

## Capitolo 4

### I Calcestruzzi Fibrorinforzati

#### 4.1 INTRODUZIONE

Fin dalla metà dell'800 l'introduzione delle barre d'acciaio nei calcestruzzi ha rappresentato un valido mezzo per ovviare ai problemi dovuti alla fragilità del calcestruzzo, rendendolo in tal modo più idoneo a sopportare tensioni dovute alla trazione. Se da un lato questa tecnica ha contribuito a ridurre i problemi di fessurazione da trazione, dall'altro ha favorito la nascita di gravi inconvenienti dati dal fenomeno della corrosione dell'acciaio dovuta alla presenza degli ioni cloruro. Infatti le costruzioni civili in calcestruzzo rinforzato risentono generalmente degli effetti della corrosione dell'acciaio, oltre che del fenomeno della formazione delle fessure che provocano la frattura delle strutture stesse. Per quanto le caratteristiche dell'acciaio possano risultare eccezionali, è importante evidenziare che, oltre ad essere soggetto alla corrosione, esso deve essere utilizzato a temperature relativamente basse ed, inoltre, l'aggiunta delle barre di rinforzo non contribuisce a creare un materiale con proprietà a trazione omogenee.

La formazione delle fessure, di natura altamente non-lineare, che regola il comportamento delle strutture in calcestruzzo e ne riduce notevolmente la sicurezza e la durabilità, ha reso necessario l'impiego di alcune particolari tipologie di materiali da rinforzo dando origine ad una nuova tecnica che è quella del calcestruzzo fibrorinforzato dall'inglese FIBER REINFORCED CONCRETE o FRC. Questa nuova tecnica consiste nell'aggiungere, al materiale calcestruzzo, fibre di diversa natura e aventi differenti caratteristiche che vanno a mescolarsi con esso o ad aderire perfettamente ad esso; in tal modo è possibile aumentare la tenacità e la resistenza a trazione e migliorare le caratteristiche di deformazione del materiale composito risultante.

L'aggiunta di fibre, dello stesso tipo o di natura differente (composito ibrido), contribuisce ad aumentare le caratteristiche di resistenza meccanica (aumento della resistenza a trazione), di stabilità del composito e favorisce la realizzazione di un materiale il più possibile isotropo.

Le fibre possono essere corte o lunghe, continue o discontinue e possono essere orientate in una o in più direzioni ; quelle maggiormente diffuse sono le corte che, rispetto a quelle lunghe, possono essere aggiunte più facilmente alla miscela fresca di calcestruzzo. Le fibre lunghe vengono generalmente incorporate alla matrice sotto forma di filamenti serpeggianti o di strati uniti con adesivi. I monofilamenti di fibre sono stati impiegati comunemente nel calcestruzzo strutturale per aumentarne la duttilità, la tenacità e la resistenza attraverso l'interazione fibra-matrice.

Il vantaggio delle fibre corte è dato dalla loro facilità di estrazione dalla matrice, garantendo in tal modo una elevata duttilità contrariamente a quanto accade nel caso dei compositi a fibre lunghe che arrivano a frattura per rottura delle fibre (fenomeni di delaminazione).

I materiali compositi costituiti da fibre corte orientate nelle varie direzioni possono resistere a tutti i possibili carichi. La presenza di fibre corte genera un moderato aumento nel modulo di elasticità. Comunque la tipologia di fibre impiegate dipende dalla rigidità o resistenza richieste .

Studi sui materiali compositi hanno dimostrato che l'aggiunta di fibre alla miscela di calcestruzzo può migliorare, in modo significativo, la resistenza ultima, le caratteristiche di fessurazione ed il comportamento deformativo di elementi strutturali soggetti a stati combinati di tensione e di deformazione. Le fibre consentono di sopportare localmente carichi o deformazioni elevate e, pertanto, vengono utilizzate per il rinforzo dei pali di fondazione prefabbricati, dei ponti prefabbricati, di strutture resistenti alle esplosioni o di tubazioni e rivestimenti della fognatura .

I calcestruzzi fibrorinforzati offrono dei vantaggi rispetto ai materiali convenzionali isotropi come l'acciaio, l'alluminio ed altri tipi di metalli quali l'alta resistenza, la leggerezza, ed una buona resistenza a fatica ed alla corrosione. Inoltre è possibile, cambiando la disposizione delle fibre, modificare le proprietà del materiale adattandole alle esigenze di un progetto specifico. La presenza delle fibre, infatti, consente oltre

che di limitare la profondità della fessura di distribuirle in una certa area migliorandone il meccanismo di trasferimento delle tensioni nella zona fessurata.

