# READYMesh

## PRODOTTI E TECNOLOGIE PER IL RINFORZO STRUTTURALE E ANTIFESSURATIVO

www.azichem.com

# SOMMARIO


2 FIBRE POLIMERICHE

4 FIBRE D'ACCIAIO

6 CENNI STORICI

8 FINALITÀ DELLE FIBRE PER CALCESTRUZZO

17 I MATERIALI

23 I PARAMETRI TECNICI

28 QUADRO NORMATIVO

34 DOMANDE E RISPOSTE

# READYMesh

## PRODOTTI E TECNOLOGIE
## PER IL RINFORZO STRUTTURALE
## E ANTIFESSURATIVO

# FIBRE POLIMERICHE

## READYMESH PF-540

*Macro-fibra strutturale certificata, trefolata, specifica per pavimenti.*

**Dosaggio tipico: 1.5-2.0 kg/m³**
**Lunghezza: 54.0 mm**
**Diametro: 0.48 mm**

**Ideale per: pavimenti in calcestruzzo, applicazioni a vista, manufatti estrusi.**

## READYMESH PS-480

*Macro-fibra strutturale certificata, ad alte prestazioni.*

**Dosaggio tipico: 2.5-4.5 kg/m³**
**Lunghezza: 48.0 mm**
**Diametro: 0.69 mm**

**Ideale per: spritz-beton, prefabbricazione, fondazioni/platee, applicazioni strutturali.**

## READYMESH PM-180

*Micro-fibra ausiliaria per il rinforzo antifessurativo di calcestruzzo e malte in genere.*

**Dosaggio tipico: 0.8-1.0 kg/m³**
**Lunghezza: 18.0 mm**
**Diametro: 0.035 mm**

**Ideale per: Massetti di sottofondo, piccola prefabbricazione, malte e betoncini, rinforzo antifessurativo di conglomerati.**

## READYMESH PM-060

*Micro-fibra antifessurativa per piccoli spessori.*

**Dosaggio tipico: 0.8-1.0 kg/m³**
**Lunghezza: 6.0 mm**
**Diametro: 0.035 mm**

**Ideale per: malte e betoncini, intonaci.**

# FIBRE D'ACCIAIO

## READYMESH MX-500

*Fibra in acciaio da filo, sagomata, ad altissime prestazioni.*

**Dosaggio tipico: 20 kg/m³**
**Lunghezza: 50.0 mm**
**Diametro: 1.05 mm**

**Ideale per: pavimenti industriali, pre-fabbricazione, applicazioni strutturali "heavy-duty".**

## READYMESH MF-500

*Fibra in acciaio da filo, sagomata, ad aderenza migliorata.*

**Dosaggio tipico: 25-30 kg/m³**
**Lunghezza: 50.0 mm**
**Diametro: 1.05 mm**

**Ideale per: pavimenti industriali.**

## READYMESH MS-350

*Fibra in acciaio da filo, sagomata, per applicazioni a "spruzzo".*

**Dosaggio tipico: 30-40 kg/m³**
**Lunghezza: 35.0 mm**
**Diametro: 0.75 mm**

**Ideale per: Spritz-beton, prefabbricazione.**

## READYMESH MM-150

*Fibra in acciaio da filo, corta, per malte e massetti.*

**Dosaggio tipico: 15 kg/m³**
**Lunghezza: 15.0 mm**
**Diametro: 0.75 mm**

**Ideale per: massetti, massetti radianti, malte e betoncini.**

## Cenni Storici

Le **fibre per calcestruzzo** e per l'edilizia in genere, nella concezione più ampia e generale del termine, non si possono certo definire una invenzione dei giorni nostri. In effetti è possibile considerarle antiche quanto il calcestruzzo stesso, se non addirittura precedenti! Antichi reperti di abitazioni, datati quasi 2500 A.C. e risalenti alle civiltà mesopotamiche, erano fatti di impasti di argilla ed utilizzavano la paglia come armatura… "strutturale". Altre pratiche quali la fabbricazione di mattoni in argilla o fango, con l'aggiunta di paglia quale coesivizzante, sono state applicate sin dai tempi degli antichi Egizi. Non solo, le civiltà Inca e Maya erano solite aggiungere fibre vegetali al loro vasellame per impedire che si crepassero durante la fase di asciugatura al sole.
Le primordiali forme di calcestruzzo così come lo conosciamo oggi possono essere ricondotte alla **"opus caementicium"**: una tecnica costruttiva usata dagli antichi romani fin da ben prima dell'anno zero e basata sull'utilizzo di calce aerea per la produzione di malte da costruzione, perfezionata in seguito con l'introduzione di pozzolana nel composto come legante (nacquero così le malte idrauliche). Sin da quella invenzione, il calcestruzzo è stato additivato con elementi fibrosi che ne migliorassero la qualità, andando a contrastare la formazione di crepe e fessure. Esempi di calcestruzzi ed opere murarie additivate con 'fibre' si ritrovano nelle opere più disparate: le cosiddette fibre erano spesso costituite da materiali di risulta quali appunto paglia, fibre legnose, pelo di suini, di bovini o crine di cavallo. Sorprendentemente, la pratica di addizionare malte e intonaci con peli animali o fibre vegetali è resistita nei secoli ed era applicata (anche in Europa) addirittura fino agli inizi del XX secolo.
Lo stimolo di trovare nuove soluzioni, che potessero rispondere alle esigenze antifessurative in modo industriale e senza il ricorso ad espedienti d'ogni tipo, portarono in un primo tempo all'impiego delle **fibre d'amianto e vetro**. Le prime, strutturalmente una buona soluzione e ad un basso costo produttivo, introdotte negli Stati Uniti sin dalla prima metà del XX secolo, furono ovviamente abbandonate quando diventarono noti i danni che l'amianto comportava per la salute umana. Le **fibre di vetro** furono anch'esse ufficialmente inventate negli Stati Uniti negli anni '30, anche se vi sono indicazioni del fatto che anche in Russia, nello stesso periodo, si stava sviluppando un prodotto simile. Le fibre di vetro sono utilizzate ancora adesso come additivo per malte e conglomerati cementizi.
A partire dagli anni '60 si svilupparono diverse altre tipologie di fibre che potessero sostituire o affiancare efficacemente quelle già presenti, possibilmente che fossero producibili industrialmente, che avessero costi contenuti e che ovviamente non avessero indesiderati effetti secondari. Da allora la ricerca nel campo delle fibre per conglomerati cementizi o a

base di calce ha provato con le tecnologie più disparate: furono sviluppate **fibre in acciaio, fibre di vetro, fibre vegetali, fibre sintetiche** e via via fino a soluzioni quali **fibre in carbonio**, basalto, alluminio o kevlar. Tra le varie tipologie di fibre per calcestruzzo, considerata l'enorme diffusione che hanno tutt'ora, rivestono particolare interesse storico le **fibre in acciaio** e le **fibre sintetiche**. Delle prime possiamo affermare che sono una semplice, e nondimeno brillante, rielaborazione in forma di filamento di un materiale che è stato combinato con il calcestruzzo sin dalle prime applicazioni del cemento armato, l'armatura in acciaio appunto. Quanto alle seconde, invece, la storia risale a metà degli anni '70, quando un ingegnere svizzero di nome Rudolf Enzler pensò di applicare i progressi fatti nello studio delle catene polimeriche al campo delle fibre per l'edilizia. Al 5° Salone delle Invenzioni di Ginevra del 1976, infatti, il "Sistema Forta-Ferro" dell'ingegner Enzler si aggiudicò la medaglia d'oro. Erano nate le prime fibre in materiale polimerico per il rinforzo del calcestruzzo.

