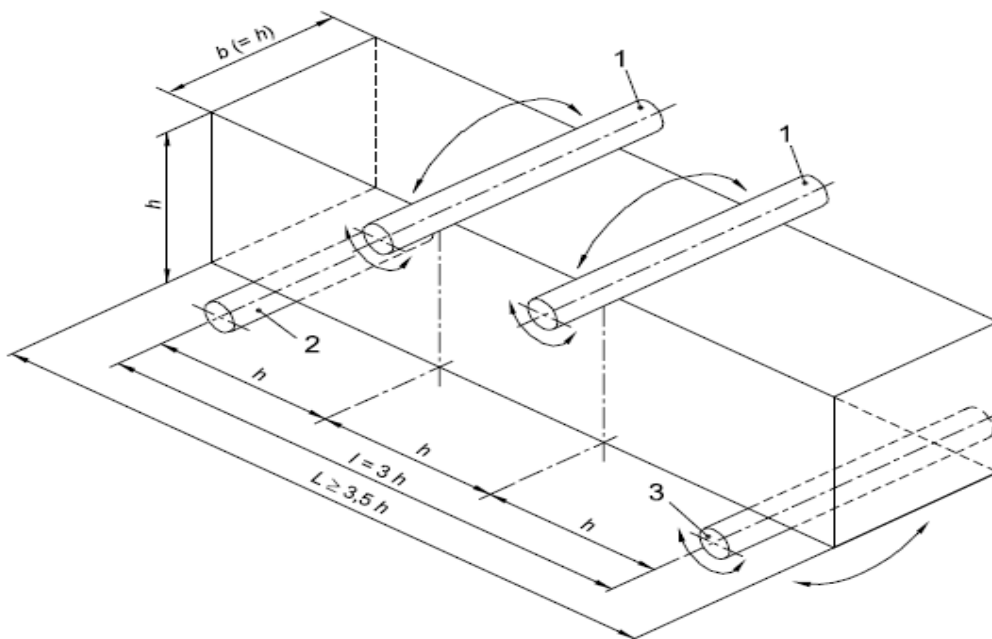


Figura 2.28. Schema di carico di una prova a flessione secondo norma UNI 11039-2: 1) cilindri di carico liberi di ruotare e di inclinarsi; 2) cilindro di supporto; 3) cilindro di supporto libero di ruotare e di inclinarsi [UNI 11039-1 2003]

La misura del carico è effettuata attraverso un trasduttore di forza. Il provino è dotato di un intaglio nella sezione di mezzeria per forzare (e controllare) la posizione della sezione fessurata, esso ha una lunghezza 45 mm ed è sagomato a V nella sua parte terminale in modo tale da controllare il punto di innesco della fessura. Come spostamento di riferimento si utilizza l'apertura di fessura misurata sia all'apice (Crack Tip Opening Displacement, CTOD) sia all'estremità inferiore dell'intaglio (Crack Mouth Opening Displacement, CMOD); quest'ultima misurazione viene utilizzata come variabile di controllo. Il CMOD deve essere aumentato ad una velocità costante di $(0,05 \pm 0,01)$ mm/min. Per valori di CMOD maggiori di 0,65 mm la velocità di spostamento può essere progressivamente aumentata fino a $(0,5 \pm 0,02)$ mm/min con una accelerazione non maggiore di 1 mm/min². Procedendo in questo modo si riesce ad evitare quasi sempre il propagarsi instabile delle fratture, sia nei provini fibrorinforzati sia nel calcestruzzo semplice. In figura 2.29 è riportato lo schema dell'intaglio secondo normativa.

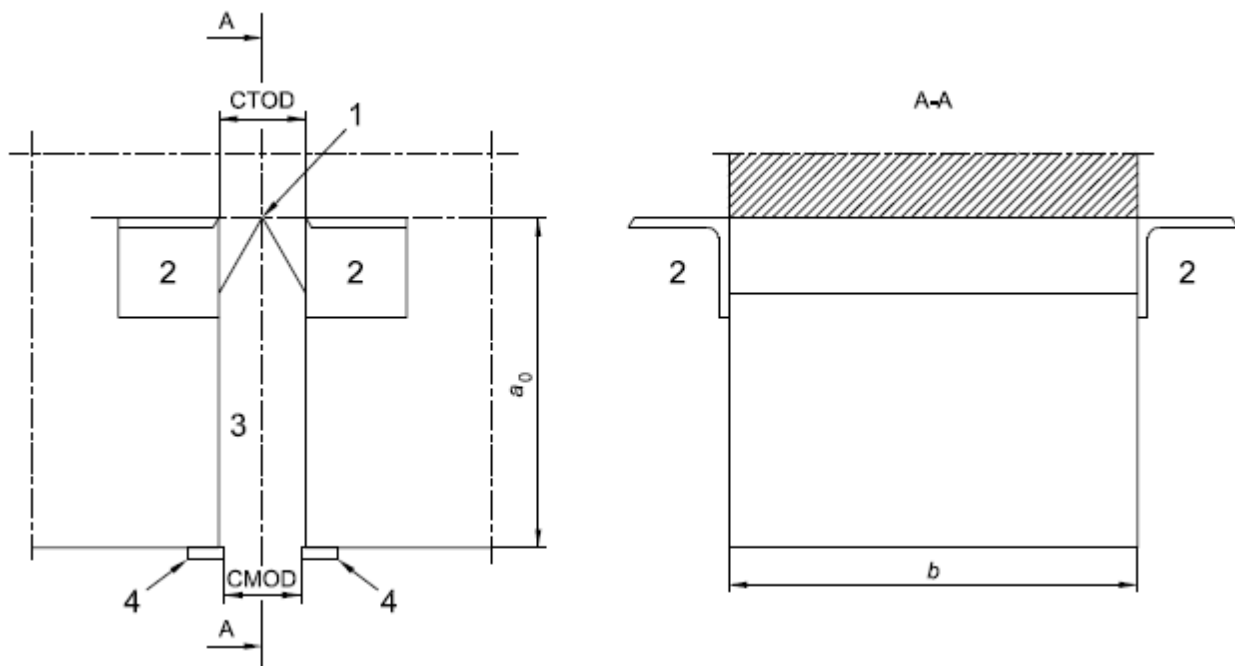


Figura 2.29. Schema dell'intaglio, posizione dei porta trasduttori: 1) Apice dell'intaglio; 2) Portatrasduttore per la misurazione del CTOD; 3) Intaglio; 4) Portatrasduttore per la misurazione del CMOD [UNI 11039-1 2003]

Il carico di prima fessurazione si può determinare attraverso il CTOD. Quest'ultimo però deve avere un valore di riferimento da prendere in considerazione (CTOD₀). Il CTOD₀ è il valore dello spostamento all'apice della fessura corrispondente all'innesco convenzionale del processo fessurativo del calcestruzzo di base. Esso può essere ottenuto mediante due metodi:

- eseguendo direttamente una prova su un provino realizzato con la stessa matrice di calcestruzzo ma senza fibre (metodo diretto);

- assumendo convenzionalmente un valore pari a 25µm determinato da un'analisi statistica basata su una popolazione di provini di calcestruzzo ordinario di resistenza a compressione variabile tra 25 e 80 MPa (metodo indiretto).

Come si nota nella figura 2.30, determinato il valore di riferimento, lo si inserisce nel grafico carico - CTOD relativo al calcestruzzo fibrorinforzato analizzato e si ottiene il valore del carico di prima fessurazione P_{1f} , definito come massimo del carico rilevato dal diagramma carico - CTOD in corrispondenza di valori di CTOD compresi tra 0 e $CTOD_0$.

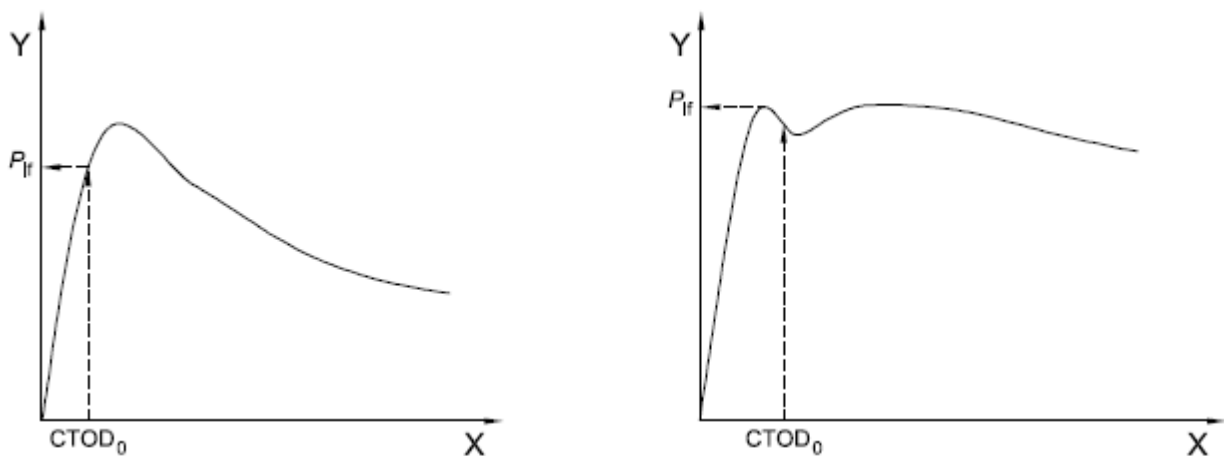


Figura 2.30. Esempi del diagramma carico(Y)-CTOD(X) per la determinazione del carico di prima fessurazione [UNI 11039-2 2003]

Nota il carico di prima fessurazione è possibile determinare lo sforzo di prima fessurazione (f_{1f}), che per la normativa si determina convenzionalmente assumendo una distribuzione lineare degli sforzi nella sezione reagente in corrispondenza dell'intaglio:

$$f_{1f} = \frac{P_{1f} \cdot L}{(b \cdot h - a_0)^2} \text{ [MPa]}$$

dove l , b , h e a_0 sono indicate nelle figure 2.28 e 2.29. Restano da determinare gli indici di duttilità D_0 e D_1 ; la normativa definisce:

- D_0 : indice di duttilità dell'SFRC nel campo di apertura media di fessura $CTOD_{net}$ compreso fra (0-0,6) mm, con $CTOD_{net}$ valore di CTOD al netto di $CTOD_0$; tale indice è espresso dal rapporto tra la resistenza equivalente $f_{eq}(0-0,6)$ e la resistenza di prima fessurazione f_{1f} .
- D_1 : indice di duttilità dell' SFRC nel campo di apertura media di fessura $CTOD_{net}$ compreso fra (0,6-3) mm; esso è espresso dal rapporto tra le resistenze equivalenti $f_{eq}(0,6-3)$ e $f_{eq}(0-0,6)$. Tali indici sono definiti come:

$$D_0 = \frac{f_{eq(0-0,6)}}{f_{1f}} \quad D_1 = \frac{f_{eq(0,6-3)}}{f_{eq(0-0,6)}}$$

La norma definisce le resistenze equivalenti come il valor medio dell'integrale della resistenza convenzionale a flessione dell'SFRC calcolato in un intervallo predeterminato di apertura di fessura. Quindi $f_{eq(0-0,6)}$ e $f_{eq(0,6-3)}$ sono le resistenze equivalenti post-fessurazione, relative all'intervallo di CTODnet compreso tra 0 e 0,6 mm e tra 0,6 e 3 mm rispettivamente. Tali resistenze sono definite come:

$$f_{eq(0-0,6)} = \frac{1}{b \cdot (h - a_0)^2} \cdot \frac{U_1}{0,6}$$

$$f_{eq(0,6-3)} = \frac{1}{b \cdot (h - a_0)^2} \cdot \frac{U_2}{2,4}$$

dove

$$U_1 = \int_0^{0,6} P(CTOD)d(CTOD)$$

$$U_2 = \int_{0,6}^3 P(CTOD)d(CTOD)$$

rappresentano l'area sottese dalla curva di carico - CTOD nei due intervalli di CTODnet definiti in precedenza. Nella figura 2.31 viene rappresentato graficamente quanto esposto sopra.