Nell' FRC, infatti, centinaia di piccole fibre sono disperse e distribuite casualmente all'interno della matrice migliorando, in tal modo, le proprietà in tutte le direzioni.

La presenza delle fibre aiuta a migliorare la duttilità post picco, la resistenza a trazione di pre-fessurazione, la resistenza a fatica ed elimina le fessure da ritiro e temperatura.

Diverse tipologie di fibre sono state incorporate nel calcestruzzo; l'uso di fibre naturali precede, nel contesto storico, l'avvento del convenzionale calcestruzzo rinforzato (calcestruzzo rinforzato con barre d'acciaio).

I comportamenti meccanici e termici di una struttura dipendono dalle proprietà delle fibre e della matrice e dalla quantità e dall'orientazione delle fibre stesse.

I compositi sono materiali altamente eterogenei con proprietà che variano da un punto all'altro, però, in genere, soprattutto nel caso di materiali aventi dimensioni rilevanti rispetto al diametro delle fibre stesse, possono essere assunti dei valori medi ed il materiale può essere considerato come omogeneo; ciò significa che le proprietà del materiale che sono una combinazione delle proprietà dei costituenti, vengono prese uguali in ogni punto. Le buone proprietà dei compositi vengono ottenute grazie alle favorevoli caratteristiche dei due costituenti cioè le fibre e la matrice.

Nei compositi a basse prestazioni il rinforzo, costituito generalmente da fibre corte, fornisce dei parametri di resistenza non molto elevati ed il carico è generalmente sopportato dalla matrice.

Nei compositi ad alte prestazioni, invece, le fibre continue forniscono la rigidità e la resistenza desiderate, mentre la matrice assolve il compito di sostenere le fibre e, soprattutto, aiuta a ridistribuire il carico dalle fibre rotte a quelle adiacenti integre.

## 4.2 EVOLUZIONE STORICA DEI CALCESTRUZZI FIBRORINFORZATI

Come già accennato, il calcestruzzo fibro-rinforzato risulta essere costituito da una matrice di calcestruzzo additivata con fibre di vario tipo che possono essere realizzate in acciaio, in materiale polimerico, in materiale inorganico (vetro o carbonio), o con elementi naturali, ai quali è possibile aggiungere in opera delle barre di armatura. La nascita dei materiali compositi ha segnato l'avvento di una nuova era nel campo delle costruzioni civili.

Mentre prima si costruiva utilizzando materiali presenti in natura o facilmente producibili, oggi è possibile realizzare le strutture producendo il materiale che più degli altri si adatta all'opera da realizzare, ed affidando la stabilità dell'opera non tanto al peso ed alla massa quanto alle caratteristiche prestazionali dei materiali costituenti la struttura. E' possibile, infatti, affidare alle caratteristiche eterogenee dei materiali opportunamente combinati la capacità della struttura di rispondere a specifiche caratteristiche di durabilità durante la vita di esercizio.

Le fibre forniscono un efficace rinforzo secondario per il controllo del ritiro e della profondità delle fessure; esse, infatti, assolvono il compito di ridurre le fessure in quanto contrastano il ritiro del calcestruzzo agendo come elemento di collegamento tra una fessura ed un'altra e resistendo alla contrazione del calcestruzzo per opera della resistenza allo sfilamento.

L'utilizzo di elementi di rinforzo risale all'antichità, quando le fibre venivano utilizzate nelle costruzioni per ridurre la fragilità dei materiali.

Sin dall'epoca degli Egizi, infatti, la paglia veniva utilizzata per rinforzare i mattoni cotti al sole e successivamente anche i Romani usavano il crine dei cavalli nelle malte e negli intonaci.

Successivamente, all'incirca intorno al 1898 è stato introdotto l'uso delle fibre di amianto in svariate applicazioni edilizie ed industriali. Il cemento amianto è un materiale composito costituito da cemento e fibre d'amianto la cui struttura fibrosa gli ha conferito insieme una notevole resistenza meccanica ed un'alta flessibilità. Sin dall'antichità l'amianto è stato usato per scopi "magici" e "rituali": i Persiani ed anche i

Romani, infatti, disponevano di manufatti in amianto per avvolgere i cadaveri da cremare, allo scopo di ottenere ceneri più pure e chiare. Per anni, in epoca recente è stato considerato un materiale estremamente versatile a basso costo. L'amianto è un materiale naturale di natura fibrosa che è molto flessibile e resistente agli agenti chimici ed alla trazione .