DIPLÔME

5e SALON INTERNATIONAL DES INVENTIONS ET DES TECHNIQUES NOUVELLES GENÈVE 1976

APRÈS EXAMEN ET DÉLIBÉRATION, LE JURY INTERNATIONAL RECONNAIT LES HAUTES QUALITÉS DE L'INVENTION QUI LUI A ÉTÉ PRÉSENTÉE ET DÉCIDE DE REMETTRE À: MONSIEUR RUDOLF ENZLER

POUR L'INVENTION: SYSTÈME FORTA-FERRO

UNE MÉDAILLE D'OR

GENÈVE, LE 29 NOVEMBRE 1976

Da allora, le **fibre polimeriche** si sono ritagliate un posto d'eccezione nel panorama delle fibre di rinforzo per calcestruzzo. Ovviamente, nel corso degli anni, i progressi riguardanti le fibre sintetiche non sono mancati: dalle prime **fibre in polipropilene** si è passati alla sperimentazione di diversi polimeri, forme, dimensioni. Alle fibre sintetiche ausiliarie si sono 'recentemente' aggiunte le **fibre strutturali**, capaci di conferire al calcestruzzo una resistenza residua post-fessurativa!

Per quanto riguarda il panorama Italiano, la storia delle **fibre per calcestruzzo** sintetiche ad uso commerciale inizia nel lontano 1982, anno in cui fu eseguita la prima malta premiscelata fibrorinforzata. Si trattava del rivestimento di un canale Enel a Villadossola, eseguita con una malta cementizia tixotropica, decisamente innovativa in quanto appunto fibrorinforzata e modificata con fumi di silice, messa a punto *dall'ing. Edoardo Mocco*.

# Finalità delle fibre per Calcestruzzo

La primaria funzione che le fibre hanno avuto sin dalle loro antiche applicazioni, aggiunte all'impasto del calcestruzzo, è quella di **contrastare le tensioni interne** che si innescano spontaneamente in un manufatto durante l'indurimento o maturazione; in questo caso ci si riferisce a fibre ausiliarie (altrimenti dette antifessurative). **L'azione antifessurativa** è stata per secoli la principale applicazione delle fibre per calcestruzzo. Da qualche tempo alle **fibre ausiliarie** si sono affiancate anche le **fibre strutturali**, le quali non intervengono solamente in fase di indurimento dell'impasto, ma contribuiscono anche quando il calcestruzzo ha raggiunto la piena maturazione, migliorandone le prestazioni. Nei paragrafi successivi, per brevità, si farà riferimento a quella che è stata, per vari motivi (primo fra tutti la cronologia), la prima funzione delle fibre per calcestruzzi, quella antifessurativa, che è comune sia alle fibre ausiliarie che a quelle strutturali. Queste ultime, non solo vantano la capacità di prevenire ed arrestare il fenomeno fessurativo, ma possiedono una robustezza tale per cui possono sobbarcarsi anche carichi più importanti, di natura strutturale.

Per completezza, partiremo dando una definizione all'ovvio: perché le fessure e le crepe dovrebbero essere dannose o semplicemente indesiderate? Sostanzialmente per sei motivi principali...

**1. Riducono o compromettono la resistenza del manufatto**

**2. Riducono o compromettono la "durabilità" dell'opera**

**3. Sono sgradevoli esteticamente**

**4. Possono essere causa di infiltrazioni d'acqua**

**5. Espongono l'armatura all'azione di agenti chimici che la possono intaccare**

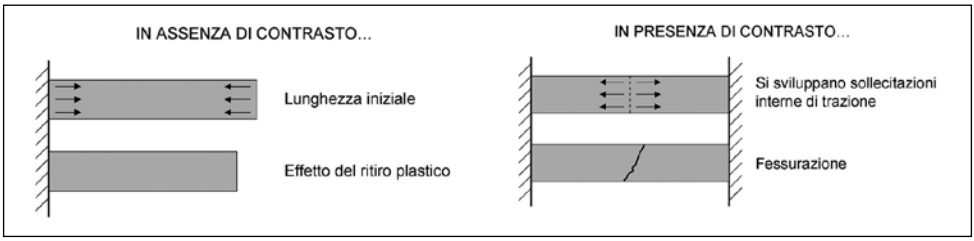
**6. Peggiorano la capacità di isolamento termico del manufatto (nel caso di una parete)**

Nei prossimi paragrafi si esploreranno il più semplicemente possibile, ma nondimeno in modo rigoroso ed esauriente, le ragioni per cui un materiale qualunque ha certe caratteristiche meccaniche e non altre, in special modo relativamente a resistenza e tenacità. Si dimostrerà infine, nel caso del calcestruzzo, come le fibre vanno ad interagire con la struttura del conglomerato cementizio, rendendola più tenace e più resistente alla frattura fragile.

## GENESI DELLE FESSURE

Il calcestruzzo tende inevitabilmente a sviluppare degli assestamenti da ritiro durante la fase fluida/plastica (durante la quale l'impasto è strutturalmente molto debole). Il ritiro, che in caso di manufatti in calcestruzzo senza vincoli potrebbe anche non essere un fenomeno tanto pericoloso, lo diventa necessariamente in presenza di vincoli o contrasti, cioè

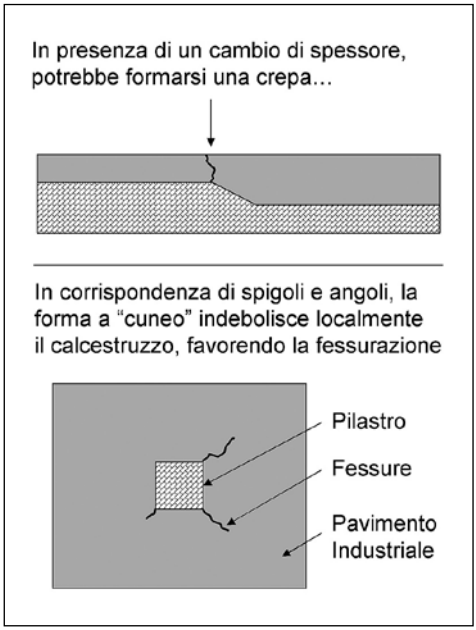
nella quasi totalità dei casi. Il ritiro in presenza di contrasto infatti induce necessariamente tensioni strutturali autogene, che se non correttamente gestite danno luogo ad effetti indesiderati.




Il ritiro è sostanzialmente dovuto a due azioni combinate: il **ritiro autogeno** ed il **ritiro da essiccamento**, detto anche **ritiro igrometrico**. Il primo è dovuto alla reazione di idratazione del cemento, la quale è una reazione cosiddetta a "debito di volume". Questo significa che, in termini puramente di volume, la somma degli elementi reagenti è inferiore alla somma degli elementi risultanti dalla reazione. Il secondo effetto invece è dovuto semplicemente all'evaporazione dell'acqua di idratazione in eccesso contenuta nel calcestruzzo fresco (cioè la differenza tra l'acqua totale inizialmente nell'impasto e l'acqua chimicamente "combinata" nella reazione di idratazione). In generale, queste due diverse azioni sono semplicemente dette **"ritiro plastico"**, in virtù del fatto che esse concorrono allo stesso risultato, il quale è più accentuato durante le prime fasi di maturazione del conglomerato, quando esso cioè è ancora in fase plastica, e decresce via via che la maturazione va a compimento.

Gli effetti del ritiro autogeno sono di molto inferiori a quelli del ritiro igrometrico, quindi è possibile approssimare il ritiro plastico complessivo al solo ritiro da essiccamento. Si noti che il fenomeno della fessurazione per cause igrometriche non è certo un fatto anomalo o un'esclusiva dei calcestruzzi...

Il **ritiro plastico igrometrico** rappresenta la casistica base per cui le fibre antifessurative vengono usate. Ma le fessure in realtà possono avere molte altre cause oltre a quelle autoindotte dal calcestruzzo stesso durante la maturazione. Tra queste, se ne possono identificare alcune dovute alla geometria del calcestruzzo posato in opera, altre relative ad una incorretta progettazione della struttura, ed altre ancora invece dovute a fattori esterni.