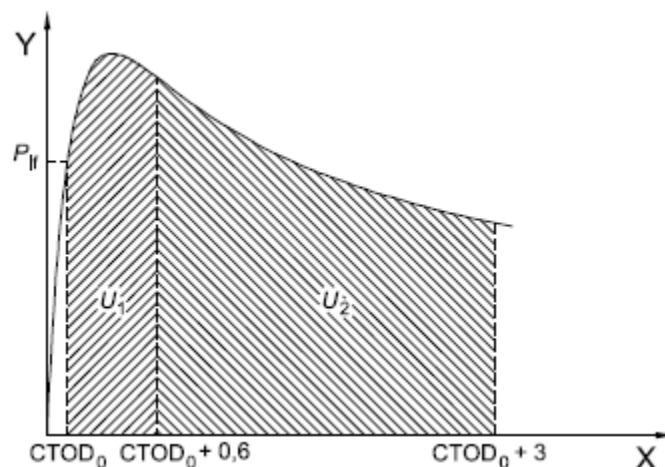


Figura 2.31. Esempio di curva carico (Y)-CTOD (X) con evidenziate le aree sottese ai tratti di curva corrispondenti ad ampiezze di fessura di 0,6 mm e 3 mm [UNI 11039-2 2003]

La normativa UNI 11039 prevede di classificare il calcestruzzo fibrorinforzato in base ai tre parametri f_{1f} , D_0 e D_1 . Per quanto riguarda lo sforzo di prima fessurazione, la normativa prevede le classi di resistenza riportate nella tabella 2.1

CLASSE	$F_{2,0}$	$F_{2,5}$	$F_{3,0}$	$F_{3,7}$	$F_{4,5}$	$F_{5,5}$	$F_{6,5}$	$F_{7,7}$	$F_{9,0}$
Valore minimo di f_{1f} [MPa]	2	2,5	3	3,7	4,5	5,5	6,5	7,7	9,0

Tabella 2.1. Classi previste dalla UNI 11039 per lo sforzo di prima fessurazione [UNI 11039-1 2003]

Le classi previste per gli indici di duttilità sono riportate nella tabella 2.2; si può notare la presenza di tre gruppi di classi, caratterizzate dalle sigle D_S , D_P e D_H , che identificano rispettivamente un comportamento degradante (dall'inglese softening), un comportamento plastico (plastic) e un comportamento incrudente (hardening). Il comportamento degradante è diviso in tre classi, D_{S0} , D_{S1} e D_{S2} , come il comportamento incrudente che è suddiviso nelle tre classi D_{H0} , D_{H1} e D_{H2} .

	CLASSE	D_{S0}	D_{S1}	D_{S2}	D_P	D_{H0}	D_{H1}	D_{H2}
Valori minimi degli indici di Duttilità	D_0	-	$\geq 0,5$	$\geq 0,7$	$\geq 0,9$	$\geq 1,1$	$\geq 1,3$	$\geq 1,5$
	D_1	$\geq 0,3$	$\geq 0,5$	$\geq 0,7$	$\geq 0,9$	$\geq 1,1$	$\geq 1,3$	$\geq 1,5$

Tabella 2.2. Classi previste dalla UNI 11039 per gli indici di duttilità [UNI 11039-1 2003]

La normativa definisce che un SFRC con un indice di duttilità D_0 inferiore a 0,5 non sia classificabile come calcestruzzo fibrorinforzato.

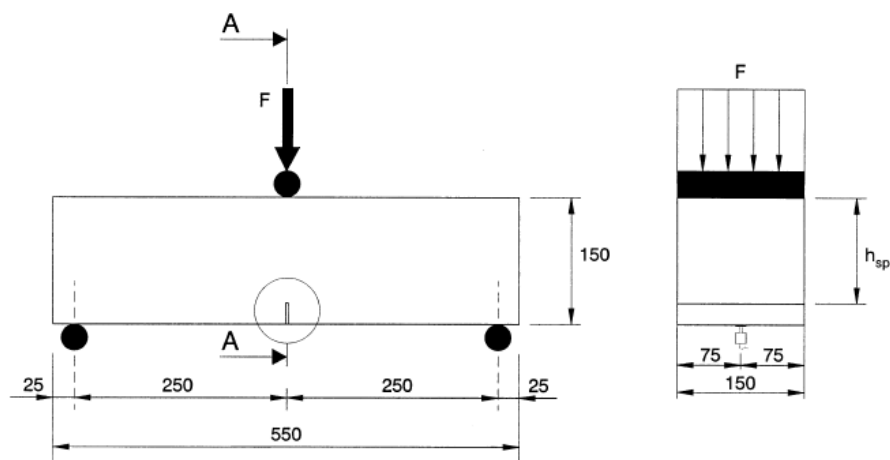
- UNI EN 14651

La norma specifica un metodo per la misurazione della resistenza a flessione di un calcestruzzo con fibre metalliche, ai fini della determinazione del limite di proporzionalità (LOP) e di una serie di valori di resistenza residua.

Si applica a fibre metalliche non più lunghe di 60 mm.

PROCEDURA PROVA

Posizionamento provino:

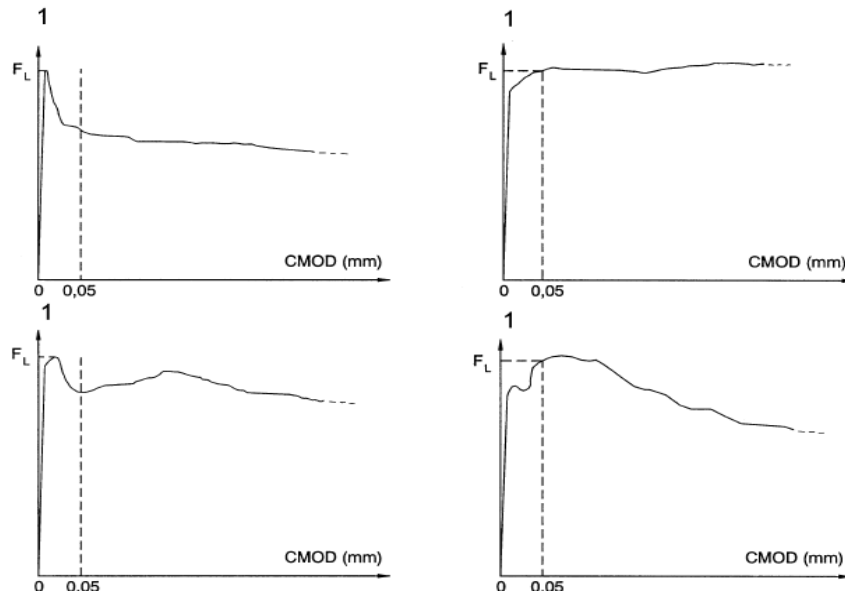


FORME E DIMENSIONE PROVINI:

I provini devono essere prismi conformi alla EN 12390-1 con una dimensione nominale (larghezza e profondità) di 150 mm e lunghezza L tale che $550 \leq L \leq 700$ mm.

La forma e le dimensioni specificate dei provini sono adatte per calcestruzzo con dimensioni massime dell'aggregato non maggiori di 32 mm e/o fibre metalliche non più lunghe di 60 mm.

I valori del carico F_l deve essere determinato tracciando una linea a distanza di 0,05 mm e parallela all'asse dei carichi dei diagrammi carico $CMOD$ o carico inflessione e assumendo come F_l il massimo dei valori nell'intervallo di 0,05 mm.



Resistenza residua a flessione:

$$f_{R,j} = \frac{3F_j l}{2bh_{sp}^2}$$

L'aumento di fibre permette un aumento della capacità portante, ma soprattutto permette di aumentare molto nella fase post-fessurativa le deformazioni, rispetto ad un calcestruzzo ordinario.

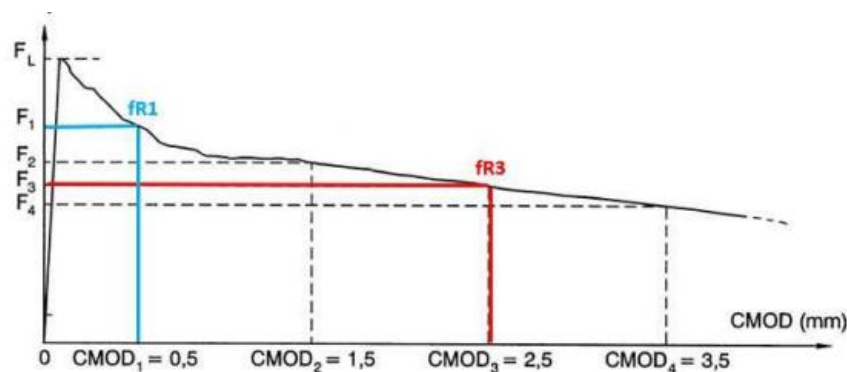
Un'altra capacità di questi calcestruzzi fibrorinforzati è quella di poter sopportare elevate rotazioni in fase di post-fessurazione a vantaggio quindi della duttilità.

La prova prevede la misura sperimentale del carico applicato (F) e dell'apertura di fessura alla bocca dell'intaglio ($CMOD$, come definito dalle UNI EN 14651); il valore $CMOD$ viene utilizzato come parametro di controllo della prova.

La misura della forza esercitata dalla pressa all'aumentare dell'apertura di fessura all'estradosso ci dà una indicazione del comportamento del calcestruzzo fibrorinforzato quando la struttura è, staticamente parlando, "in crisi"! Il grafico della forza in funzione dell'apertura di fessura è normalmente quello mostrato sopra. Si noti la differenza tra la curva A che è tipica del calcestruzzo con fibre non strutturali (o senza fibre) e la B che rappresenta invece il travetto con fibre

strutturali. Il grafico mostra anche una zona iniziale in cui la curva è la stessa in entrambi i casi: questa fase, nella quale la curva della tensione sale in modo rapido e quasi verticale, descrive il travetto nel suo classico comportamento pre-fessurativo, cioè prima che si fessuri. Superato il punto di rottura, la curva della resistenza subisce una brusca discesa e da questo momento in poi l'azione delle fibre strutturali diviene evidente.

Tipicamente in questo tipo di prova si misurano i valori di tensione residua per due misure di apertura di fessura: a $CMOD_1$ e a $CMOD_4$, cioè quando l'apertura di fessura all'estradosso è aumentata rispettivamente di 0.5 mm e di 3.5 mm rispetto alla situazione iniziale.



Tipica curva di una prova di flessione condotta secondo la EN 14651.

La sigla $CMOD$ è l'acronimo di *crack mouth opening displacement*, sarebbe appunto l'apertura di fessura all'estradosso del travetto ed è la misura utilizzata come ascissa nel grafico visualizzato.

Una fibra che vuole essere strutturale deve portare il travetto a superare i valori di 1.5 e 1.0 MPa, rispettivamente a 0.5 e 3.5 mm di $CMOD$. Il dosaggio grazie al quale la fibra supera il test sarà il dosaggio caratteristico della marcatura CE della fibra stessa.

L'uscita della Circolare n.7 del 21/01/2019 "Istruzioni per l'applicazione dell'Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni" di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018" introduce altre importanti novità:

"Le NTC definiscono il calcestruzzo FRC come "caratterizzato dalla presenza di fibre discontinue nella matrice cementizia" e stabiliscono che sia per la sua qualificazione che per la progettazione delle strutture in FRC, si dovrà fare esclusivo riferimento a specifiche disposizioni del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, rese attraverso apposite Linee Guida.

Al riguardo occorre precisare che secondo le dizioni comunemente adottate nel settore della tecnologia delle costruzioni, un calcestruzzo fibrorinforzato ad uso strutturale, per essere definito tale, deve essere caratterizzato da un dosaggio minimo delle fibre al suo interno. Le norme CNR-DT 204/2006 "Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di strutture di calcestruzzo fibrorinforzato", indicano che "per impieghi strutturali deve essere garantito un dosaggio minimo di fibre" e quantificano tale dosaggio come "non inferiore allo 0.3% in volume".

Pertanto, a meno di specifiche indicazioni eventualmente riportate nelle sopraccitate Linee Guida, per quantitativi inferiori a tale dosaggio, allo stato un calcestruzzo che preveda l'utilizzo di fibre non può essere definito, ai fini strutturali, come "fibrorinforzato" e quindi il suo impiego, non vincolato dalle procedure autorizzative, può fare riferimento alle prescrizioni per il calcestruzzo normale, contenute nei pertinenti Capitoli delle NTC.

Ne consegue, in termini pratici, che la presenza di un quantitativo di fibre, può essere considerata nei normali calcestruzzi quale semplice ausilio per il miglioramento del comportamento del calcestruzzo in particolari situazioni, quali ad esempio le fasi di scasso, con lo scopo di tenere sotto controllo microfessurazioni e di minimizzare l'effetto di cavillature in punti sensibili del manufatto, quali spigoli e zone d'angolo, non facilmente raggiungibili dall'armatura ordinaria.

Naturalmente, l'impiego delle fibre comporta comunque l'obbligo del rispetto della vigente normativa del settore, ed in presenza di norme armonizzate il possesso della marcatura CE.

Inoltre, in sintonia con quanto previsto dal p.to 11.2.3 delle NTC, occorre che anche tali calcestruzzi non definibili strutturalmente quali fibrorinforzati, siano oggetto di prove preliminari di studio, non solo al fine di ottenere le prestazioni richieste dal progetto, ma anche, data comunque la specificità del materiale impiegato, di verificare la piena compatibilità delle fibre con il particolare utilizzo previsto.

A tale fine, si ritiene anche necessaria l'implementazione di un sistema permanente di controllo della produzione opportunamente calibrato, attraverso un processo industrializzato dotato di idonei impianti, nonché di strutture e tecniche opportunamente organizzate, al fine di assicurare il mantenimento di un adeguato livello di affidabilità nella produzione del calcestruzzo e nella conformità del prodotto finito."

- RILEM TC 162 - TDF

Il metodo di prova proposto dalla RILEM, che a differenza delle norme precedenti non ha carattere normativo, ma può assumere la definizione di raccolta di linee guida, ha come scopo la valutazione del comportamento degli SFRC in termini di area sotto la curva carico-deflessione ottenuta mediante un test di flessione su tre punti condotto su un travetto intagliato.