Nonostante ciò la sua consistenza fibrosa, che è alla base delle proprietà tecnologiche, è risultata motivo di rischio essendo causa di gravi patologie a carico prevalentemente dell'apparato respiratorio originate dalla sua capacità di rilasciare fibre facilmente suddivisibili ed inalabili .

Per questo motivo le fibre di amianto sono state messe da parte e sono stati sviluppati altri tipi di fibre a partire dagli anni '60.

I tipi più comuni di fibre sono quelle d'acciaio e quelle polimeriche a causa del loro basso costo e della loro disponibilità. Nonostante ciò anche altri tipi di fibre vengono utilizzate per la realizzazione dei materiali compositi a seconda delle necessità nei differenti impieghi.

Attualmente le fibre utilizzate nelle costruzioni sono :

- NATURALI (NFRC: NATURAL FIBER REINFORCED CONCRETE)
- METALLICHE (SFRC : STEEL FIBER REINFORCED CONCRETE)
- SINTETICHE (SNFRC : SYNTHETIC FIBER REINFORCED CONCRETE).

L'importanza della presenza di fibre nel calcestruzzo fa riferimento da un lato all'aumento delle caratteristiche meccaniche quali resistenza a compressione e/o a flessione ma, principalmente alla capacità di controllare la fessurazione modificando il comportamento del materiale. Le fibre aumentano la resistenza alla frattura della matrice e, di conseguenza, la capacità portante e la duttilità degli elementi strutturali. Esse svolgono un'azione di richiusura che interessa le microfessure e le macrofessure presenti nella matrice. L'azione delle fibre rallenta, infatti, il processo di fessurazione del materiale rendendo il ramo di softening, che ne caratterizza la risposta meccanica, più dolce. Come già esposto in precedenza i calcestruzzi fibro-rinforzati sono costituiti da una matrice cementizia e da un' armatura fibrosa uniformemente diffusa .

In virtù di questa proprietà i calcestruzzi FRC rientrano nella categoria dei materiali

compositi perché sono costituiti da più di una fase : la fase matrice e quella fibrosa .

La realizzazione della matrice cementizia avviene secondo le modalità seguite per la produzione dei calcestruzzi semplici ed, inoltre, può essere costituita da malte o calcestruzzi normali o ad alte prestazioni. La prima, costituita da calcestruzzo, assolve il compito di dare una forma al materiale e di ripartire in modo uniforme le sollecitazioni tra le fibre vicine.

La seconda, invece, composta da fibre sottili e generalmente di dimensioni pressoché simili ha la funzione di dare una maggiore resistenza meccanica e, modificando il legame sforzo-deformazione, di incrementare la capacità del materiale di assorbire energia rallentando l'avanzamento del processo fessurativo. La tenacità è basata sull'energia totale assorbita prima della completa frattura.

Le principali proprietà che influenzano la tenacità ed il carico massimo del calcestruzzo fibrorinforzato sono basate sul tipo di fibra adoperato, sulla percentuale volumetrica delle fibre, sull'aspetto di forma e l'orientazione della matrice.

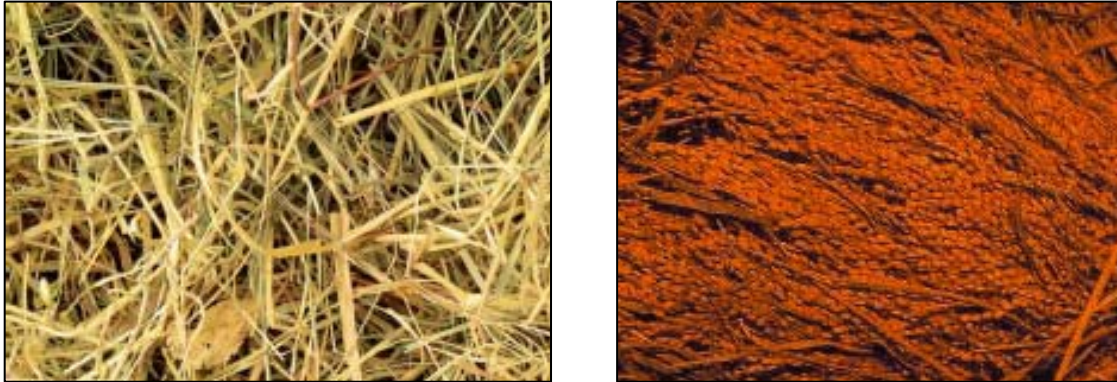
Gli altri fattori che controllano le prestazioni dei materiali compositi sono le proprietà fisiche del calcestruzzo rinforzato e della matrice, la resistenza del legame tra fibre e matrice.