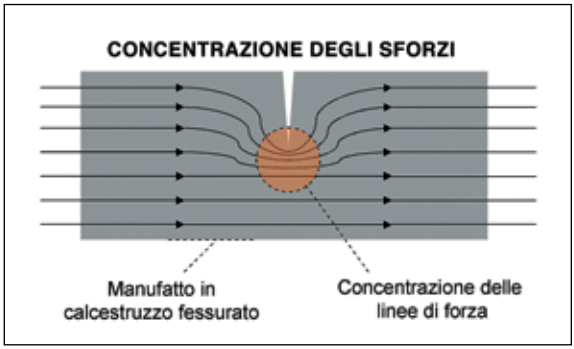

Per quanto concerne le cause progettuali, esse banalmente dipendono dalla non adeguata previsione dei carichi statici e dinamici che il manufatto in calcestruzzo dovrà sostenere. Una struttura dimensionata per sostenere determinati carichi e che si trovasse a sostenere carichi maggiori potrebbe dar luogo a cedimenti, o nei casi peggiori a crolli. Questo è evidente: una strada dimensionata per sopportare una bicicletta non potrà certo resistere al transito di un carroarmato! Va aggiunto che nella maggior parte dei casi in cui vi siano vizi progettuali di un certo rilievo, le fessure sono certamente l'ultimo dei problemi.

Tra le cause dovute alla geometria, le principali sono le variazioni di spessore della sezione e la presenza di spigoli e cunei. La ragione per cui cambi di spessore troppo marcati possono essere causa di fessure e fratture, è che nei calcestruzzi a legante idraulico l'indurimento avviene dall'esterno all'interno, quindi nel caso di diverso spessore si avrebbero tensioni di ritiro che, oltre all'effetto classico di trazione lungo il profilo del manufatto, produrrebbero anche delle tensioni di taglio e di flessione che insistono sulla zona interna ancora in fase plastica. Un'altra situazione tipica in cui (se non adeguatamente gestita) è possibile riscontrare fessurazioni dovute alla geometria del manufatto, sono la presenza di spigoli. Anche in questo caso la presenza di un cuneo indebolisce localmente la struttura e contestualmente accentua lo sforzo che essa deve sostenere, facilitando la formazione di crepe e rotture.

Le cause dovute a fattori esterni sono innumerevoli. Tra le tante possiamo citare a titolo di esempio la non corretta stagionatura del calcestruzzo, la presenza di forti escursioni termiche, la presenza di vibrazioni che si trasmettono attraverso il manufatto, la presenza di eccessivi assestamenti, ecc..

## DINAMICA FESSURATIVA

Ma cosa dà alle fibre questa **caratteristica antifessurativa** e perché mai dovrebbero aiutare il calcestruzzo a sopportare le tensioni da ritiro? Per rispondere a questa domanda, dobbiamo capire cos'è una fessura e che conseguenze comporta all'interno di un manufatto di calcestruzzo (come del resto in qualunque altro materiale).




### *Concentrazione degli sforzi*

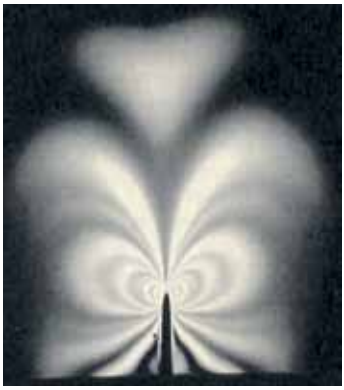
Il primo ed importante concetto è quello della concentrazione di sforzo all'apice di una fessura, teorizzato nel 1913 dal professor C. E. Inglis. Prendiamo dunque il caso di un provino di calcestruzzo (il concetto ovviamente è estendibile a qualunque materiale) e sottoponiamolo a sforzi di trazione, come quelli generati dalle tensioni di ritiro. Il materiale sarà percorso da queste tensioni lungo tutta la lunghezza, trasferendosi tra le due estremità del provino. Possiamo schematizzare il fenomeno come se il corpo fosse attraversato da linee di flusso. In questo stato, se al provino è applicata una frattura, si tenderebbe a pensare che, in corrispondenza del difetto, la restante sezione non fessurata del materiale semplicemente si fa carico di sostenere le tensioni che lo attraversano, in maniera uniforme. Questo è del tutto inesatto: Inglis teorizzò che esattamente in corrispondenza dell'apice della fessura (si parla addirittura di distanze molecolari) il materiale è sottoposto a sforzi che sono moltiplicati di varie volte rispetto alle tensioni medie applicate al provino.

Il fattore di moltiplicazione (K) teorizzato da Inglis è circa pari a:

$$K \simeq 2 \cdot \sqrt{\frac{l}{R}}$$

dove l è la lunghezza della fessura (o se vogliamo la sua profondità) e R è il raggio dell'apice.

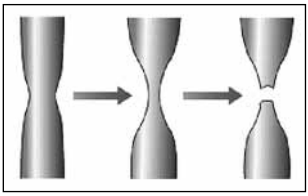
La formula precisa è leggermente diversa da questa ed è stata teorizzata per una fessura con apice di forma sferica o ellittica, cosa non del tutto realistica, anche se si è verificato sperimentalmente che in realtà questa formula è un'ottima approssimazione per qualunque altra forma.



Considerando un provino di vetro il quale presenta una micro-fessura superficiale di 2 millesimi di millimetro di profondità e il cui raggio all'apice sia di 0,1 milionesimo di millimetro (queste micro-fessure superficiali non sono affatto rare, al contrario esse sono tipiche nel vetro), avremo che per qualunque carico di trazione applicato al provino, il materiale in un determinato punto si troverà a sopportare sforzi localizzati addirittura 200 volte maggiori!!

### *Duttilità e fragilità*

Una distinzione doverosa a questo punto è anche tra materiali duttili (tipicamente i metalli) e materiali fragili (vetro, ceramica, calcestruzzo, ecc.). La duttilità è la capacità di deformarsi sotto sforzo, prima di giungere a rottura. Questa caratteristica è anche strettamente legata al concetto di tenacità, ovvero la capacità di un materiale di dissipare energia durante la deformazione plastica. Uno dei motivi principali per cui il vetro si rompe come sappiamo è che essendo un materiale fragile, al pari del calcestruzzo, nel quale non si hanno deformazioni plastiche, una fessura ha sempre un raggio all'apice estremamente piccolo, qualunque sia la sua profondità. Il fattore di moltiplicazione diventa quindi elevato già a partire da fessure microscopiche. Un diamante, per quanto possa essere il materiale più duro e resistente alle scalfitture conosciuto in natura, andrà in frantumi con una martellata ben assestata, dato che è comunque un materiale fragile.



I materiali duttili invece, se sottoposti a sforzi che possano mettere in crisi i legami che tengono insieme la materia stessa, reagiscono deformandosi plasticamente, dissipando quindi energia. Questa loro proprietà, fa sì che in presenza di una cricca, l'apice di questa verrà deformato dall'intensificazione degli sforzi, aumentandone il raggio e alleviando la concentrazione stessa delle tensioni.

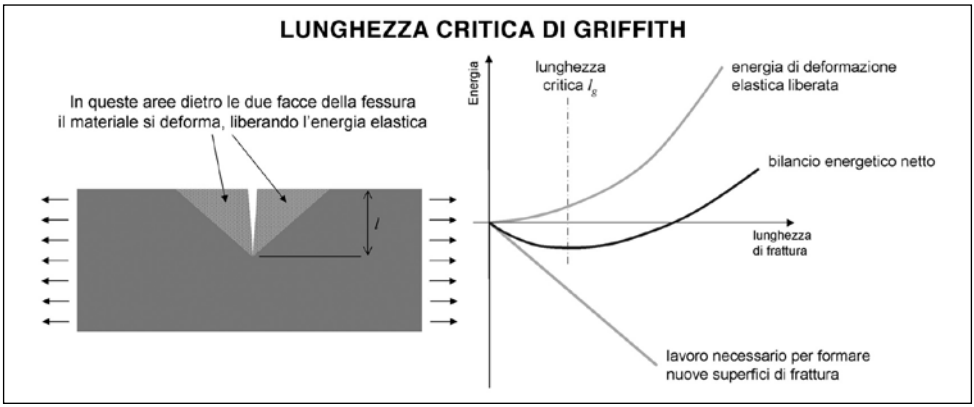
Vi starete chiedendo: "ma allora, se è vero che il calcestruzzo è fragile, perchè è da 'sempre' il materiale da costruzione per eccellenza"? Acuta osservazione. Molto semplicemente: facendolo lavorare in compressione e non in trazione! Oppure posandolo in combinazione con armature d'acciaio, tenaci e resistenti alle trazioni. Oppure ancora, nei casi in cui proprio non si possa fare a meno di avere sollecitazioni in trazione, seppur lievi rispetto agli sforzi in gioco, utilizzando accorgimenti per combattere le fessurazioni, in primo luogo additivando il calcestruzzo con fibre.