Questo metodo porta alla determinazione di:

- il limite di proporzionalità (LOP), cioè lo stress che corrisponde al punto FL sulla curva carico deflessione;
- due resistenze a flessione equivalenti che identificano il comportamento del materiale fino ad una deflessione prestabilita;
- due resistenze a flessione residue, che esprimono le tensioni corrispondenti a due distinti valori di deflessione o CMOD.

Il provino deve avere dimensioni 150 mm x 150 mm x 600 mm. Si tratta di una prova a tre punti di carico; il dispositivo di applicazione del carico è costituito da un cilindro superiore che applica il carico e due cilindri inferiori di supporto. Lo schema di carico è rappresentato in figura 2.32.

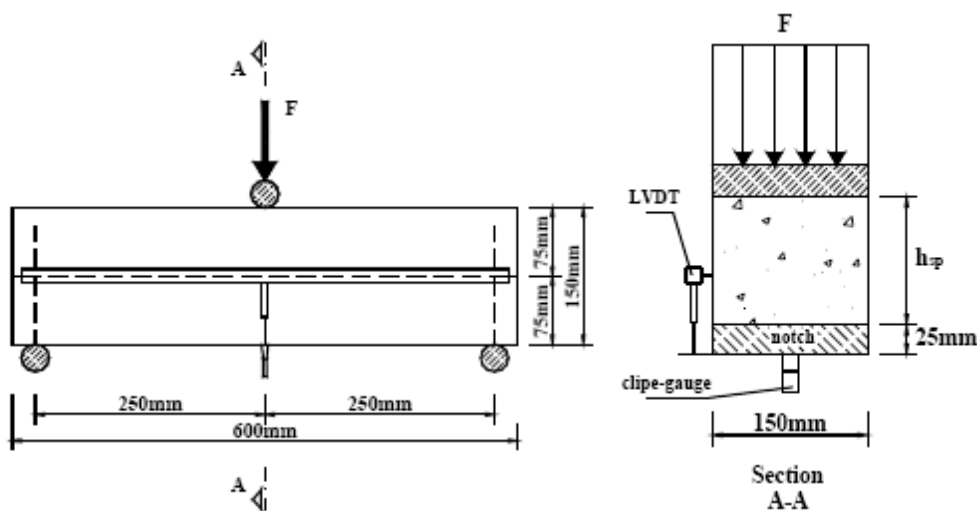


Figura 2.32. Schema di carico di una prova a flessione secondo norma RILEM TC 162-TDF e sezione della zona intagliata [J. Barros, 2003]

Il provino è dotato di un intaglio nella sezione di mezzzeria per forzare (e controllare) la posizione della sezione fessurata, esso ha una lunghezza 25 mm. Come spostamento di riferimento si utilizza sia la freccia in mezzzeria (δ) sia l'apertura di fessura misurata all'estremità inferiore dell'intaglio (Crack Mouth Opening Displacement, CMOD); quest'ultima misurazione viene utilizzata come variabile di controllo della prova.

Il limite di proporzionalità, individuato dal valore del carico FL, consiste nella condizione di prima fessurazione. Si può quindi determinare la tensione

corrispondente eseguendo semplici calcoli sulla sezione intagliata considerata ancora in regime elastico:

$$f_{fct,fl} = \frac{3 \cdot F_L \cdot L}{2 \cdot b \cdot h_{sp}^2}$$

La curva carico - CMOD o la curva carico - δ possono essere utilizzate per calcolare la relazione tensione - deformazione del materiale. Un modo per fare ciò è quello di utilizzare le resistenze residue a flessione corrispondenti a prestabiliti CMOD o frecce. Queste resistenze residue possono essere calcolate come:

$$f_{R,i} = \frac{3 \cdot F_{R,i} \cdot L}{2 \cdot b \cdot h_{sp}^2}$$

Dove $F_{R,i}$ è il carico corrispondente alla freccia $\delta_{R,i}$ o al CMOD_i. Queste resistenze residue si possono calcolare per:

$\delta_{R,1}=0,46\text{mm}$ - CMOD₁=0,5mm

$\delta_{R,2}=1,31\text{mm}$ - CMOD₂=1,5mm

$\delta_{R,3}=2,15\text{mm}$ - CMOD₃=2,5mm

$\delta_{R,4}=3,00\text{mm}$ - CMOD₄=3,5mm

Inoltre si possono utilizzare per caratterizzare il comportamento post fessurativo degli SFRC. I più comuni valori per i quali si calcolano tali fattori sono 1 e 4, ottenendo così $f_{R,1}$ e $f_{R,4}$. Le resistenze equivalenti a flessione ($f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$) sono anch'essi parametri usati per caratterizzare la resistenza della fase post fessurativa. Possono essere relazionati alla capacità del materiale di assorbimento di energia per valori di deflessione compresi tra quello corrispondente a fessurazione (δ_L) e un valore pari a $0,65 + \delta_L$ per $f_{eq,2}$ e $2,65 + \delta_L$ per $f_{eq,3}$.

Tale assorbimento di energia è in parte fornito dalle fibre ($D_{fBZ,2}$ e $D_{fBZ,3}$ di figura 2.33) ed in parte causato dalla fessurazione della matrice (D_{bBZ} di figura 2.33); per il calcolo delle resistenze equivalenti si tiene conto solo del primo contributo. La figura 2.33 mostra le curve carico - deflessione dalle quali è possibile determinare $f_{eq,2}$ e $f_{eq,3}$.

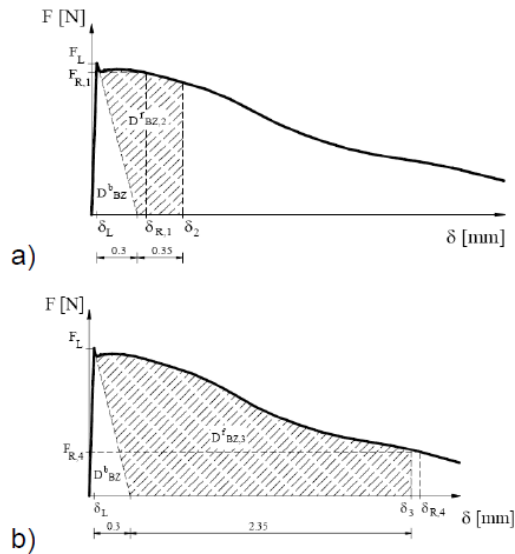


Figura 2.33. Curva carico deflessione con indicati i valori e le aree per il calcolo di $f_{eq,2}$ e $f_{R,1}$ (a) e $f_{eq,3}$ e $f_{R,4}$ (b) [J. Barros, 2003]

Il calcolo di tali resistenze deve essere condotto seguendo le relazioni definite dalla norma:

$$f_{eq,2} = \frac{3 \cdot D_{BZ,2}^f \cdot L}{2 \cdot 0,5 \cdot b \cdot h_{sp}^2}; \quad f_{eq,3} = \frac{3 \cdot D_{BZ,3}^f \cdot L}{2 \cdot 2,5 \cdot b \cdot h_{sp}^2}$$

Analogamente ai valori di resistenza residua, quelli di resistenza equivalente possono essere usati come parametro del materiale per caratterizzare il comportamento nella fase post fessurativa e quindi si può derivare da questi una relazione tensione - deformazione. Le analisi svolte nei capitoli successivi mostreranno queste relazioni.

3-2 ATTIVITA' DI LABORATORIO

Sono stati preparati 6 impasti diversi e a ognuno di essi ricavati 2 provini per la prova di flessione. Un impasto caratterizzato dall'assenza di fibre e gli altri aumentando il contenuto di fibre.

3-3 CONFEZIONAMENTO DEI PROVINI:

Materiali utilizzati: (Documentazione fotografica)



3-4 FASI OPERATIVE

Sono stati preparati in totale 5 impasti diversi e da ognuno di essi si sono ricavati due travetti 70x70x280 mm e tre travetti 40x40x160 mm per la prova a flessione UNI EN 14651 per 3 punti di appoggio, con la differenza di [non avere intaglio, come prevede la normativa.](#)

Fasi operative:

- Pesatura componenti
- Inserimento materiali nella miscelatrice, le fibre, aggiunte come ultime componenti, devono presentare una distribuzione omogenea all'interno dell'impasto.
- Getto
- Copertura provini con pellicola per evitare l'evaporazione dell'acqua
- Disarmo dei provini dopo 24 ore del getto
- Maturazione in ambiente a temperatura e umidità rispettivamente pari a 20 °C e 50%, per 28 giorni.
- Prima di ogni test, uno spray bianco e nero è stato applicato sulla superficie anteriore di ogni provino "70x70x280mm" e "40x40x160mm" per migliorare l'identificazione delle fessurazioni.



Stagionatura provini: 20° e umidità relativa 50%

Le miscele sono così definite:

- 1^a miscela con 200gr di fibre uncinate
- 2^a miscela con 150 gr di fibre uncinate
- 3^a miscela con 100 gr di fibre uncinate
- 4^a miscela con 50 gr di fibre uncinate
- 5^a miscela caratterizzata dall'assenza di fibre

L'aggiunta di fibre comporta una diminuzione della lavorabilità del calcestruzzo. Al fine di garantire un buon accoppiamento con le fibre ed una buona lavorabilità dell'impasto, la granulometria della matrice deve essere opportunamente progettata, ad esempio aumentando la frazione fine degli inerti oppure mediante l'utilizzo di additivi fluidificanti. In particolare, la lunghezza delle fibre e la dimensione massima dell'aggregato devono essere correlate tra loro per garantire una uniforme ed efficiente distribuzione delle fibre.

A tal fine la dimensione massima dell'aggregato non deve essere superiore a 0.5 volte la lunghezza delle fibre. Per ridurre il rischio di una eventuale agglomerazione di fibre, per l'aggregato deve essere adottata una granulometria continua. Inoltre, per assicurare una completa ed uniforme distribuzione delle fibre, la loro lunghezza va correlata alle dimensioni minime (spessori) dell'elemento strutturale da realizzare. Le fibre utilizzate sono di lunghezza 30 mm, diametro 0,38 mm e rapporto d'aspetto (rapporto tra la lunghezza della fibra e il suo diametro equivalente) pari a 80.

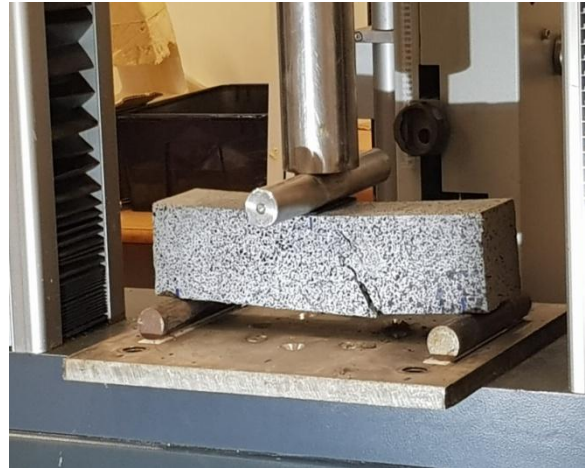
L'effetto principale offerto dalla fibra è quello di migliorare la duttilità del conglomerato cementizio nella fase successiva all'innescò del fenomeno fessurativo. Un parametro di particolare interesse è il "punto di prima fessurazione", a partire dal quale le fibre iniziano a dare il proprio contributo. Tale parametro è convenzionale, a causa della difficoltà nella determinazione dell'innescò del processo di fessurazione. Dato che le caratteristiche peculiari degli UHPFRC, comportano un basso rapporto a/c , è necessario innanzitutto prestare particolare attenzione, in fase di produzione, nel controllare la quantità di acqua apportata nella miscela dai vari componenti, affinché si abbia il controllo generale della quantità d'acqua necessaria alla miscela, nonché di quella assorbita dal cemento e dagli eventuali aggregati fini e quella assorbita dalle aggiunte minerali.

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 si trattasse di un normale calcestruzzo, prestando in quest'ultimo caso la massima attenzione sia alla quantità sia alla regolarità degli ingredienti apportati, monitorandoli con scrupolosa attenzione.

CAPITOLO 4

4-1 PROVA DI FLESSIONE SUI CALCESTRUZZI FIBRORINFORZATI

Documentazione fotografica della prova a flessione:



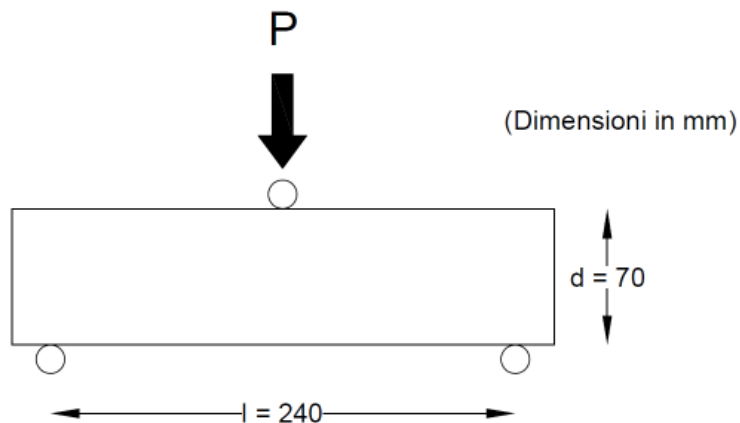
I dati acquisiti durante questa prova sono stati elaborati ed analizzati tramite fogli di lavoro excel.