Le proprietà chimiche delle fibre in termini della loro inerzia o reattività con l'ambiente circostante svolgono un ruolo fondamentale nel determinare le caratteristiche di legame delle fibre e del composito.

### **4.3 FIBRE NATURALI**

I materiali da rinforzo che impiegano fibre naturali rappresentano la forma più antica di materiali compositi; quest'ultimi, infatti, sono stati da sempre ottenuti, a basso costo, da materiali presenti in natura usando manodopera e tecnologia locale e con ridotti consumi di energia. In virtù di tali caratteristiche l'utilizzo delle fibre naturali come forma di rinforzo del calcestruzzo è di particolare interesse per le

regioni meno sviluppate dove i materiali da costruzione presentano dei costi elevati e richiedono, inoltre, l'impiego di manodopera specializzata a costi elevati.



**Figura 4.3** – Fibre di paglia; fibre di cocco.

#### **4.4 FIBRE METALLICHE**

Le fibre d'acciaio sono state utilizzate nel calcestruzzo a partire dai primi anni del '900. Esse sono state ampiamente utilizzate nelle applicazioni dell'ingegneria civile soprattutto a causa della loro immediata disponibilità e dei costi ragionevoli. Le prime fibre inizialmente impiegate erano tonde e regolari ed il filo veniva tagliato alla lunghezza richiesta. L'uso di fibre diritte e regolari è largamente scomparso e, oggi, le moderne fibre hanno sia superfici ruvide che estremità uncinata, arricciate o ondulate attraverso la loro lunghezza. Le fibre d'acciaio moderne disponibili in commercio vengono fabbricate da fili d'acciaio ricavati dalla lamiera d'acciaio tesa o tramite il processo di estrazione della fusione che produce fibre che hanno una sezione trasversale di forma crescente.

Generalmente le fibre d'acciaio hanno diametri equivalenti che variano da 0.15 a 2 mm e lunghezze da 7 a 75 mm. I rapporti di forma, definiti come il rapporto tra la lunghezza della fibra ed il suo diametro equivalente (diametro di un cerchio con un'area uguale all'area della sezione trasversale della fibra) variano da 20 a 100.

Le fibre d'acciaio vengono per la maggior parte prodotte con acciai al carbonio ma con

leghe resistenti alla corrosione mentre quelle d'acciaio inossidabile vengono impiegate per applicazioni ad alte temperature.

Molto spesso le fibre vengono riunite in fasci usando colle solubili in acqua allo scopo di facilitarne la miscelazione ed il maneggiamento ed inoltre i loro contenuti possono variare dallo 0.25% al 2.00% in volume.

Nei casi in cui il contenuto di fibre superi il 2,00% in volume il composito risulta essere poco lavorabile e le fibre non risultano essere ben distribuite; in questi casi è possibile ottenere dei risultati soddisfacenti solo aumentando il contenuto della miscela ed utilizzando degli aggregati aventi dimensioni non maggiori di 10mm.

I calcestruzzi rinforzati con le fibre d'acciaio hanno dimostrato di possedere, rispetto ai calcestruzzi semplici, una elevata tenacità, una migliorata resistenza all'impatto ed una maggiore duttilità della frattura a compressione, flessione e torsione.

L'elevata tenacità, definita come l'area al di sotto della curva carico-spostamento o tensione-deformazione, fa in modo che il calcestruzzo fibrorinforzato sia in grado di sopportare carichi con spostamenti o deformazioni molto più grandi di quelli che si avrebbero in corrispondenza della fessurazione della matrice e riduce la fessurazione dovuta ai cambiamenti di temperatura.