### *Lunghezza critica di Griffith*

Uno dei pionieri della meccanica della frattura è stato sicuramente l'ingegnere A. A. Griffith, il quale nel 1920 formulò uno dei modelli fondamentali di questa disciplina. Il colpo di genio di Griffith fu quello di affrontare la dinamica fessurativa nei materiali con un aproccio energetico anzichè basato su forze e tensioni.

Egli intuì che nella fase di propagazione di una fessura si compie un lavoro (detto appunto lavoro di frattura) per generare nuove superfici e rompere i legami molecolari e atomici del materiale. Nell'ipotesi di un corpo che si sta deformando elasticamente e nell'ipotesi che gli effetti dell'energia cinetica delle parti fratturate siano trascurabili, questo lavoro di frattura (che assorbe energia) viene alimentato a spese dell'energia elastica immagazzinata nel materiale sottoposto a sforzo di trazione.

Da questo punto di vista, quindi, la concentrazione degli sforzi di Inglis non è che un meccanismo per trasformare l'energia di deformazione in energia di frattura, e la condizione affinchè una cricca si propaghi è che l'energia di deformazione elastica per unità di superficie sia maggiore della energia richiesta per formare nuove superfici.




Tornando ad analizzare il nostro provino di calcestruzzo, notiamo che le zone di esso che rilasceranno energia elastica sono quelle indicate in figura: due triangoli all'interno delle facce della fessura. Griffith ha notato che l'area complessiva di quei triangoli varia con il quadrato della lunghezza della fessura, e quindi anche la quantità di energia di deformazione liberata. D'altro canto, il lavoro di frattura aumenta proporzionalmente alla lunghezza di frattura. Tradotto in pratica, questo vuol dire che per fessure piccole, la propagazione della fessura è un processo energeticamente dispendioso e non avviene spontaneamente. Superata una certa lunghezza critica, però, la propagazione libera energia, che da quel momento diventa un processo spontaneo, che si autoalimenta e dunque brutale.

La lunghezza critica è definita quantitativamente con questa espressione:

$$l_g = 2 \cdot \frac{WE}{\pi \sigma^2}$$

dove W è il lavoro di frattura, E il modulo elastico di Young e "σ" è la tensione applicata in trazione.

Il lavoro di frattura ed il modulo elastico sono proprietà intrinseche del materiale, mentre la tensione è ovviamente un fattore esterno.

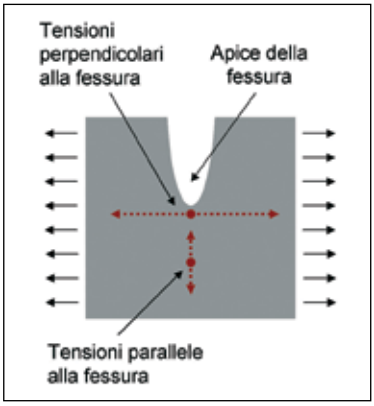
## ARRESTO DELLE FESSURE

Fino ad ora, abbiamo capito come si genera una fessura, e abbiamo capito anche quali sono le condizioni affinchè essa si propaghi nel materiale. Ora vediamo cosa si può fare per **arrestare una fessura e fare in modo che essa non dia luogo ad una completa rottura del materiale**, propagandosi in modo incontrollato.

Partiamo col dire che per un materiale tenace come l'acciaio o i metalli in genere, questo è abbastanza semplice in virtù di un lavoro di frattura (W) che si aggira grosso modo dai 10.000 ai 1.000.000 J/m$^2$. In questi casi, dunque, a differenza di un materiale fragile, una cricca dovrà essere parecchio lunga (a volte di metri!) per poter dar luogo ad una propagazione spontanea. In un materiale fragile però il lavoro di frattura di per se non è molto elevato. Prendiamo il caso del vetro: è un materiale che avrebbe una resistenza teorica alla trazione incredibilmente elevata, se non fosse che essendo così drammaticamente fragile, una qualunque fessura infinitesimale (sulla superficie del vetro normalmente ce ne sono a migliaia) fa crollare la sua resistenza. Tramite sofisticati esperimenti di laboratorio, si è dimostrato che fibre di vetro estremamente sottili (dell'ordine di pochi millesimi di millimetro) e quasi totalmente prive di fessure hanno resistenze di oltre 60.000 Kg/cm$^2$!! Per fare un paragone, gli acciai ad alta resistenza superano di poco i 20.000 kg/cm$^2$.

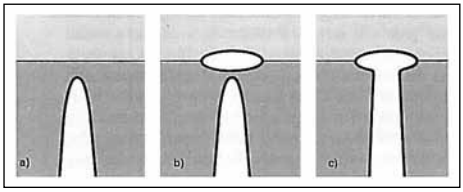
Come è possibile migliorare sensibilmente la tenacità di un materiale che normalmente è molto fragile? La risposta è suggerita dalla vetroresina che è un materiale composito, formato da piccole fibre di vetro (catastroficamente fragile) immerse in una matrice di resina indurita (leggermente meno fragile del vetro, non di molto). Come è possibile dunque ottenere un composto così tenace, da poterci costruire addirittura gli scafi delle barche, semplicemente unendo vetro e resina ? Ebbene, la risposta è racchiusa in ciò che viene definito "trappola di Cook-Gordon".

J. Cook e J. E. Gordon studiarono negli anni '60 cosa accadeva alle fessure in un solido in materiale composito. La loro attenzione si rivolse in particolare alla fessura in propagazione quando sta per raggiungere la zona di separazione tra i due componenti del materiale. Trovarono che, per un complicato equilibrio di forze in gioco, in corrispondenza dell'apice di una fessura, non solo si hanno forze di trazione in direzione perpendicolare alla fessura (quindi nella direzione dello sforzo applicato all'intero corpo) che tendono ad allargare ulteriormente la fessura, ma sono presenti anche tensioni in direzione parallela alla fessura. Queste ultime sono più acute non in corrispondenza dell'apice ma bensì poco sotto (si veda la figura), ed inoltre sono sempre circa un quinto di quelle perpendicolari, in termini di intensità.




Cook e Gordon si resero conto che in un materiale composito, quando la fessura in propagazione

sta per raggiungere la zona di separazione tra i due componenti del materiale, le forze parallele alla fessura molto spesso tendono a separare tra loro i due materiali. Questo meccanismo crea una seconda microfessurazione sul cammino della fessura principale; quando questa, nel propagarsi ulteriormente, incontra la nuova microfessura indotta (disposta perpendicolarmente alla prima), ne viene intrappolata. Riprendendo la formula di Inglis, è come se ora la fessura avesse un raggio molto maggiore, e quindi il fattore di moltiplicazione degli sforzi all'apice della fessura crolla bruscamente, alleviando le tensioni localmente e arrestandone la propagazione.