È stato così possibile costruire i grafici necessari e calcolare i parametri richiesti dalla normativa UNI EN 14651.

La prova di flessione è certamente la più diffusa per la sua relativa facilità di esecuzione e perché è rappresentativa di molte situazioni pratiche. Un altro motivo del successo di questa prova si deve al maggior grado d'iperstaticità della prova, che mette in miglior evidenza la duttilità apportata dal rinforzo fibroso, più di quanto non avvenga nelle altre prove.

Le principali applicazioni dei calcestruzzi fibrorinforzati richiedono che questi materiali siano sottoposti principalmente a sforzi di flessione. Risulta importante quindi studiare il loro comportamento sotto questo aspetto.

4.2 I PROVINI: 70X70X280 mm



Il valore della resistenza a flessione F , è stato calcolato con la seguente formula:

$$F = \frac{3}{2} \frac{fl}{bd^2}$$

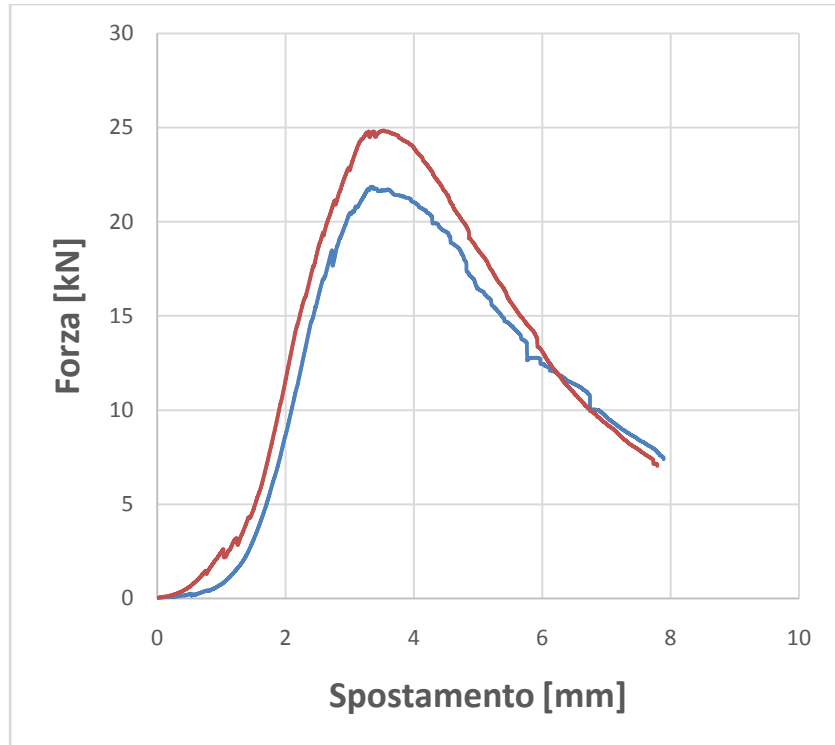
dove f è il valore del carico massimo applicato (in N), b e d sono rispettivamente i valori (in mm) di larghezza e altezza del provino e con l si indica la distanza (in mm) tra gli assi dei supporti (pari a 240 mm), (formula presa dalla normativa UNI EN 14651).

La prova è stata finalizzata alla determinazione della curva forza - spostamento. Ogni grafico è preceduto da una tabella nella quale, per tutti i provini, sono indicati il valore di carico massimo a rottura (F_{max}), espresso in kN, lo spostamento al carico massimo, in mm e la resistenza a flessione f_{max} in MPa.

4.3 ESECUZIONE GETTI

Sono stati eseguiti 5 diversi impasti, aventi stessa composizione ma diverso dosaggio di fibre:

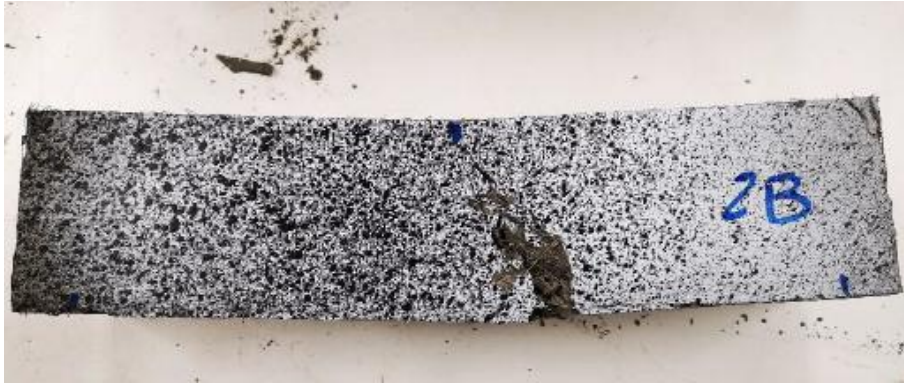
GETTO 1	
Componenti	Kg/m ³
Cemento 52.5R	1000
Fumo Silice	125
acqua	200
superfluidificante	11
sabbia fonderia 0/02	400
Sabbia Po	600
Fibre uncinata	200
antibolle	3



PROVINO 1

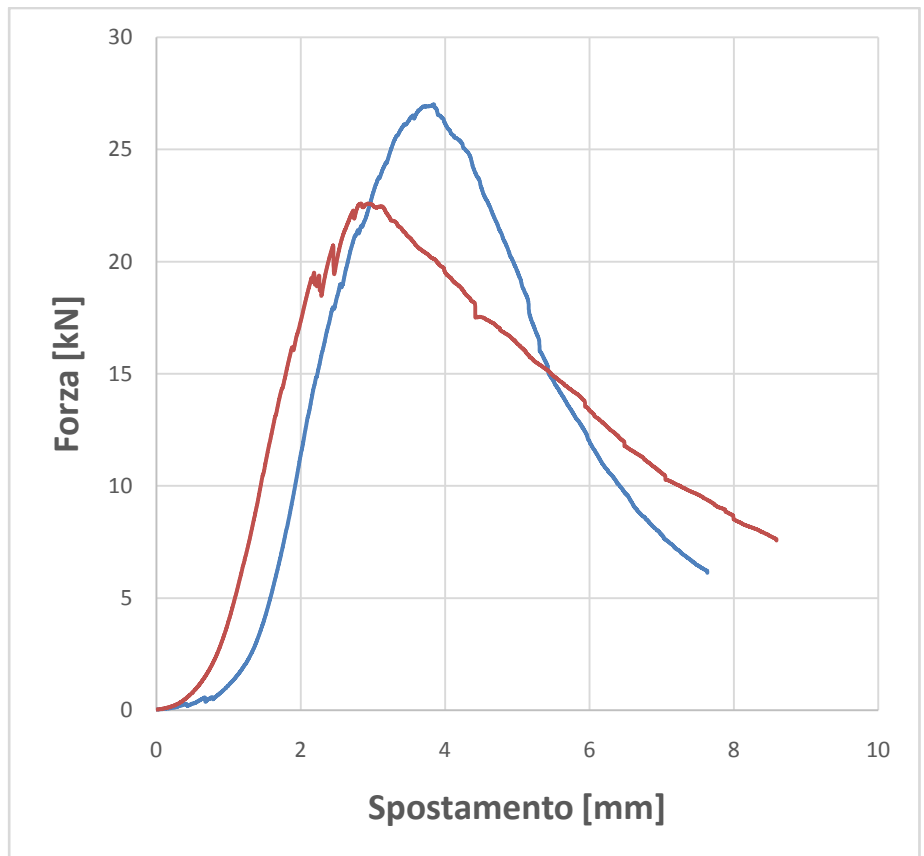
RISULTATI PROVA A FLESSIONE

CAMPIONE	FORZA MAX (KN)	SPOSTAMENTO s (mm)	RESISTENZA A FLESSIONE fmax (MPa)
200A	21,85	0,84	22,93
200B	24,84	1,08	26,07
MEDIA	23,84	0,96	24,50



Rottura provini ,CONTENUTO DI FIBRE 200

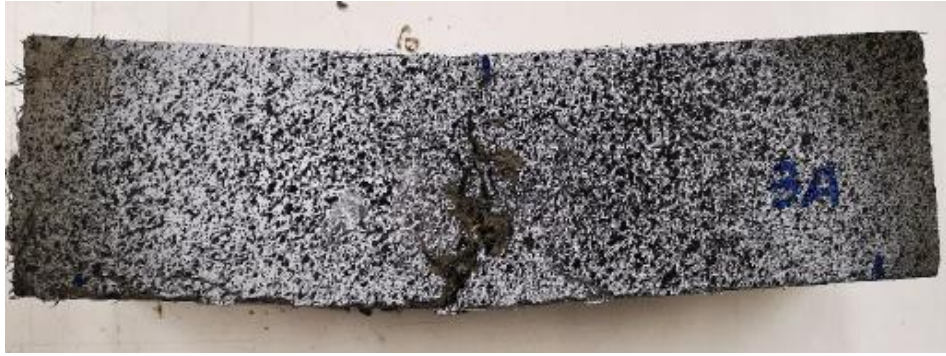
GETTO 2	
Componenti	Kg/m³
Cemento 52.5R	1000
Fumo Silice	125
acqua	200
superfluidificante	11
sabbia fonderia 0/02	400
Sabbia Po	600
Fibre uncinata	150
antibolle	3



PROVINO 2

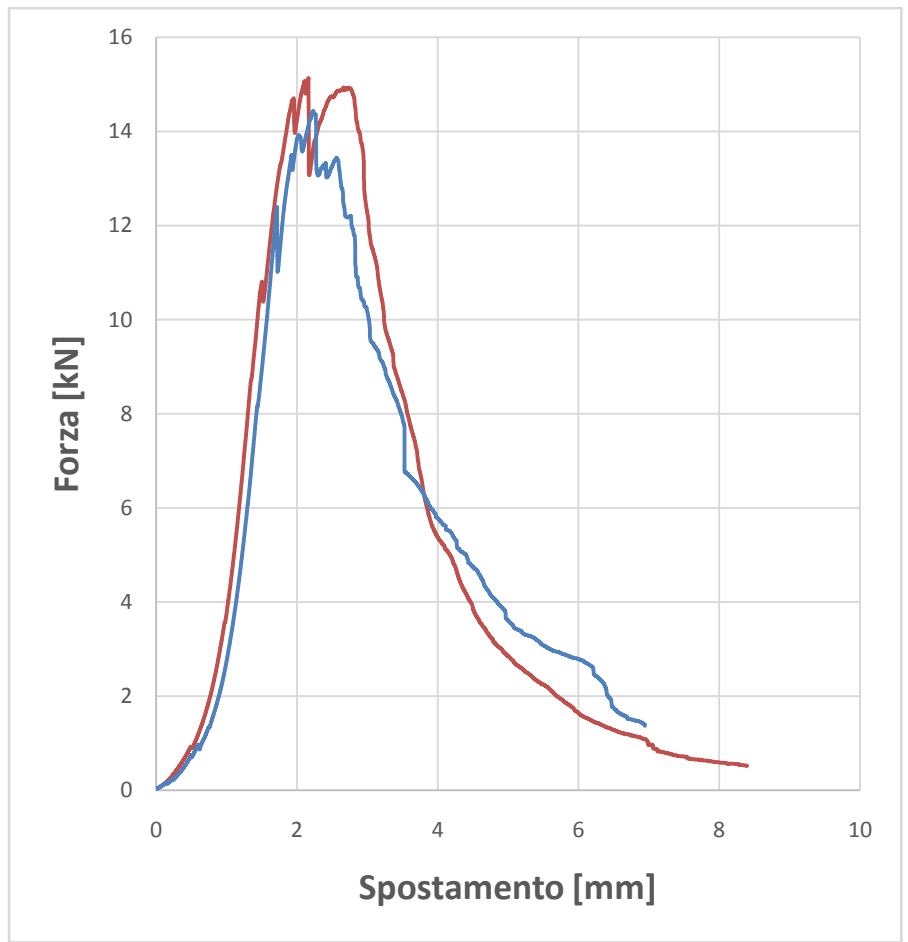
RISULTATI PROVA A FLESSIONE

CAMPIONE	FORZA MAX (KN)	SPOSTAMENTO s (mm)	RESISTENZA A FLESSIONE fmax (MPa)
150A	27,01	1,64	28,35
150B	22,59	1,00	23,71
MEDIA	24,80	1,32	26,03



Rottura provini ,CONTENUTO DI FIBRE 150

GETTO 3	
Componenti	Kg/m³
Cemento 52.5R	1000
Fumo Silice	125
acqua	(totale 560)
superfluidificante	11
sabbia fonderia 0/02	400
Sabbia Po	600
Fibre uncinata	100
antibolle	3