**Fig. 4.4.1** - Fibre ondulate





**Fig. 4.4.2** - Fibre ad estremità allargata



**Fig. 4.4.3** - Fibre d'acciaio a lamina deformata

Oggi le fibre in acciaio sono quelle più usate comunemente a causa della loro relativa disponibilità in commercio, dei costi ragionevoli e soprattutto delle ottime prestazioni nelle applicazioni ai calcestruzzi rinforzati con barre d'acciaio.

Uno degli inconvenienti di questa tipologia di fibre deriva dalla possibilità di essere soggette alla corrosione; questo svantaggio può, però, essere superato utilizzando un copriferro di calcestruzzo sulle fibre che sia maggiore di un millimetro.

L'importanza dell'aggiunta delle fibre d'acciaio risiede nella loro capacità di controllare la propagazione della fessura, di limitarne la profondità, di creare fessure ben distribuite in una certa area e di migliorare il meccanismo di trasferimento delle tensioni nella zona fessurata.

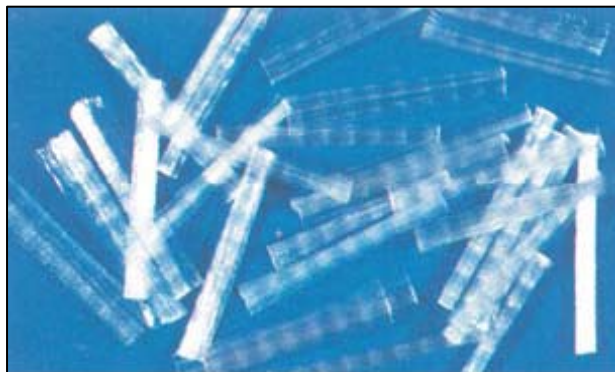
## 4.5 FIBRE SINTETICHE

L'utilizzo delle fibre sintetiche risale all'incirca al 1965 quando si cominciarono ad analizzare gli effetti ed il comportamento delle fibre in polipropilene nel calcestruzzo. Le fibre sintetiche possiedono una resistenza a trazione molto elevata, ma possono avere modulo di elasticità basso o alto.

La maggior parte delle fibre sintetiche rientra nella categoria di fibre a basso modulo di elasticità, come le fibre in polipropilene, polietilene e nylon che, in virtù di questa loro caratteristica, sono di particolare utilità nell'aumentare le tenacità ed il ritiro da fessurazione.

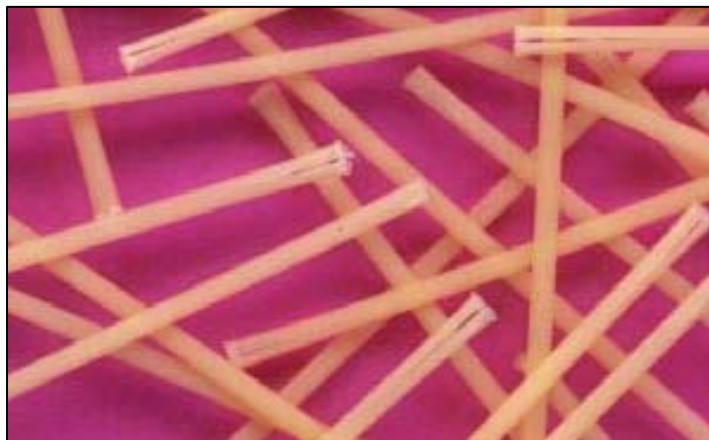
Le fibre sintetiche possono presentare tre geometrie differenti : monofilamenti, pellicole e nastri. La prima delle tre tipologie viene per la maggior parte utilizzata nei calcestruzzi e nelle malte per i loro effetti di ancoraggio; i filamenti, infatti, forniscono una buona aderenza alla matrice di calcestruzzo, aumentando così le prestazioni del composito risultante. Le fibre sintetiche sono inerti da un punto di vista chimico ma possono essere soggette a fenomeni di ossidazione che, però, possono essere superati utilizzando una copertura di calcestruzzo adeguata.

Lo svantaggio che esse presentano consiste fondamentalmente nel degradarsi all'esposizione dei raggi ultravioletti ed all'azione del fuoco; l'esposizione al sole, infatti, può provocare una perdita di resistenza di queste fibre mentre il fuoco degrada in modo rapido i compositi rinforzati con fibre sintetiche, come evidenziato da "flame spread tests" svolti in Inghilterra negli anni '90.