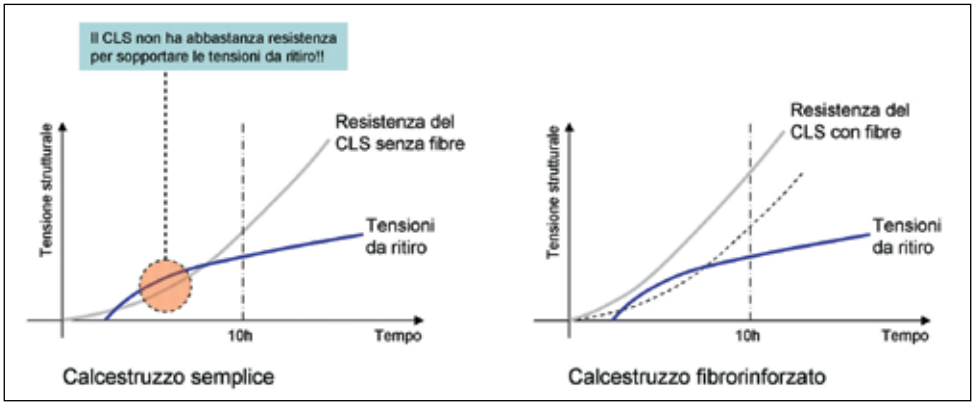



Si potrebbe obiettare che in questo modo si è arrestato una prima fessura, creandone una seconda... Sebbene questo sia vero, è anche vero che la tendenza a propagare di una fessura disposta parallelamente alla tensione è generalmente nulla. Quindi ilsistema si stabilizza e la fessurazione si interrompe.

## AZIONE DELLE FIBRE

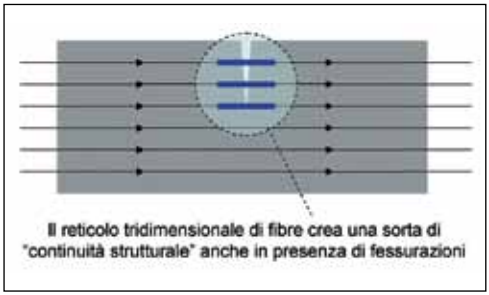
Ora che abbiamo identificato cause, dinamiche e possibili rimedi al problema delle fessurazioni, l'ultimo passo da compiere è illustrare **come le fibre possano contribuire a migliorare le prestazioni meccaniche** (e non solo) dei manufatti in calcestruzzo.

Innanzitutto le fibre per calcestruzzo intervengono proprio nella prima fase di maturazione (fino a circa 10 ore dalla posa in opera), quando il calcestruzzo è ancora plastico, e il ritiro complessivamente è più marcato. In questo contesto, il conglomerato cementizio potrebbe non avere la capacità strutturale di opporsi alle tensioni che si generano al suo interno: si vengono così a formare crepe e fessure. La proprietà antifessurativa delle fibre, dunque, agisce in questa fase iniziale, aumentando la resistenza iniziale del conglomerato in via di solidificazione, intervenendo prima ancora che le fessure si creino.



Qualora alcune fessure debbano comunque generarsi, per uno qualunque dei motivi già elencati in precedenza, le fibre saranno comunque di grande beneficio, in quanto vanno a costituire una sorta di reticolo tridimensionale che aiuta a distribuire meglio gli sforzi che attraversano l'opera in calcestruzzo, aumentando la resistenza del manufatto stesso sia quando esso è perfettamente sano, sia qualora vi dovessero essere delle micro-fratture (anche interne). In tal caso, infatti, in presenza di un calcestruzzo adeguatamente fibro-rinforzato, la fessura sarebbe attraversata da un fascio di fibre che crea una sorta di continuità strutturale, la quale andrebbe ad alleviare le sollecitazioni sul calcestruzzo stesso, specialmente in corrispondenza dell'apice della fessura.

E non è tutto: il reticolo 3D creato dalle fibre, nel caso delle fibre strutturali, consente di avere una certa resistenza anche qualora il calcestruzzo si fosse del tutto fratturato, proprio in virtù dei filamenti che attraverserebbero la rottura capaci di sostenere limitati carichi strutturali (questo solamente per alcuni particolari modelli di fibre).


Il reticolo tridimensionale di fibre crea una sorta di "continuità strutturale" anche in presenza di fessurazioni

Infine, le fibre hanno una caratteristica formidabile, cioè quella di creare moltissime micro-superfici di separazione tra fibra e matrice cementizia, disperse in tutto il volume del manufatto e orientate in tutte le direzioni. In presenza di una fessura in propagazione (cosa non infrequente, data la caratteristica fragile del calcestruzzo indurito), esse vanno a costituire una miriade di piccole trappole di Cook-Gordon nel momento in cui la fessura dovesse incontrare la fibra lungo il suo tragitto, molto spesso arrestandone l'avanzamento con successo.

E' chiaro dunque che le fibre, anche se certamente non possono essere la panacea di tutti i mali che troppo spesso affliggono le costruzioni in calcestruzzo, possono contribuire a migliorarne sensibilmente alcune caratteristiche e a prevenire svariati difetti intrinseci del materiale.

# I materiali

*Tra i materiali che sono stati usati in combinazione con il calcestruzzo, dei molti che sono stati sperimentati, solo 2 hanno superato brillantemente la prova del tempo e del mercato:* ***acciaio e polipropilene****.*

## ACCIAIO

**L'acciaio è probabilmente il materiale che meglio si sposa con il calcestruzzo**: la sua notevole resistenza a trazione si combina perfettamente con la ottima resistenza a compressione del calcestruzzo. Inoltre quest'ultimo, grazie alla sua basicità, costituisce un ambiente favorevole alla conservazione dell'acciaio nel tempo. Non stupisce che le fibre di acciaio siano state utilizzate nel calcestruzzo da molti decenni ormai.

### *Applicazioni strutturali*

Le fibre d'acciaio sono impiegate quasi esclusivamente per applicazioni strutturali, per due motivi: il primo è che produrre fibre d'acciaio estremamente sottili e corte ha un costo notevole e quindi tipicamente, in applicazioni quali la fibra da calcestruzzo, affinchè il prodotto abbia senso economico sono prodotte con un diametro ed una lunghezza che permette di raggiungere poche migliaia di filamenti per kg di prodotto. Applicazioni antifessurative necessitano di un numero di filamenti superiore per uno o due ordini di grandezza. Il secondo è che la loro elevata resistenza a trazione, che può arrivare a 1200-1400 MPa ($N/mm^2$), ben si sposa con questo tipo di applicazione.

Il loro utilizzo è piuttosto semplice dal punto di vista progettuale in quanto le normative Europee ed Italiane in materia danno ormai da tempo riferimenti precisi ai progettisti, che quindi le possono prescrivere nei capitolati senza troppi problemi.

*Ossidazione e acciai speciali*

Le fibre in acciaio hanno lo svantaggio di essere soggette all'ossidazione; questo aspetto è accentuato dal fatto che le fibre per loro natura non sono controllabili quanto a posizione nella matrice cementizia (non si può rispettare la distanza di copriferro). Nel lungo periodo, dunque, ossidazione e corrosione possono compromettere il buono stato delle fibre più esposte. Esistono anche acciai particolari che possono essere utilizzati nel mercato delle fibre da calcestruzzo proprio per contrastare questi aspetti negativi: le **fibre in acciaio zincato** e le **fibre in acciaio inox**.

Le fibre in acciaio zincato sono normali fibre d'acciaio le cui prestazioni sono simili a quelle delle corrispondenti in acciaio al carbonio, l'unica sensibile differenza è rappresentata da una zincatura superficiale. Questa zincatura consente di proteggere l'acciaio dall'ossidazione meglio e per più tempo rispetto alla versione normale. Rispetto alle fibre in acciaio normali, quelle zincate costano circa il doppio. Le fibre zincate sono adatte ad applicazioni in ambienti salmastri e nel caso di prefabbricati verniciati, per i quali la funzione estetica molto spesso è primaria rispetto a quella strutturale e dunque la presenza di macchie di ossidazione superficiali sarebbe molto dannosa per l'estetica del manufatto.

Le fibre in acciaio inox invece sono la risposta definitiva ai problemi di ossidazione nelle fibre d'acciaio. Ne esistono di vari tipi a seconda della qualità dell'acciaio utilizzato e al grado di inossidabilità. Li elenchiamo di seguito da quello meno performante a quello più performante:

## AISI 430 - acciaio inox ferritico

## AISI 304 - acciaio inox austenitico

## AISI 310 - acciaio inox austenitico

Queste fibre trovano applicazione prevalentemente (per non dire quasi esclusivamente) nel mercato dei produttori di manufatti refrattari, i quali necessitano di una temperatura di fusione molto alta che solo l'acciaio inossidabile è in grado di garantire. I prezzi delle fibre inox sono multipli di quelli per le fibre di acciaio normale; al momento della scrittura, si va dai 4.50 €/kg per quelle ferritiche per arrivare ai circa 9.00 €/kg per quelle in acciaio austenitico 310. E' del tutto superfluo commentare che in applicazioni "normali" e quotidiane questo tipo di fibra non ha nessun senso economico.