PROVINO 3

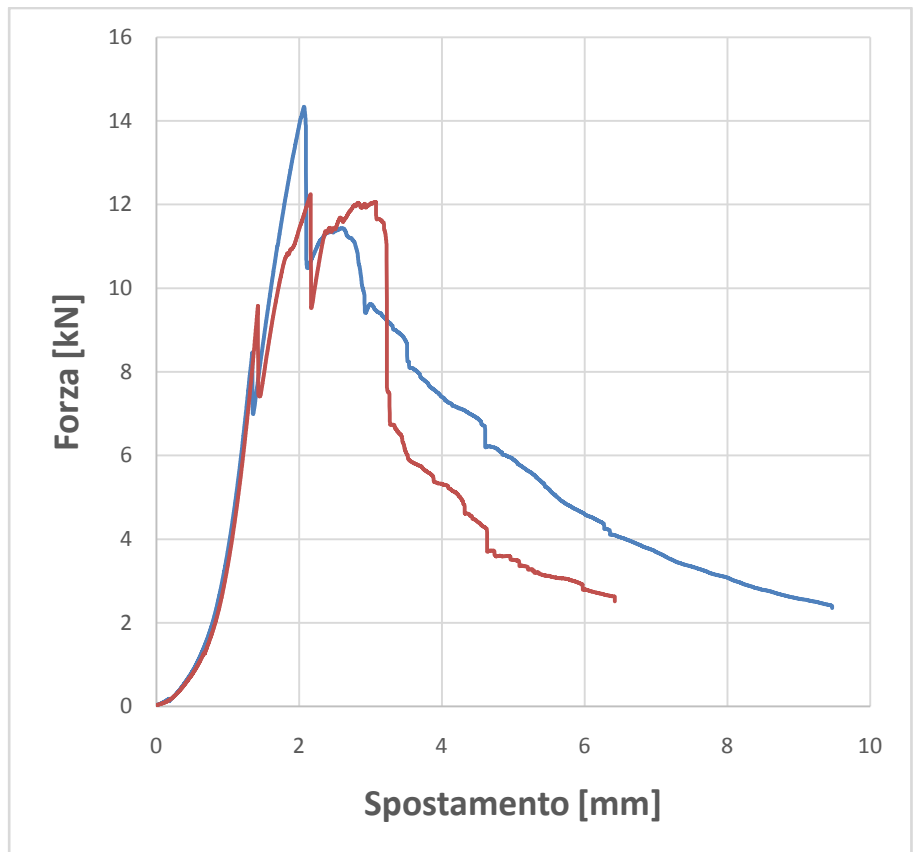
RISULTATI PROVA A FLESSIONE

CAMPIONE	FORZA MAX (KN)	SPOSTAMENTO s (mm)	RESISTENZA A FLESSIONE fmax (MPa)
100A	15,12	0,42	15,77
100B	14,43	0,62	15,15
MEDIA	14,73	0,52	15,46



Rottura provini ,CONTENUTO DI FIBRE 100

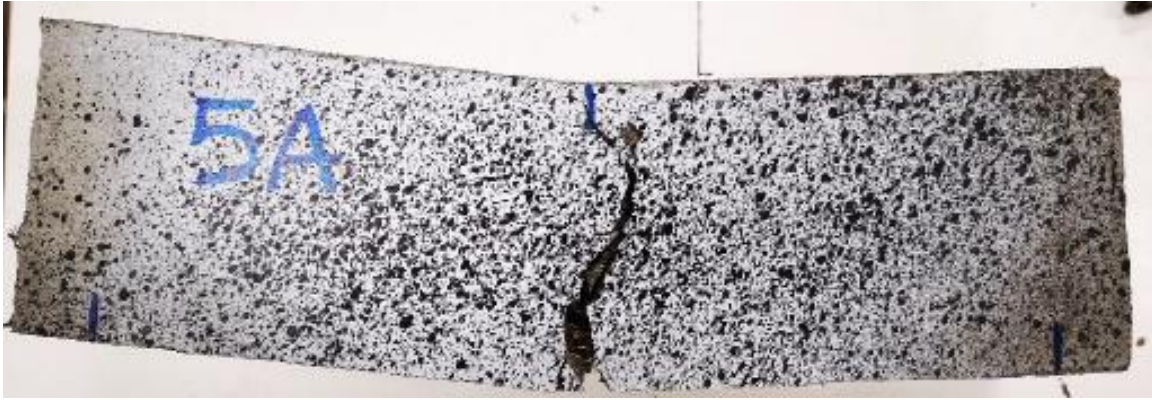
GETTO 4	
Componenti	Kg/m³
Cemento 52.5R	1000
Fumo Silice	125
acqua	(totale 580)
superfluidificante	11
sabbia fonderia 0/02	400
Sabbia Po	600
Fibre uncinata	50
antibolle	3



PROVINO 4

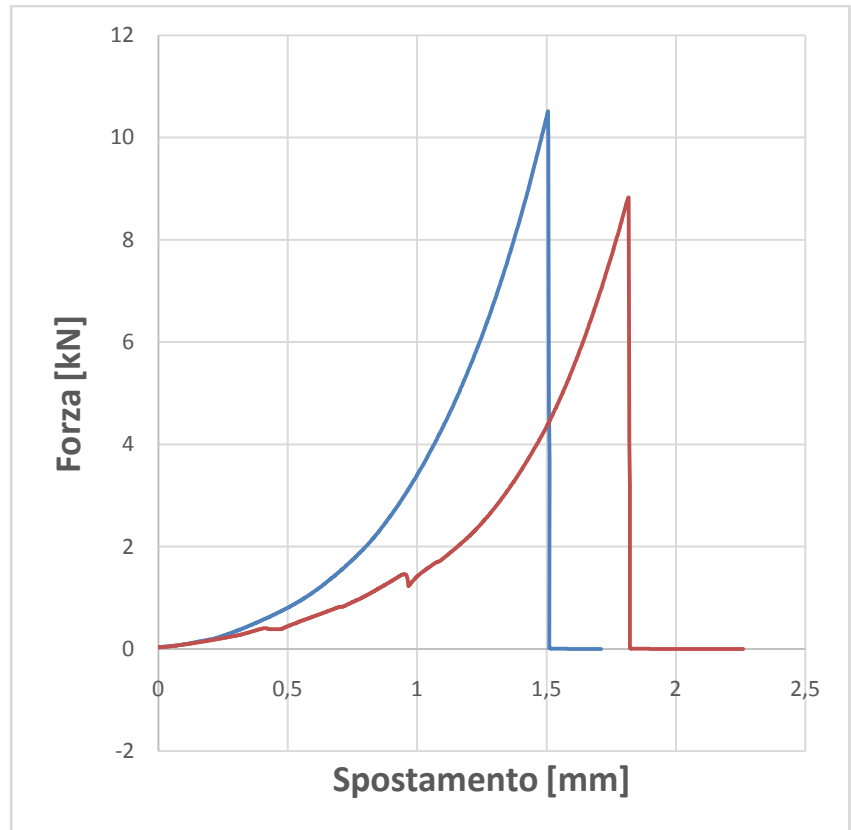
RISULTATI PROVA A FLESSIONE

CAMPIONE	FORZA MAX (KN)	SPOSTAMENTO s (mm)	RESISTENZA A FLESSIONE fmax (MPa)
50A	14,33	0,62	15,00
50B	12,25	0,68	12,79
MEDIA	13,29	0,65	13,90



Rottura provini ,CONTENUTO DI FIBRE 50

GETTO 5	
Componenti	Kg/m³
Cemento 52.5R	1000
Fumo Silice	125
acqua	200
superfluidificante	11
sabbia fonderia 0/02	400
Sabbia Po	600
Fibre uncinata	0
antibolle	3



PROVINO 5

RISULTATI PROVA A FLESSIONE

CAMPIONE	FORZA MAX (KN)	SPOSTAMENTO s (mm)	RESISTENZA A FLESSIONE fmax (MPa)
OA	10,51	0,02	11,00
OB	8,82	0,03	8,78
MEDIA	9,65	0,025	9.89

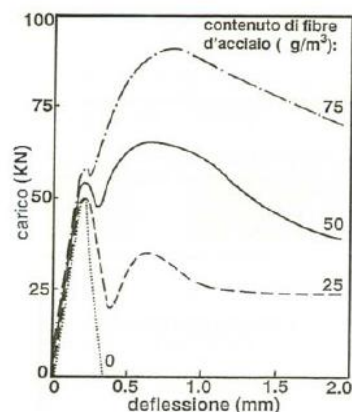


Rottura provini ,SENZA FIBRE

Come si può notare da questi grafici per tutti i tipi di calcestruzzo, gli andamenti sono spiccatamente degradanti: una volta raggiunto il carico di prima fessurazione non si hanno più aumenti di carico. Tale comportamento degradante è anche spiegabile calcolando il volume critico di fibre necessario per avere comportamento plastico. L'aggiunta di fibre permette quindi un aumento della capacità portante come testimoniato dai grafici.

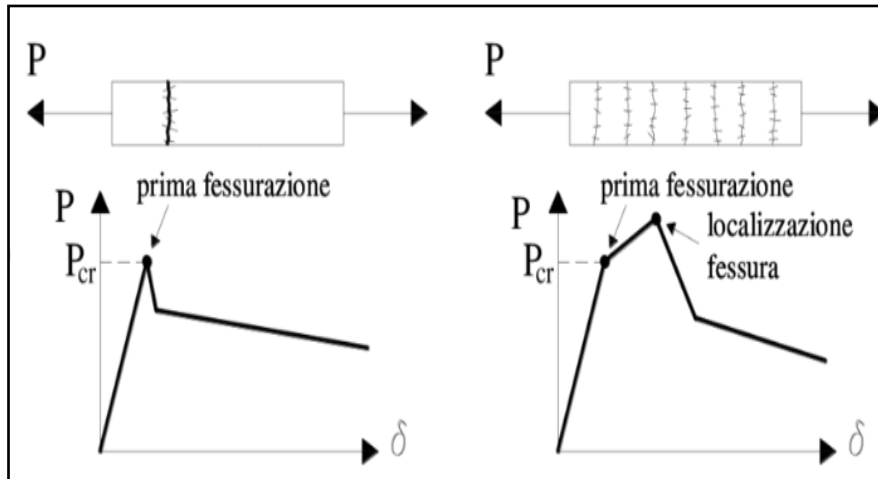
Un'altra importante capacità di questi calcestruzzi fibrorinforzati è quella di poter supportare elevate rotazioni in fase di post fessurazione, a vantaggio quindi della duttilità.

L'introduzione di fibre d'acciaio in un calcestruzzo lascia sostanzialmente invariata la tensione di prima fessurazione della matrice, ma consente di ottenere, all'aumentare della percentuale di fibre, una resistenza a flessione superiore al valore corrispondente del calcestruzzo senza fibre. Questo comportamento può essere schematizzato nella figura :

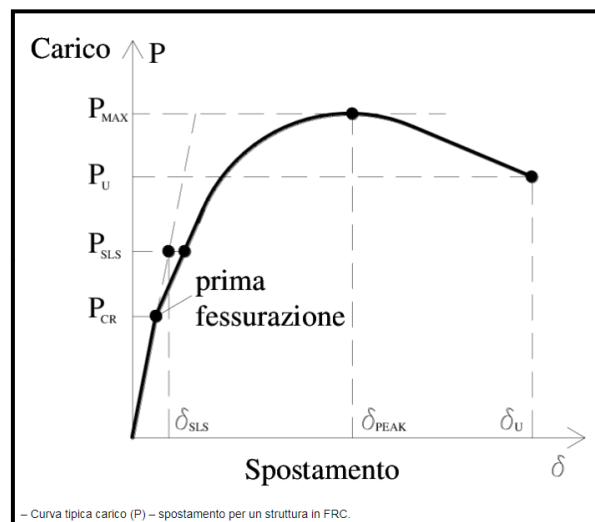


Curve carico deflessione per prove di flessione al variare del contenuto di fibre. [M. Collepari, L. Coppola, 1990]

Il vantaggio principale che si consegue con l'aggiunta di fibre, è quello di trasformare un materiale con comportamento spiccatamente fragile in un materiale con doti di duttilità maggiori, capace di assorbire notevoli quantità di energia nella fase che segue la fessurazione della matrice cementizia.



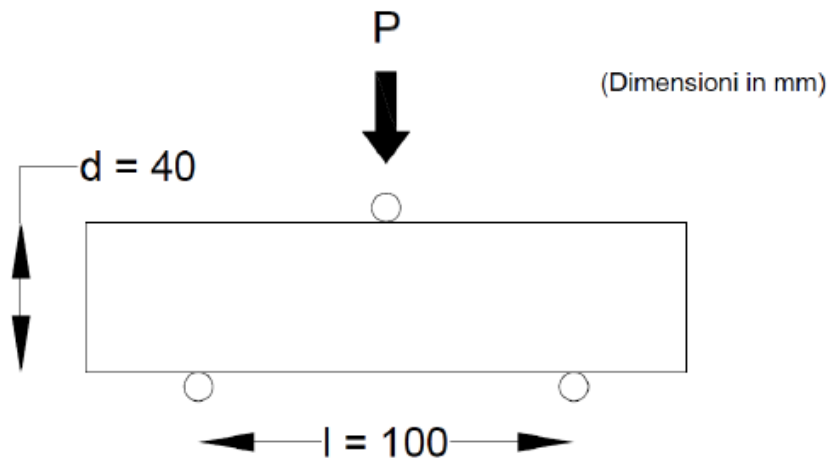
Nelle prove a flessione, la fessurazione inizia prima del raggiungimento del carico di picco e può accadere che materiali degradanti in trazione uniassiale mostrino una propagazione stabile della fessura all'aumentare del carico (comportamento incrudente a flessione).