**Fig. 4.5.1** - Fibre in polipropilene



**Figura 4.5.2** - Fibre in polivinilalcol

## **4.6 COMPORTAMENTO DEI CALCESTRUZZI FIBRORINFORZATI E LORO APPLICAZIONI NELLE COSTRUZIONI**

Le applicazioni degli FRC sono molteplici, variano dalle piste aeroportuali, ai serbatoi, alle travi piastre di pavimentazione, agli elementi di copertura, ai canali, alla struttura delle dighe, ai giunti o nodi strutturali, alle strutture che devono sopportare urti, terremoti e/o resistere alla fatica fino ad arrivare al restauro degli edifici.

I calcestruzzi fibrorinforzati utilizzati nelle lastre e nei pavimenti industriali presentano, rispetto allo stesso materiale senza fibre, ottime prestazioni .

Tra le svariate applicazioni degli FRC rientra la costruzione nel 2000 in Arkansas di una lastra continua di  $51700 \text{ m}^2$  per la quale sono stati impiegati più di  $4900 \text{ m}^3$  di calcestruzzo fibrorinforzato con fibre d'acciaio. Altra importante applicazione riguarda la realizzazione di un edificio a tre piani in Florida sempre nel 2000, usando  $1070 \text{ m}^3$  di calcestruzzo rinforzato con fibre d'acciaio.



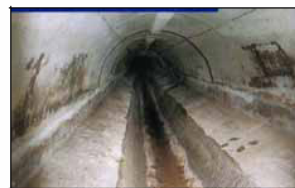
Car park, driveways



Airport Runway



Heavy duty slabs



Sewer tunnels

**Figura 4.6** - Applicazioni dei calcestruzzi fibrorinforzati.

La realizzazione di un FRC non può avvenire in modo casuale ma deve seguire dei riferimenti normativi soprattutto in merito alle dimensioni delle fibre, (lunghezza della fibra  $l_f$ , diametro equivalente  $d_f$ ) al loro quantitativo (numero di fibre per kg), alle dimensioni massime degli aggregati ecc. Le caratteristiche che identificano un calcestruzzo rinforzato sono l'indice di duttilità, la classe di consistenza, le caratteristiche delle fibre impiegate ed il dosaggio minimo in % di volume o in  $\text{Kg/m}^3$  necessario al raggiungimento della duttilità minima.

La scelta del tipo di fibre è dettata dalle loro proprietà quali il diametro, il modulo di Young, la resistenza a trazione e la loro lunghezza. .

La capacità portante di un calcestruzzo fibrorinforzato dipende dal volume percentuale di fibre applicato alla matrice di calcestruzzo.

Allo scopo di prevenire la rottura delle fibre, la sua capacità portante deve essere maggiore del carico applicato sul calcestruzzo nel momento in cui si manifesta la prima fessura. Ciò significa assumere che il calcestruzzo non contribuisce ad ulteriori resistenze oltre il punto di prima fessurazione, finché il carico è stato completamente trasferito alle fibre che sono contenute nel calcestruzzo.

Le fibre d'acciaio sono quelle maggiormente usate nelle applicazioni del calcestruzzo a causa del risparmio economico che se ne ricava dalla loro applicazione, della facilità di impiego, degli effetti di rinforzo e per la resistenza all'aggressività dell'ambiente. Pavimenti industriali, linee di traforo e prefabbricati sono le principali applicazioni del calcestruzzo rinforzato con fibre d'acciaio.

## **4.7 VANTAGGI E LIMITI DEI CALCESTRUZZI FIBRORINFORZATI**

Il calcestruzzo fibrorinforzato, oggi, rappresenta la soluzione ai numerosi problemi dovuti al ritiro ed alla fessurazione che si verifica nelle strutture in calcestruzzo. Le fibre, infatti, aumentano la resistenza all'impatto ed all'abrasione, la resistenza a fatica ed a taglio del calcestruzzo.