*Tecniche Produttive*

Le fibre in acciaio sono classificate dalla normativa di riferimento (la EN 14889-1) in base ad uno dei seguenti metodi produttivi da cui sono ottenute:

**1. ottenute da filo di acciaio ("from wire")**
**2. ottenute per taglio di piattina ("cut sheet")**
**3. ottenute da estrusione a caldo ("melt extracted")**
**4. ottenute da trafilatura a freddo ("cold drum wire")**
**5. altro**

Le prime due tipologie sono quelle in assoluto più diffuse nel mercato. Da qualche tempo si vendono anche le tipo 4, qualitativamente peggiori delle prime, anche a causa della forte competizione sui prezzi che da tempo affligge questo mercato.

Le prime due tipologie sono facilmente distinguibili tra loro in quanto quelle da filo hanno una sezione circolare, mentre quelle da piattina sono di sezione quadrata. La letteratura specialistica riconosce le fibre da filo (tipo 1) come qualitativamente superiori rispetto alle altre tipologie.

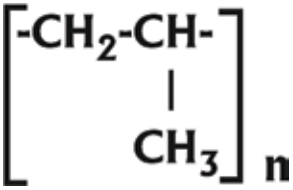
## FIBRE POLIMERICHE

Le **fibre polimeriche** sono fibre ottenute da materiali sintetici costituiti da catene di polimeri della stessa famiglia della comune plastica. La famiglia più diffusa, nel mercato delle fibre per calcestruzzo, sono le fibre "poliolefiniche". Esistono però anche produttori che hanno proposto al mercato altri tipi di polimeri, principalmente poliestere e poliacrilonitrile.

I detrattori delle fibre sintetiche (generalmente i produttori delle fibre di acciaio) accusano questi modelli di presentare un comportamento plastico-viscoso (detto anche "creep") quando sottoposte a tensioni costanti e prolungate nel tempo. L'origine di questa accusa, certamente fondata, risiede nel fatto che molti polimeri utilizzati nella fabbricazione di fibre per calcestruzzo presentano naturalmente questo comportamento e dunque, sostengono, anche le fibre riproporranno lo stesso fenomeno. Vero è che le fibre polimeriche strutturali sono quasi sempre ottenute da polimeri pre-stressati e orientati, per aumentarne la resistenza. Questo ridurrà molto il fenomeno del creep. Ad ogni modo, al momento della presente scrittura, la legislazione in materia è ancora del tutto assente, così come sono assenti normative specifiche per

testare e misurare questo fenomeno. Le uniche informazioni a riguardo sono dovute a test commissionati dai singoli produttori o eseguiti da istituti di ricerca, interessati ad indagare sul fenomeno e sulle implicazioni dal punto di vista della struttura nel suo complesso. Sono test che durano almeno 2 anni e al momento non vi sono dati certi e pubblici (anche perché non essendoci la normativa in materia che ne omogeneizza la metodologia, qualunque risultato sarebbe del tutto arbitrario e poco comparabile con gli altri).

Vediamo ora i materiali principali con cui sono prodotte le fibre sintetiche.

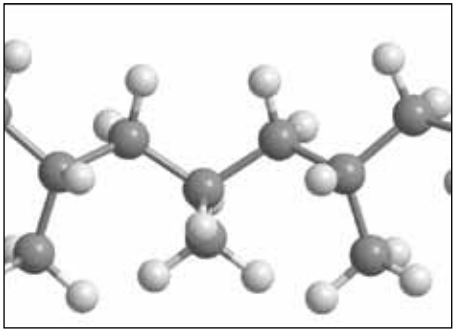


## POLIOLEFINE

Con il termine tecnico di "poliolefine" si definisce, nella chimica delle materie plastiche, un insieme di materiali tra cui i più famosi sono il polipropilene (PP) ed il polietilene (PE).

Il polipropilene vergine, tra quelli della famiglia delle poliolefine, è il polimero generalmente utilizzato nella fabbricazione delle fibre. Il polipropilene non orientato ha normalmente resistenze alla trazione che si aggirano sui 30-50 MPa. Nel caso dei filati, cioè a catene orientate, le resistenze a trazione raggiungono tranquillamente i 250-400 MPa!

Nel caso di fibre ausiliarie questo valore è più che sufficiente.



Per applicazioni strutturali, però, si necessitano di resistenze maggiori e dunque si ricorre sovente a miscele di polimeri poliolefinici più prestazionali del solo polipropilene vergine, o a tecniche di lavorazione quali la "stiratura" del filato. Questi ulteriori accorgimenti consentono di raggiungere resistenze massime che possono addirittura superare i i 600 MPa.

Da notare che nel mercato si è da tempo instaurata l'usanza, ormai comunemente accettata da produttori e tecnici del settore, di definire "polipropileniche" le fibre meno prestazionali (le ausiliarie) e "poliolefiniche" o da "miscela poliolefinica" quelle più prestazionali (le strutturali). Questa definizione non è del tutto veritiera, dato che dire poliolefinica non esclude che la fibra sia di polipropilene vergine, ma comunque è una consuetudine affermata.

## POLIACRILONITRILE

Le fibre in poliacrilonitrile (PAN), anche dette semplicemente “acriliche”, sono fibre sintetiche ottenute da una catena polimerica diversa dalle poliolefine. Le cose principali da sapere sulle acriliche sono:

• Fibre generalmente di bassa qualità, ottenute da scarti di altre lavorazioni. La loro forza commerciale risiede unicamente nel prezzo.

• Si presentano normalmente in fiocchetti che da soli farebbero fatica a disperdersi adeguatamente nella matrice cementizia, dunque vengono “apprettati” per aumentare l’indice di bagnabilità. In certe applicazioni questo appretto ha causato la creazione di schiuma nel calcestruzzo durante la miscelazione, con drastiche riduzioni di prestazioni.

• Sono fibre che in molti casi tendono ad inglobare più aria di altre fibre di simili forma e dimensioni. Si conoscono sul mercato solamente fibre ausiliarie di questo tipo. Non vi sono, al momento della stesura di questo testo, fibre strutturali acriliche.

## POLIESTERE

Il poliestere è un filato sintetico che trova molto spesso applicazione nell’industria tessile. Si tratta di un polimero tenace e resistente, con un modulo elastico superiore al polipropilene (più rigido). Nonostante il poliestere abbia le “carte in regola” per costituire potenzialmente un buon materiale da cui realizzare fibre per calcestruzzo, di fatto quasi nessun produttore lo ha adottato e quelli che lo hanno fatto hanno ottenuto poche soddisfazioni in termini di prestazioni nel calcestruzzo e di riscontro di mercato!

## VETRO

Il filato di vetro è in linea teorica un materiale ad altissima resistenza alla trazione: può raggiungere valori anche di 1700 MPa, ben superiori ai migliori acciai, se il filato è sufficientemente sottile (un filo di vetro più è sottile e più è statisticamente esente da microfratture che ne esaltano la incredibile fragilità, per questo fili di vetro sottilissimi in laboratorio raggiungono le resistenze del materiale che sono maggiori anche dell’acciaio). Il problema come tutti sanno è la sua intrinseca fragilità, che quindi in applicazioni quotidiane non permette di arrivare a queste prestazioni.

Il vetro è dunque principalmente utilizzato per applicazioni antifessurative, con le quali le fibre di vetro si comportano molto bene (le malte di Azichem fanno ampio utilizzo delle fibre di vetro infatti) anche se hanno un costo superiore rispetto alle più diffuse cugine in polipropilene.