4.4 PROVINI 40X40X160 mm

La resistenza a flessione è stata valutata sui provini prismatici di dimensioni 40x40x160 mm.

Le prove a flessione sono state eseguite su ognuno dei tre provini, portati a rottura applicando il carico su tre punti.



Il valore della resistenza a flessione F , è stato calcolato con la seguente formula:

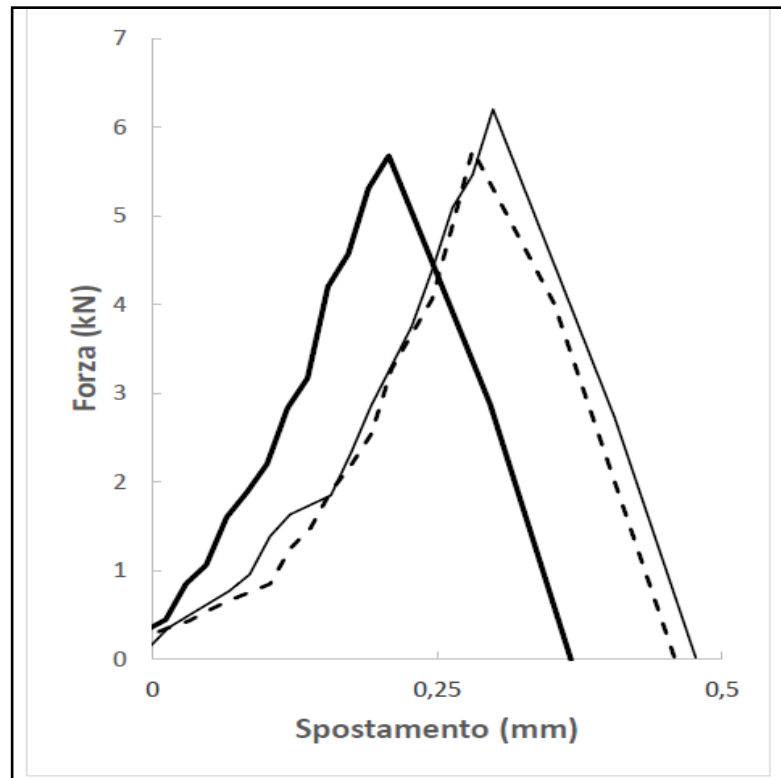
$$F = \frac{3}{2} \frac{f l L}{b d^2}$$

dove f è il valore del carico massimo applicato (in N), b e d sono rispettivamente i valori (in mm) di larghezza e altezza del provino (pari a 40 mm entrambi nel caso specifico) e con l si indica la distanza (in mm) tra gli assi dei supporti (pari a 100 mm nel caso specifico).

Di seguito si riportano le curve forza F -spostamento s derivanti dai risultati delle prove a flessione su tre punti eseguite sui provini 40x40x160 mm.

PROVINO SENZA FIBRE

GETTO 1	
Componenti	Kg/m ³
Cemento 52.5R	1000
Fumo Silice	125
acqua	200
superfluidificante	11
sabbia fonderia 0/02	400
Sabbia Po	600
Fibre uncinata	0
antibolle	3



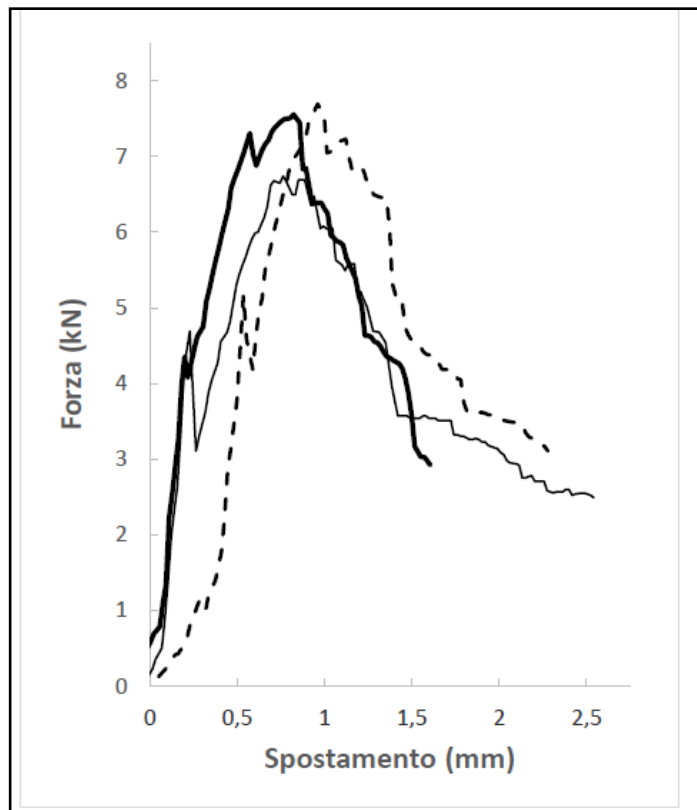
RISULTATI PROVA A FLESSIONE

CAMPIONE	FORZA MAX (KN)	SPOSTAMENTO s (mm)	RESISTENZA A FLESSIONE fmax (MPa)
A —	5,68	0,21	13,31
B ----	5,74	0,28	13,31
C —	6,20	0,30	14,45
MEDIA	5,87	0,26	13,76



Rottura provino, senza fibre

GETTO 2	
Componenti	Kg/m³
Cemento 52.5R	1000
Fumo Silice	125
acqua	(totale 580)
superfluidificante	11
sabbia fonderia 0/02	400
Sabbia Po	600
Fibre uncinata	50
antibolle	3



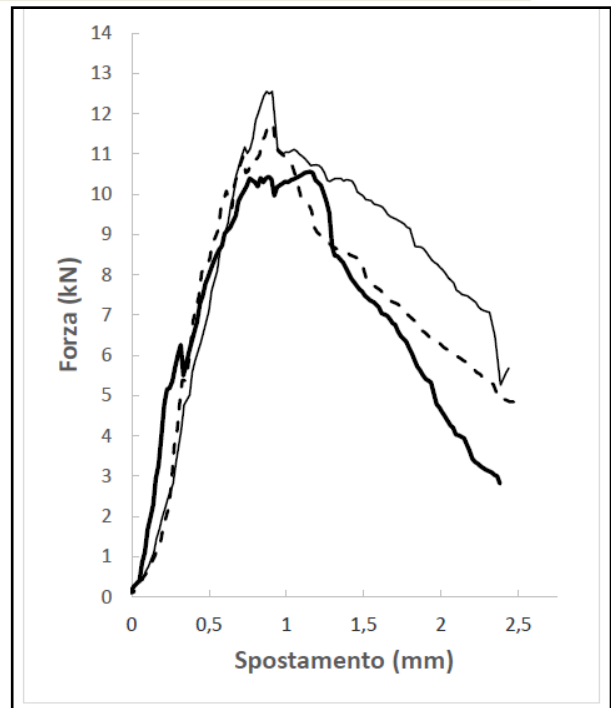
RISULTATI PROVA A FLESSIONE

CAMPIONE	FORZA MAX (KN)	SPOSTAMENTO s (mm)	RESISTENZA A FLESSIONE fmax (MPa)
A-50 —	7,55	0,82	17,70
B-50 ----	7,69	0,96	18,03
C-50 —·—	6,74	0,76	15,79
MEDIA	7,33	0,85	17,18



Rottura provino, contenuto di fibre 50

GETTO 3	
Componenti	Kg/m³
Cemento 52.5R	1000
Fumo Silice	125
acqua	(totale 560)
superfluidificante	11
sabbia fonderia 0/02	400
Sabbia Po	600
Fibre uncinata	100
antibolle	3



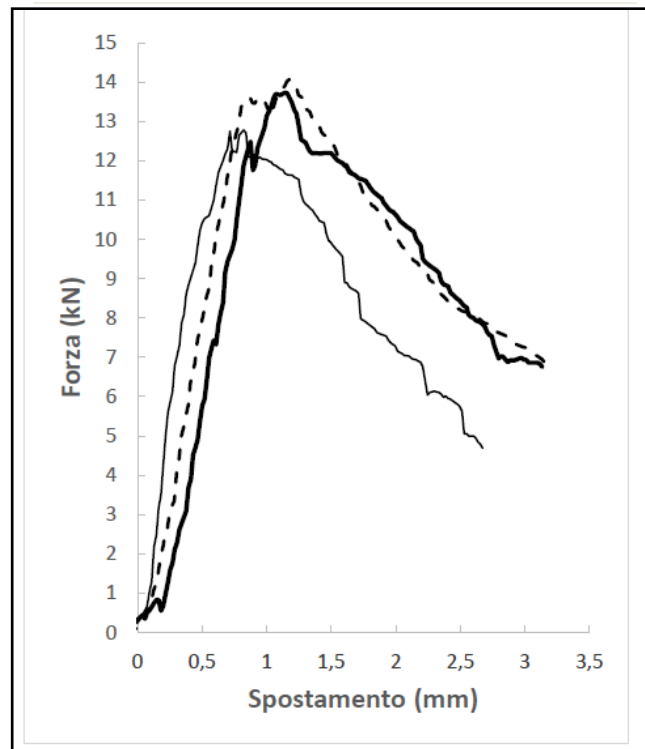
RISULTATI PROVA A FLESSIONE

CAMPIONE	FORZA MAX (KN)	SPOSTAMENTO s (mm)	RESISTENZA A FLESSIONE fmax (MPa)
A-100 —	10,56	1,15	24,75
B-100 ----	11,75	0,90	27,55
C-100 -.-	12,55	0,91	29,42
MEDIA	11,62	0,99	27,24



Rottura provino, Contenuto di fibre 100

GETTO 4	
Componenti	Kg/m³
Cemento 52.5R	1000
Fumo Silice	125
acqua	200
superfluidificante	11
sabbia fonderia 0/02	400
Sabbia Po	600
Fibre uncinata	150
antibolle	3



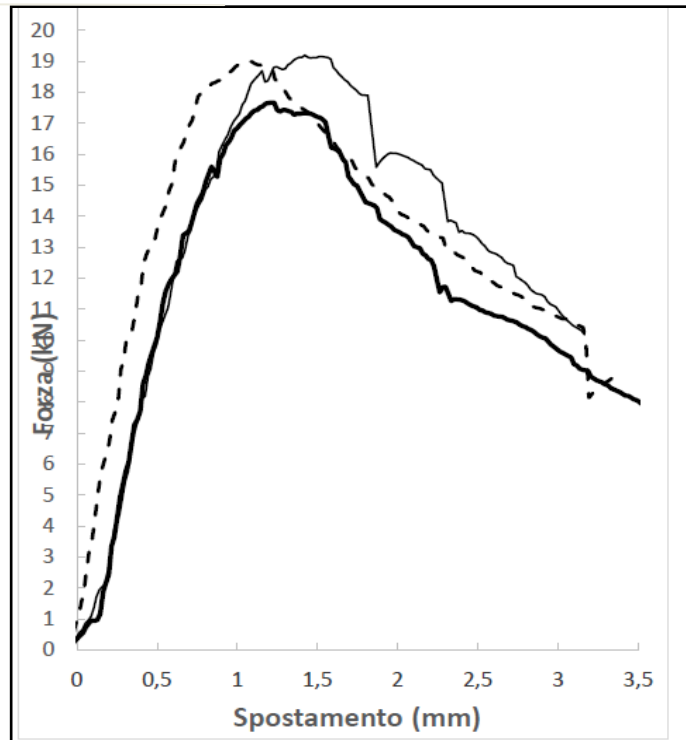
RISULTATI PROVA A FLESSIONE

CAMPIONE	FORZA MAX (KN)	SPOSTAMENTO s (mm)	RESISTENZA A FLESSIONE fmax (MPa)
A-150 —	13,73	1,14	32,18
B-150 ----	14,07	1,18	32,97
C-150 —·—	12,78	0,82	29,96
MEDIA	13,53	1,05	31,70



Rottura provino, Contenuto di fibre 150

GETTO 5	
Componenti	Kg/m³
Cemento 52.5R	1000
Fumo Silice	125
acqua	200
superfluidificante	11
sabbia fonderia 0/02	400
Sabbia Po	600
Fibre uncinata	200
antibolle	3



RISULTATI PROVA A FLESSIONE

CAMPIONE	FORZA MAX (KN)	SPOSTAMENTO s (mm)	RESISTENZA A FLESSIONE fmax (MPa)
A-200 —	17,67	1,23	41,41
B-200 ----	19,00	1,08	44,53
C-200 —·—	19,20	1,42	44,99
MEDIA	18,62	1,24	43,64