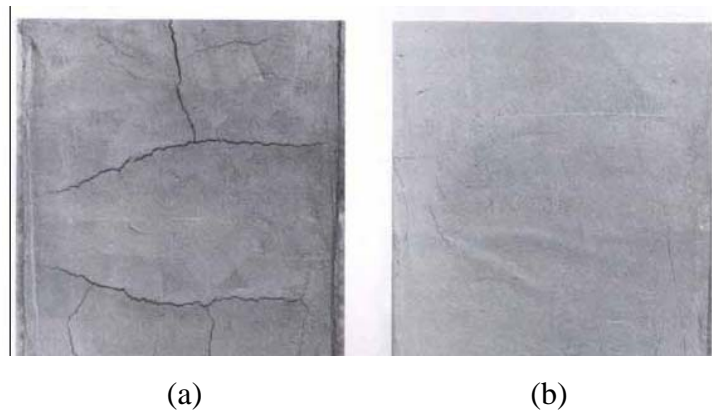
Non sono necessarie particolari apparecchiature per il confezionamento di un FRC e, pertanto, la loro produzione consente, rispetto ai calcestruzzi semplici, di ridurre il lavoro ed i costi nelle svariate applicazioni; inoltre non richiedono dei tempi più lunghi di realizzazione rispetto a quelli dei calcestruzzi ordinari.

Le fibre che vengono impiegate nei calcestruzzi fibrorinforzati possono essere usate insieme alle comuni barre da rinforzo, svolgendo insieme un ruolo ben preciso nella tecnologia del calcestruzzo; mentre il convenzionale rinforzo d'acciaio (barre d'armatura) assolve il compito di aumentare la capacità portante degli elementi di calcestruzzo, migliorando soprattutto quella portante a trazione, le fibre risultano

essere più efficaci nel controllo della fessurazione e del ritiro. Il rinforzo fibroso, infatti, non è sufficiente a resistere da solo alle tensioni dovute alla trazione e, pertanto, non può essere una sostituzione del convenzionale acciaio da rinforzo.

Si fa ricorso alle fibre come rinforzo primario solo in quelle particolari situazioni in cui le barre d'acciaio non possono essere utilizzate. In tali casi si riducono notevolmente il lavoro ed i costi del materiale e si fornisce un rinforzo multidirezionale del calcestruzzo. L'uso delle barre d'acciaio e della rete metallica, infatti, richiede lavoro e costi materiali inutili che aumentano enormemente il tempo di progettazione e costruzione.

La disposizione delle fibre all'interno della matrice avviene in modo più appropriato rispetto al rinforzo d'acciaio ed in tal modo consente di offrire delle migliori possibilità nel controllo della fessurazione e del ritiro. In virtù delle differenti proprietà delle due tipologie di rinforzo è possibile distinguere svariati tipi di applicazioni per le fibre rispetto alle barre d'armatura convenzionali. Le fibre, infatti, possono essere impiegate per sopportare localmente i carichi e le deformazioni elevate che vengono applicate a strutture come pali di fondazione e pareti prefabbricati, strutture resistenti alle esplosioni e tubazioni della fognatura ed in quelle applicazioni in cui la temperatura e l'umidità controllano la fessurazione.