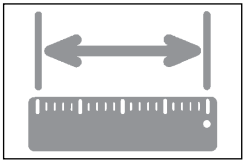
La cosa fondamentale per una fibra di vetro da utilizzare nel calcestruzzo è che sia alcalino resistente (AR), ovvero quando inserita nel calcestruzzo sia resistente all'ambiente fortemente basico delle miscele cementizie o a base calce. In commercio esistono anche fibre non AR che sono chiaramente molto più economiche di quelle AR ma che dopo qualche tempo si dissolvono nella miscela.

# I parametri tecnici

*Qui di seguito spenderemo due parole su quelli che sono i **parametri tecnici più comunemente ritrovati sulle schede tecniche delle fibre per calcestruzzo**, in modo da saper interpretarne il significato e saper comparare le fibre tra loro.*

## DIMENSIONI

### *Lunghezza*



Il più immediato, semplice e rappresentativo dei parametri tecnici di una fibra è rappresentato sicuramente dalla sua lunghezza! Normalmente il codice prodotto di una fibra è molto spesso correlato anche alla sua lunghezza. Dato che la fibra, specialmente le polimeriche, sono il prodotto di un filato tagliato ad intervalli regolari, tutte le caratteristiche intrinseche della fibra in se sono derivate direttamente dal filato di partenza; mentre la lunghezza ha effetti diretti sul comportamento della fibra nel calcestruzzo e sulla sua applicazione. Inoltre, dato che ogni produttore da uno stesso filato può ricavare diversi modelli di fibre semplicemente tagliando a diversa misura, la lunghezza assume un ruolo fondamentale nel distinguere le diverse fibre di uno stesso portafoglio prodotti.

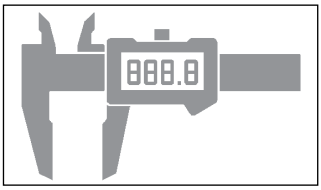
Le fibre per conglomerati cementizi che si sono affacciate sul mercato sono praticamente tutte comprese tra i 3 mm e i 60 mm di lunghezza. Non si conoscono al momento fibre che esulino da questo intervallo. Normalmente le fibre corte (<25 mm) sono destinate quasi esclusivamente al segmento del rinforzo antifessurativo; le fibre lunghe (>30 mm) sono invece quasi sempre fibre destinate ad applicazioni strutturali.

Fatta questa prima grande distinzione, nel segmento delle fibre strutturali quasi tutti i modelli si concentrano tra i 38 mm e i 54 mm. Nelle fibre strutturali la scelta comunque è dettata molto spesso dai modelli disponibili e dalle loro prestazioni dichiarate (da normativa CE), quindi non è tanto una scelta derivante dall'utilizzo, dagli spessori o dall'aggregato del calcestruzzo, quanto appunto la lunghezza che il fornitore ha trovato più efficace nei propri test di laboratorio.

Dunque la scelta per l'utente normalmente si orienta verso la fibra e la lunghezza più prestazionali (a meno di casi ed esigenze particolari e specifiche).

Questo discorso non si applica però alle fibre ausiliarie/antifessurative, per le quali la scelta della lunghezza non è tanto una conseguenza delle prestazioni tecniche, quanto più delle effettive esigenze del cliente in relazione all'utilizzo finale e agli spessori del manufatto. Per le fibre ausiliarie, le lunghezze più diffuse sono tra 6 mm e 18 mm. Le più corte sono per malte e intonaci, mentre le più lunghe sono praticamente per tutti gli altri casi.

### *Diametro*




Anche il diametro di una fibra ne classifica immediatamente la funzione: le fibre più sottili, con diametri più piccoli del decimo di millimetro, sono esclusivamente fibre ausiliarie, mentre le strutturali hanno sempre diametri superiori almeno a 0.3-0.4 mm.

La classificazione standard per le fibre sintetiche, data dalla EN 14889-2, distingue due categorie:

“macrofibre” - diametro >0.3 mm
“microfibre” - diametro <0.3 mm

Nella scheda tecnica di una fibra si può incontrare anche il “diametro equivalente”. In questo caso si intende il diametro del cerchio avente la stessa area della sezione della fibra considerata. Ad esempio, nel caso di una fibra a sezione rettangolare il diametro equivalente si calcola come il diametro di un cerchio di pari area.

### *Rapporto dimensionale*

Il rapporto dimensionale è calcolato come la proporzione tra la lunghezza di una fibra e il suo diametro (o diametro equivalente). E’ un parametro spesso trascurato ma che in realtà è utile, in alcuni tipi di fibre che vedremo tra breve, come misura del grado di “resistenza allo sfilamento”. La resistenza allo sfilamento è, come dice il nome stesso, la capacità della fibra di opporsi allo sfilamento, in altre parole di non essere rimossa dalla sua sede dopo che il calcestruzzo si è indurito e l’ha inglobata.

Nel caso di microfibre (che per definizione hanno diametri inferiori a 0.3 ma che di fatto nella stragrande maggioranza dei casi hanno diametri di qualche centesimo di millimetro) il rapporto dimensionale ha valori molto alti, che spesso superano 200-250. Per queste fibre la resistenza allo sfilamento è una caratteristica del tutto marginale, dato che la loro funzione non è strutturale.

Le fibre con un diametro equivalente maggiore di 0.5 mm, quindi filati piuttosto grossi, sono quasi sempre soggette a processi industriali che ne migliorano l’adesione grazie ad accorgimenti quali ondulazioni, irruvidimenti e zigrinature, sagomature particolari, ecc.. In questi casi il rapporto dimensionale è inferiore a 70-80 e la sua valutazione è secondaria dato che la resistenza allo sfilamento è dovuta principalmente a queste lavorazioni.

Il rapporto dimensionale è un parametro particolarmente interessante nel caso infine delle macrofibre strutturali sottili, aventi diametri più piccoli di 0.5 mm. Per questi tipi di prodotti la lavorabilità superficiale è ridotta e meno efficace. Il risultato è che si ricorre frequentemente a trefolatura del filato e si lavora per ottimizzare appunto il rapporto dimensionale: aumentando il rapporto dimensionale si ottiene una migliore resistenza allo sfilamento. Per questi tipi di fibre il rapporto dimensionale si aggira normalmente intorno al valore 100-110.

Da notare che da una semplice valutazione del rapporto dimensionale si è perfettamente in grado di dedurre la tipologia di fibra e classificarla anche in base alla sua funzione.

## GEOMETRIA

Parlare di geometria delle fibre spesso non ha molto senso se non nel caso di fibre polimeriche. Le fibre in acciaio sono esclusivamente costituite da filamenti singoli, eventualmente "attaccati" in fasci da qualche decina di fili per agevolare il trasporto e la movimentazione. Però al di là di qualche piccola variazione quanto alla sagoma (uncinate, ondulate, dritte, ecc.) nel complesso sono tutte concettualmente identiche! Stesso discorso ad esempio per le fibre in vetro, per le quali addirittura la cosa si semplifica ulteriormente dato che sono solo e sempre fili dritti più o meno sottili e più o meno lunghi.

Vediamo dunque le principali differenze per quanto riguarda le fibre polimeriche:

***Fibre monofilamento***
Sono fibre costituite da un singolo filo, più o meno rettilineo, generalmente di dimensioni significativamente più grandi delle multifilamento, lavorato per aumentarne l'aderenza alla matrice cementizia (zigrinature, uncini laterali, ondulazioni, forme a zig-zag, ecc.). Nel sacchetto si presentano come una moltitudine di singoli "aghi", sparpagliati in modo casuale tra loro.

Le fibre monofilamento ricevono spesso trattamenti meccanici dopo l'estrusione (per migliorarne le caratteristiche) quali ad esempio stirature per orientarne le catene polimeriche ed aumentare le resistenze, oppure trattamenti per aumentare la ruvidità superficiale e quindi l'ancoraggio al calcestruzzo.

Le monofilamento sono quasi esclusivamente (per non dire sempre!) fibre di "grandi" dimensioni, appartenenti alla categoria delle macro-fibre, e con lunghezze comprese tra 30 e 60 mm.