Rottura provino, Contenuto di fibre 200

4- 5 RISULTATI MEDI DEI TEST A FLESSIONE: 70X70X280mm

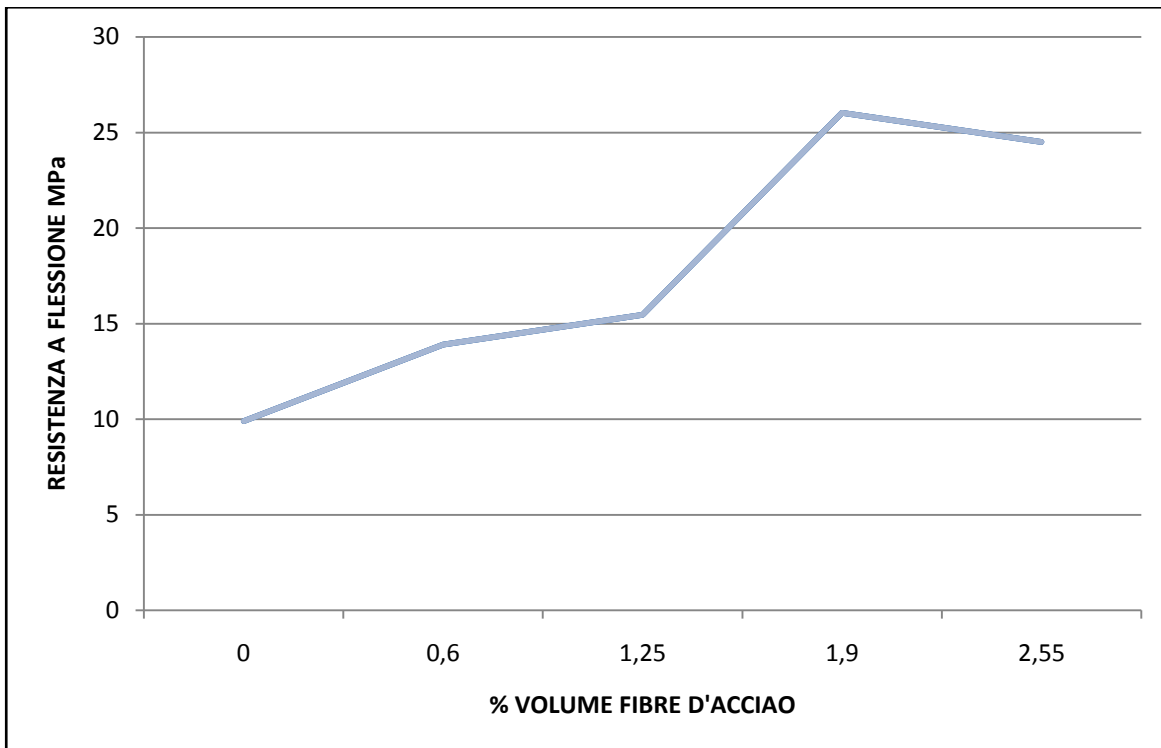
CAMPIONE	CARICO MAX A FLESSIONE	SPOSTAMENTO	RESISTENZA
	Fmax [KN]	S[mm]	σ_{max} (MPa)
200	23,84	0,96	24,50
150	24,80	1,32	26,03
100	14,73	0,52	15,46
50	13,29	0,65	13,90
0	9,65	0,025	9,89

Aumentando il dosaggio di fibre, si ha un aumento della resistenza a flessione rispetto ai provini senza fibre. Già con un dosaggio minimo di fibre, pari allo 0,6% in volume (PROVINO- 50) la resistenza a flessione è aumentata di circa il 40% rispetto a quella dei provini senza fibre. Con un dosaggio pari al 1,9% e 2,55 % (PROVINO-150 e PROVINO-200) la resistenza a flessione è aumentata del 150% raggiungendo 24,50 MPa.

CONTENUTO DELLE FIBRE IN % :

PROVINO	200	150	100	50	0
FIBRE IN Vol. %	2,55	1,90	1,25	0,60	0

RESISTENZA A FLESSIONE 70x70x280mm



4- 5-1 RISULTATI MEDI DEI TEST A FLESSIONE: 40X40X160mm

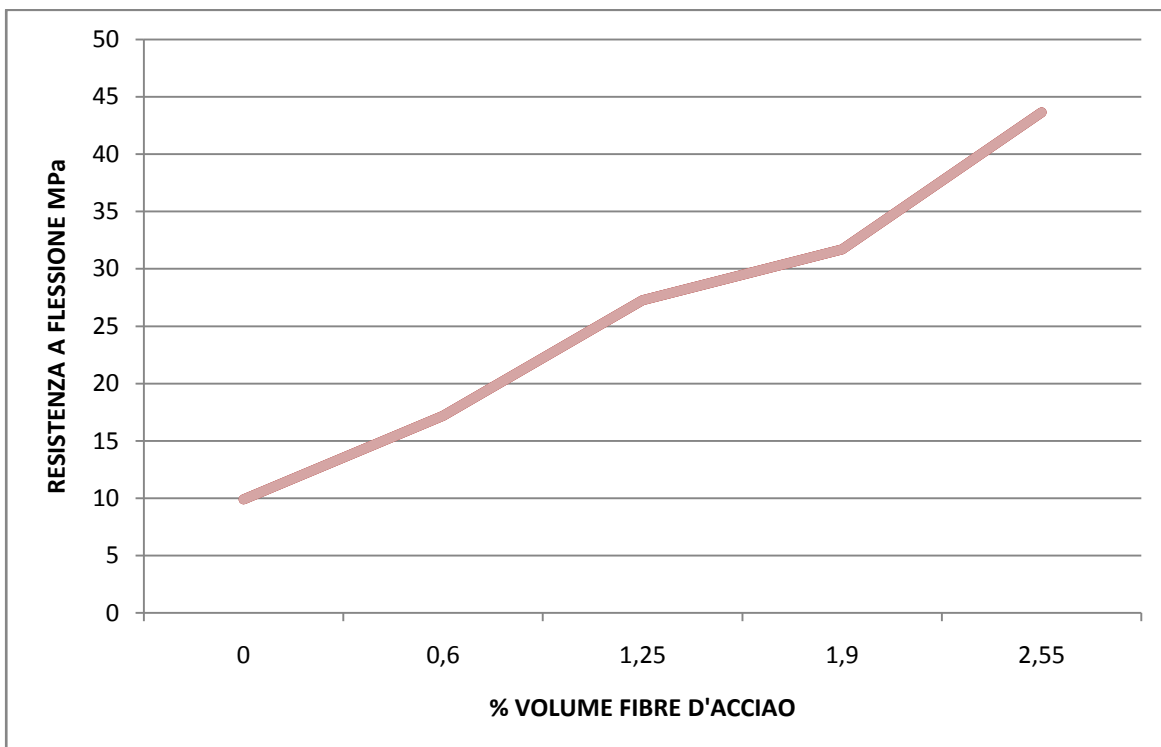
CAMPIONE	CARICO MAX A FLESSIONE	SPOSTAMENTO	RESISTENZA
	Fmax [KN]	S[mm]	σ_{max} (MPa)
200	18,62	1,24	43,64
150	13,53	1,05	31,70
100	11,62	0,99	27,24
50	7,33	0,85	17,18
0	5,87	0,26	13,76

CONTENUTO DELLE FIBRE IN % :

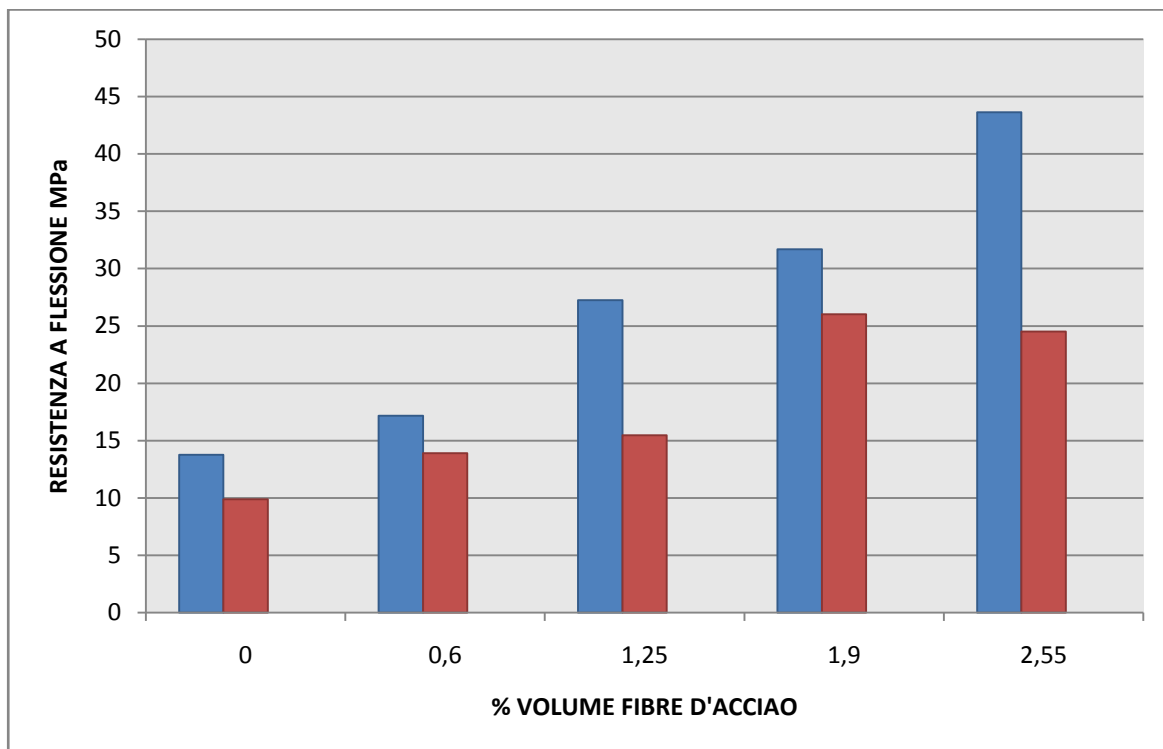
PROVINO	200	150	100	50	0
---------	-----	-----	-----	----	---

FIBRE IN Vol. %	2,55	1,90	1,25	0,60	0
-----------------	------	------	------	------	---

Come atteso, l'aggiunta di fibre d'acciaio modifica significativamente il massimo valore di resistenza a flessione per i diversi provini. L'introduzione di fibre, ha comportato un importante incremento della resistenza a flessione rispetto ai provini senza fibre fino ad arrivare ad un aumento del 218 % nei provini-200 (2,55% volume di fibre), raggiungendo valori di circa 43,64 MPa.



4-5-2 DISCUSSIONE DEI DUE RISULTATI OTTENUTI:



■ PROVINO 40X40X160mm

■ PROVINO 70X70X280mm

Come mostrato dal grafico, a parità di dosaggio di fibre nei due provini, la resistenza a flessione del provino 40x40x160mm è maggiore rispetto al provino 70x70x280mm, questo perché una sezione ridotta, ha permesso l'allineamento delle fibre lungo l'asse longitudinale del provino.

I risultati ottenuti sperimentalmente, hanno in parte confermato le prestazioni attese, soprattutto in termini di aumento della duttilità e tenacità dei conglomerati fibrorinforzati rispetto a quelli ordinari.

4-5-3 LA DUTTILITA':

La duttilità è una proprietà fisica della materia che indica la capacità di un corpo o di un materiale di deformarsi sotto carico prima di giungere a rottura, ovvero la capacità di sopportare deformazioni plastiche. Un corpo è tanto più duttile quanto maggiore è la deformazione raggiunta prima della rottura.

Le fibre, modificano sensibilmente il comportamento post-fessurativo del sistema. L'aggiunta di fibre aumenta la duttilità del calcestruzzo intesa come rapporto tra la deformazione ultima e quella cui corrisponde l'insorgere della prima lesione. Un'altra caratteristica connessa alla precedente è la tenacità, cioè l'energia di frattura che indica il lavoro che è necessario spendere per deformare il materiale fino al collasso.

L'aggiunta di fibre permette quindi un aumento della capacità portante come testimoniato dai grafici, ma soprattutto permette di aumentare molto nella fase post fessurativa le deformazioni rispetto al calcestruzzo ordinario.

Un'altra importante capacità di questi calcestruzzi fibrorinforzati è quella di poter sopportare elevate rotazioni in fase di post fessurazione, a vantaggio quindi della duttilità.

Il vantaggio principale che si consegue con l'aggiunta di fibre, è quello di trasformare un materiale con comportamento spiccatamente fragile in un materiale con doti di duttilità maggiori, capace di assorbire notevoli quantità di energia nella fase che segue la fessurazione della matrice cementizia. Il valore di duttilità può essere messo in relazione al contenuto di fibre

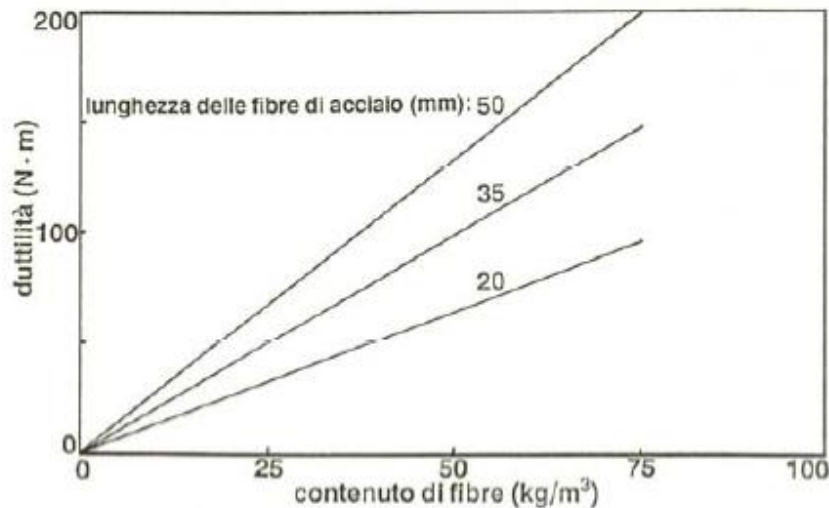


Figura 2.24. Relazione tra duttilità e il contenuto di fibre. [M. Collepari, L. Coppola, 1990]

4-6 RISULTATI DELLA PROVA:

La prova quindi più significativa per un provino di calcestruzzo fibrorinforzato è proprio quella a flessione.