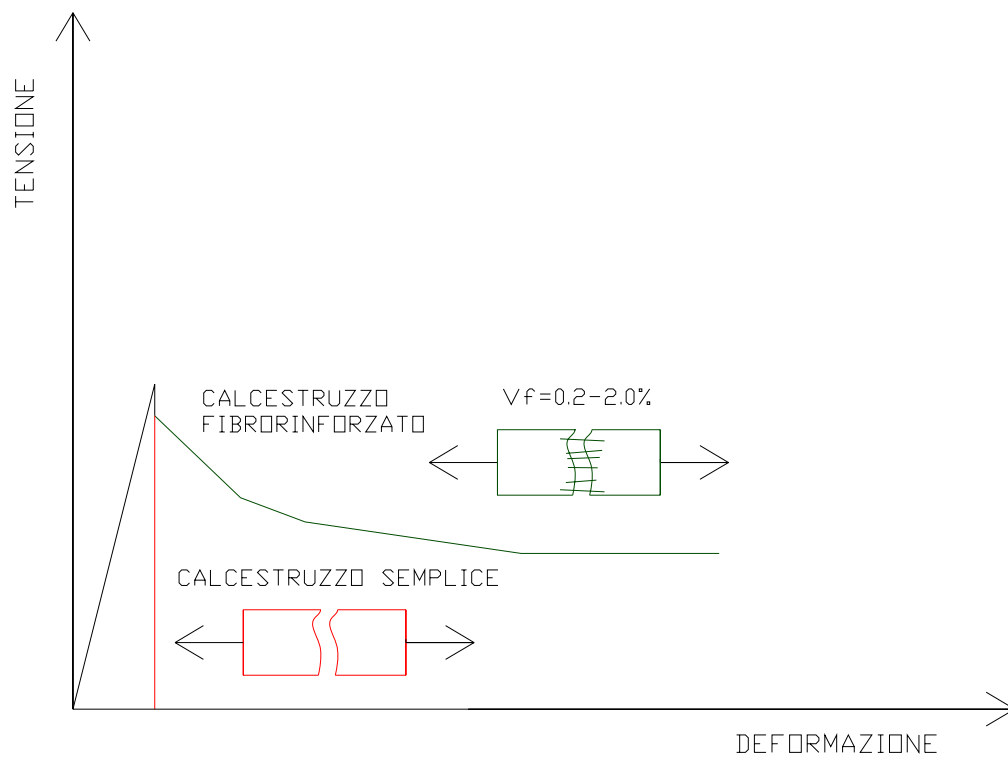


**Fig. 4.7.1** - Paragone tra le fessure di un calcestruzzo semplice (a) e quelle di un calcestruzzo fibrorinforzato (b).

Le fibre, inoltre, sono compatibili con tutte le miscele di calcestruzzo e con tutti i tipi di cemento e, come già esposto in precedenza, riducono il ritiro plastico, la profondità della fessura e forniscono un rinforzo multidirezionale del calcestruzzo.

Nella maggior parte dei casi esse vanno a costituire un rinforzo supplementare che contribuisce a dare una duttilità più elevata, a controllare il processo di fessurazione, e ad aumentare la resistenza a fatica, all'impatto ed all'abrasione. In sintesi le fibre costituiscono un rinforzo supplementare che contribuisce all'aumento della rigidità.

Le fibre speciali come il carbonio, il kevlar, le fibre naturali, le fibre minerali e le fibre di amianto possono essere usate in ambienti severi in virtù delle loro proprietà di resistenza. L'impiego di fibre di natura diversa deriva dai requisiti di comportamento e dalle proprietà che si richiedono per il calcestruzzo fibrorinforzato che si vuole ottenere.



**Fig. 4.7.2** - Diagramma tensione a trazione-deformazione per il calcestruzzo semplice e per il calcestruzzo rinforzato con fibre.

Il comportamento meccanico del calcestruzzo fibrorinforzato viene regolato dalle prescrizioni dettate dalle normative DT 204/2006 del CNR, UNI 11039-1,2 del 2003 e dal progetto di norma U73041440 del 2006.

Il DT 204/2006 fornisce le indicazioni per i calcestruzzi rinforzati con fibre metalliche, polimeriche o di carbonio, la norma UNI 11039-1,2 da indicazioni sulla definizione, classificazione e designazione dei calcestruzzi rinforzati con fibre d'acciaio, mentre la U73041440 fornisce istruzioni riguardo alla progettazione, esecuzione e controllo di elementi strutturali di calcestruzzo rinforzato con fibre d'acciaio.

La realizzazione di un calcestruzzo fibrorinforzato richiede il soddisfacimento di alcune regole ben precise che devono essere osservate. Infatti le sue caratteristiche finali dipendono fortemente dalle modalità e tecnologie di esecuzione della miscela .

La valutazione delle differenti proprietà meccaniche dell' FRC viene effettuata attraverso prove normalizzate alcune delle quali tipiche del calcestruzzo ordinario, altre opportunamente create per il fibrorinforzato.

La scelta delle fibre varia dai materiali organici sintetici come il carbonio o il polipropilene, alle fibre sintetiche organiche come l'acciaio o il vetro, alle naturali organiche come la cellulosa o il sisal, fino alle naturali inorganiche di amianto.

La scelta del tipo di fibre è guidata dalle proprietà delle fibre stesse definite dal diametro, dal modulo di Young, dalla resistenza a trazione etc e l'estensione di queste fibre è determinata dalle proprietà della matrice di cemento.

La geometria delle fibre può essere di tipi differenti variando da quelle uncinato a quelle deformate, a quelle ondulate ed, infine, a quelle ad estremità allargata .

Le dimensioni della sezione trasversale di una tipica fibra d'acciaio variano nell'intervalli che vanno da 0.5 ad 1 mm di spessore e da 0.25 a 0.90 mm di ampiezza.

Le fibre possono essere usate con miscele come i superfluidificanti, gli aeranti, gli acceleranti, i ritardanti e tutti i tipi di cemento e di miscele.