I risultati di questa prova permettono la caratterizzazione della tenacità del materiale attraverso uno o più dei seguenti parametri: assorbimento di energia, indici correlati alla capacità di assorbire energia, resistenza equivalente a flessione e altri parametri che descrivono il comportamento post-fessurativo.

L'aggiunta di fibre metalliche incrementa la duttilità e la tenacità del calcestruzzo, conferendogli una maggior capacità resistente in fase plastica.

Le fibre vengono aggiunte alla matrice cementizia non tanto per migliorare la tensione di prima fessurazione quanto per migliorare il comportamento post-fessurativo del composito.

L'obiettivo della prova è quello di valutare il contributo delle fibre come rinforzo strutturale della sezione fessurata. Nei grafici precedenti sono riportate le curve forza-deflessione per i provini sottoposti a prova di flessione su tre punti. Le curve dimostrano che l'aggiunta di fibre consentono comportamenti post-fessurativi del calcestruzzo fibrorinforzato diversi, in funzione della quantità di fibre aggiunte. Il risultato principale è un recupero di resistenza dopo la fessurazione che conferisce al calcestruzzo fibrorinforzato una maggiore duttilità rispetto ad un calcestruzzo

ordinario, al contrario fragile, e la capacità di assorbire maggiore energia che si traduce in una maggiore tenacità del calcestruzzo FRC.

I dati acquisiti durante la prova di flessione su tre punti, effettuata sui provini prismatici, hanno permesso di determinare i grafici carico-deformazione (load-deflection), mediante i quali si sono ricavati i valori del carico massimo P_{max} e la corrispondente freccia δ_p , nella mezzeria del provino. Lo schema di carico rappresentativo della prova di flessione e il corrispondente grafico ($P-\delta$) viene mostrato in figura 5.1.

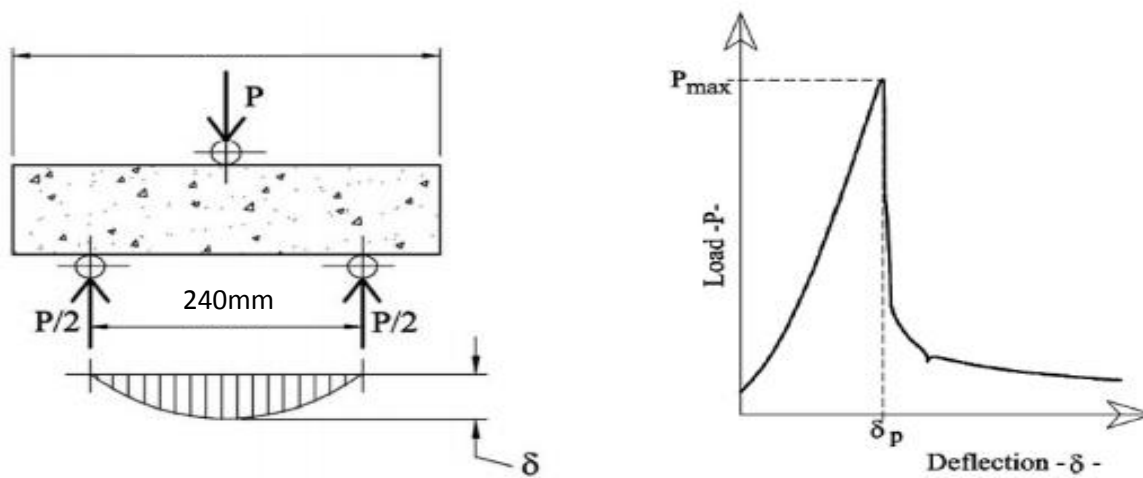


Figura 5.1 - Schema di carico della prova di flessione (sx) e grafico carico-deformazione ($P-\delta$), tratto da (Fantilli, 2017) [36]

La curva carico-deformazione ($P-\delta$) delle malte cementizie fibrorinforzate in esame, mostra un andamento degradante, vale a dire che presenta un tratto crescente fino al raggiungimento del carico massimo, definito anche limite di proporzionalità, in cui si ha la formazione della fessura critica; superato tale valore, la resistenza diminuisce progressivamente e la curva di post-fessurazione presenta un andamento discendente (deflection softening).

CAPITOLO 5

5.1 CONFRONTO DEI CALCESTRUZZI FIBRORINFORZATO CON LE NORMATIVE SEGUENTI:

- ASTM C1018 - 97 normativa americana;
 - UNI EN 11039 - 2003
 - UNI EN 14651 normativa italiana;
 - RILEM TC 162 - TDF normativa comunitaria.
- PROVE IN LABORATORIO UNIVPM

NORMATIVA	MISURE PROVINO	PARAMETRO CORRELATO	CURVA DI 1° FESSURAZIONE
ASTM C1018 - 97 normativa americana	350mmx100mmx100mm (4 PUNTI SENZA INTAGLIO)	TENACITA'	> TENACITA' > RESISTENZA RESIDUA
UNI 11039 - 2003	150mmx150mmx600mm (4 PUNTI CON INTAGLIO)	RESISTENZA E DUTTILITA'	> RESISTENZA > DUTTILITA'
UNI 14651 normativa italiana	550mmx150mmx15mm (3 PUNTI CON INTAGLIO)	RESISTENZA	> RESISTENZA RESIDUA
RILEM TC 162 - TDF Normativa comunitaria	600mmx150mmx150mm (3 PUNTI CON INTAGLIO)	LIMITE DI PROPORZIONALITA'	>DUTTILITA'
PROVE IN LABORATORIO UNIVPM	280mmx70mmx70mm 160mmx40mmx40mm (3 PUNTI SENZA INTAGLIO)	RESISTENZA	> DUTTILITA'

CAPITOLO 6

6-1 CONCLUSIONI DELLA PROVA:

Le fibre entrano in gioco solo dopo la prima fessurazione del calcestruzzo.

Tutti i provini avevano stessa composizione ma contenuti di fibre diversi.

I risultati ottenuti dalla prova:

- aumento della duttilità
- aumento della tenacità dei conglomerati fibrorinforzati rispetto a quelli ordinari.

L'aggiunta di fibre nella matrice cementizia ha comportato un importante aumento della resistenza a flessione.

Aumentando il dosaggio di fibre fino ad un contenuto pari al 2,55 % in volume della miscela, con lo stesso contenuto di fibre, si è registrato addirittura un incremento del 200% della resistenza a flessione rispetto a quella ottenuta dagli UHPC senza rinforzo. L'inclusione di fibre ha modificato significativamente il comportamento dei provini UHPFRC.

Anche con il minimo dosaggio di fibre (0,6 % in volume), il materiale non ha esibito un comportamento a rottura di tipo fragile.

OBIETTIVO DEL LAVORO:

L'obiettivo del lavoro è stato quello di osservare il comportamento, in termini di prestazioni meccaniche, del calcestruzzo fibrorinforzato non armato, ma con l'inclusione di fibre e vedere come varia il comportamento post-fessurativo del provino non seguendo i parametri della normativa.

UTILIZZO OGGI DEI CALCESTRUZZI FIBRORINFORZATI:

Attualmente i calcestruzzi rinforzati con fibre sia in parziale che totale sostituzione dell'armatura tradizionale sono utilizzati per la realizzazione di pavimentazioni industriali in calcestruzzo, parcheggi, elementi prefabbricati (strutturali e non) e rivestimenti di gallerie.

Negli ultimi anni, in Italia vi è stata una rapida diffusione nell'utilizzo dei calcestruzzi fibrorinforzati soprattutto nel settore delle pavimentazioni e dei rivestimenti per galleria (sia realizzati con calcestruzzo proiettato che gettato entro cassero). La diffusione del calcestruzzo fibrorinforzato è da attribuire, non solo ai vantaggi in termini strutturali, alla riduzione di ampiezza delle fessure e di conseguenza all'aumento della durabilità, alla maggiore resistenza a fatica e ai carichi impulsivi, ma anche alla maggiore facilità di esecuzione dei manufatti e degli elementi costruttivi rispetto alla tradizionale tecnologia di realizzazione basata sull'impiego di barre di

armatura e/o di reti elettrosaldate. Basti pensare, ad esempio, alle fasi di realizzazione di una pavimentazione industriale in cui le maestranze, dopo aver pulito il piano di posa, devono disporre i distanziatori, la rete elettrosaldata e gettare il calcestruzzo in condizioni di precario equilibrio dovendo camminare sulla rete d'armatura. Per contro, ricorrendo all'impiego del calcestruzzo fibrorinforzato, la realizzazione del pavimento risulta molto più agevole in quanto, dopo aver preparato i piani di posa e aver steso la barriera vapore si può procedere al getto senza alcuna ulteriore lavorazione aggiuntiva. Allo stesso modo, la realizzazione di un rivestimento in galleria con calcestruzzo fibrorinforzato consente di eliminare le operazioni lunghe e complicate di fissaggio della rete elettrosaldata alla parete di scavo.

La progettazione strutturale di elementi in calcestruzzo rinforzato con fibre può essere effettuata ricorrendo alle raccomandazioni emanate dalla *FIB (Fédération International du Béton)* che ha recentemente emanato la versione finale del *Model Code 2010* in cui sono state inserite due nuove sezioni sui calcestruzzi rinforzati con le fibre (materiali e comportamento strutturale). Inoltre, per quanto concerne l'Italia, è disponibile anche un documento *CNR-DT 204* in cui si riportano le istruzioni per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di strutture di calcestruzzo fibrorinforzato.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI:

- CNR-DT 204/2006. (18 Giugno 2007 - rev. 4 Febbraio 2008). *Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Strutture di Calcestruzzo Fibrorinforzato*. Roma.
- CNR-DT 209/2013. (10 Ottobre 2013). *Istruzioni per l'impiego di calcestruzzi ad alte prestazioni*. Roma.
- COIN Project report no 44. (2012). *Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPRFC) - State of the art*.
- Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, S. T. (Gennaio 2019). *Linee guida per l'identificazione, la qualificazione, la certificazione di valutazione tecnica ed il controllo di accettazione dei calcestruzzi fibrorinforzati FRC (Fiber Reinforced Concrete)*.
- Collepardi Collepardi M., *Scienza e tecnologia del calcestruzzo*, Hoepli, 1991.
- Documento tecnico ASTM C 1018-97, *Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete*, 1997.
- Documento tecnico ASTM C 1116-03, *Standard Specification For Fiber-Reinforced Concrete And Shotcrete*
- Documento tecnico RILEM TC 162-TDF, *Test and design methods for steel fibre reinforced concrete: Bending test, Final recommendation*, Materials and Structures, 2002.
- Documento tecnico UNI 11039-1, *Calcestruzzo rinforzato con fibre di acciaio: Definizioni, classificazione e designazione*, 2003.
- Documento tecnico UNI 11039-2, *Calcestruzzo rinforzato con fibre di acciaio: Metodo di prova per la determinazione della resistenza di prima fessurazione e degli indici di duttilità*, 2003.
- *EN-14651: 2005 Norma europea, status norma nazionale italiana*.

- Rossi L., *Calcestruzzi Fibrorinforzati con fibre non metalliche*, Tesi di Laurea, 2005.
- Leone M. F. (2009), *Innovazione tecnologica e materiali avanzati. Alte prestazioni ed eco-efficienza: nanotecnologie per l'evoluzione dei materiali cementizi*, Tesi di dottorato in Tecnologia dell'Architettura, XXI ciclo, Università degli Studi di Napoli "Federico II".
- Naaman A.E., R. H. (2003). Setting the stage: toward performance classification of FRC composites.
- UNI 11039-1. (2003). Calcestruzzo rinforzato con fibre di acciaio - Definizioni, classificazione e designazione.
- UNI 8520-1. (2015). Aggregati per calcestruzzo - Istruzioni complementari per l'applicazione della EN 12620 - Parte 1: Designazione e criteri di conformità.
- UNI 8520-2. (2016). Aggregati per calcestruzzo - Istruzioni complementari per l'applicazione della EN 12620
- UNI U73041440 - Progettazione, esecuzione e controllo degli elementi strutturali in calcestruzzo rinforzato con fibre d'acciaio

RINGRAZIAMENTI:

Ringrazio prima di tutto te, Simone, senza te non sarei riuscita a raggiungere questo traguardo.

Ringrazio la mia famiglia, i miei genitori, che ci sono stati sempre, in tutto e per tutto.

Ringrazio tutti i miei amici, Serena, mio fratello e Chiara, i miei suoceri ... Tutti, che mi siete stati vicini in questo percorso, donandomi sostegno e affetto.

Il ringraziamento più importante va a te, che sei la mia vita, NICCOLO'.

Ti dedico il mio traguardo .

Grazie a tutti.

Claudia Didu