***Fibre multifilamento***
Fibre prodotte da estrusione di una moltitudine di piccoli filamenti rettilinei, poi tagliati a misura e insacchettati. Sono fibre che normalmente non vengono trattate dopo l'estrusione. Nel sacchetto si presentano come "ciuffetti" di minuscole fibre, soffici e flessibili.

Sono generalmente fibre di piccole dimensioni, micro-fibre, con diametri molto ridotti (spesso inferiori al decimo di millimetro!) e di lunghezza compresa tra 3 e 30 mm.

***Fibre trefolate***
Fibre prodotte da singoli filamenti (quindi di base sono delle semplici monofilamento) attorcigliati insieme in fasci, detti appunto "trefoli". Prima di essere tagliate alla lunghezza finale, sono molto simili ad una corda. Appartengono a questa categoria per esempio le READYMESH PF-540.

***Fibre fibrillate***
Le fibre fibrillate sono tecnicamente prodotte non per estrusione di uno o più filamenti (come le mono-filamento e le multi-filamento) ma bensì da un film sottile e continuo di polipropilene, che poi viene separato in striscie più piccole e successivamente "fibrillato" per realizzare la classica forma a "rete" quando la fibra viene "dilatata". La fibrillatura è dunque una procedura per produrre a basso costo dei filati polipropilenici, spesso impiegati negli imballaggi. Le fibre fibrillate tendono a sfaldarsi in singoli filamenti durante la miscelazione grazie all'azione meccanica del movimento degli inerti presenti nella miscela.

## RESISTENZA

La resistenza misura la capacità della fibra stessa di sopportare sollecitazioni di trazione longitudinali, normalmente misurata con il test descritto dalla norma EN 10002-1 (vedi sotto).

Il valore di "resistenza alla trazione" (o anche "tensione di rottura") che si trova nelle schede tecniche è rappresentativo delle informazioni riguardanti la bontà della fibra prima che sia inserita nel calcestruzzo. Essa non rappresenta dunque una misura della capacità della fibra di alterare il comportamento del manufatto in calcestruzzo fibrorinforzato sottoposto a sollecitazioni meccaniche (per questo esistono test specifici i cui risultati sovente non compaiono in scheda tecnica, tipo quello della norma EN 14651). Da cui si deduce che una comparazione delle fibre strutturali sulla base della semplice valutazione della resistenza non è per nulla veritiera circa le sue effettive capacità strutturali.

In linea teorica, la resistenza della fibra stessa ha una relazione diretta con la resistenza del calcestruzzo fibrorinforzato sottoposto a flessione, però l'alta resistenza da sola non è per nulla sufficiente a garantire anche ottime prestazioni del sistema fibra-calcestruzzo! La fibra strutturale, per definizione, deve opporsi all'aumento dell'apertura di fessura. Per realizzare questo obiettivo deve poter ovviamente essere resistente essa stessa, ma è anche molto importante il numero di fibre che stanno collaborando allo stesso obiettivo, quanto omogeneamente sono distribuite e quanto la loro forma o finitura superficiale si oppone allo sfilamento della fibra dalla sua sede.

La resistenza alla trazione della singola fibra è un parametro pressoché inutile nel caso delle fibre ausiliarie, infatti esse non esercitano la loro funzione per trazione e dunque una alta resistenza non sarebbe di alcun beneficio.

## DENSITÀ

La densità della fibra, a volte anche indicato come peso specifico, è una misura che deriva direttamente dal materiale di cui è costituita, espressa di solito in $kg/dm^3$ o $kg/m^3$. Fibre di acciaio hanno solitamente una densità di 7-8 $kg/dm^3$, tipica dell'acciaio, mentre fibre sintetiche hanno una densità di circa 0.9 $kg/dm^3$.

La densità è indicativa della tendenza alla segregazione della fibra nel calcestruzzo: fibre più pesanti del calcestruzzo (che ha una densità di circa 2.4 $kg/dm^3$) tenderanno a depositarsi sul fondo mentre fibre leggere avranno la naturale tendenza a muoversi verso l'alto. Di fatto questo fenomeno non ha molta rilevanza dato che il calcestruzzo è un composto viscoso, con molte parti solide al suo interno e la "migrazione" delle fibre al suo interno è decisamente difficoltosa anche in presenza di calcestruzzi fluidi.

# Quadro normativo

## MARCATURA CE PER FIBRE D'ACCIAIO (EN 14889-1)

La norma UNI EN 14889-1:2006 descrive e dettaglia le prove e le specifiche tecniche che le fibre di acciaio devono soddisfare per ottenere la famosa "marcatura CE", detta anche dichiarazione di conformità CE. La norma nel suo complesso contiene quindi le indicazioni circa i test da effettuare, i riferimenti alle norme tecniche che descrivono come eseguire i test prescritti, i valori limite che devono essere superati, il tipo di impasto da utilizzare per la realizzazione del calcestruzzo fibrorinforzato da testare e quali materie prime utilizzare, ecc.. Inoltre la norma dettaglia e classifica le varie tipologie di fibre d'acciaio, come già discusso nella sezione dedicata ai materiali.

Uno dei riferimenti più importanti contenuti in questa norma è certamente quello alla caratterizzazione degli effetti dell'addizione delle fibre alla resistenza a flessione del calcestruzzo. La norma in tal caso è la EN 14651 (vedi sotto).

## MARCATURA CE PER FIBRE SINTETICHE (EN 14889-2)

La norma EN 14889-2 rappresenta per le fibre sintetiche ciò che la 14889-1 è per le fibre d'acciaio! Si tratta anche in questo caso della dichiarazione di conformità CE. La norma sulle fibre sintetiche differenzia due metodi di certificazione distinti applicabili alle fibre: fibre per applicazioni generiche, il Sistema 3, e fibre per applicazioni strutturali, il Sistema 1.

### *SISTEMA 3*

La marcatura CE per le fibre sintetiche con il Sistema di certificazione "3" si basa sul presupposto che la fibra in questione non sarà utilizzata per scopi strutturali. I test più importanti da effettuare sono la prova di trazione sulla fibra (EN 10002-1) e il test sugli effetti della fibra sulla consistenza del calcestruzzo (EN 12350-3). Entrambi descritti in seguito.

In questa tipologia di certificazione la fibra è sottoposta a pochi test, semplici e poco costosi. Inoltre qualunque laboratorio tecnologico per materiali da costruzione può effettuare i test ed emettere il certificato. Il Sistema 3 è dunque un tipo di certificazione piuttosto agevole da ottenere: di fatto è una semplice autodichiarazione, rilasciata dal fornitore, del fatto che i valori riportati nella dichiarazione di prestazione sono veritieri. Inoltre non vi sono valori limite da rispettare o da superare, dunque qualunque fibra può ottenere la marcatura col Sistema 3.

### *SISTEMA 1*

La marcatura secondo la norma EN 14889-2 con il Sistema 1 è stata concepita per testare e certificare la compatibilità delle fibre per applicazioni strutturali. La procedura per ottenere questa certificazione è una diretta derivazione di quella utilizzata per certificare le fibre d'acciaio con la EN 14889-1.

A differenza della marcatura col Sistema 3, il Sistema 1 richiede che le prove siano effettuate da un organismo notificato con autorizzazione ministeriale e che i campioni di materiale siano prelevati da un ispettore di detto organismo direttamente presso il sito di produzione del fornitore. Oltre a tutti i test previsti per la Sistema 3, la 1 richiede anche la caratterizzazione del comportamento di un concio di trave sottoposto a flessione, secondo la norma EN 14651 (la stessa usata per le fibre d'acciaio). Questo test è costoso, complesso e lungo da ottenere. Inoltre a differenza del Sistema 3 in questo caso vi sono dei valori minimi da rispettare, quindi non tutte le fibre posso di fatto ottenere la marcatura per applicazioni strutturali.

In sintesi, questo tipo di certificazione è estremamente più prestigioso rispetto alla marcatura con sistema 3. Nonostante questo, l'unica vera differenza tra le due è un piccolo numerino scritto da qualche parte nella dichiarazione di prestazione o nella scheda tecnica (se presente). E' importante dunque saper distinguere le due tipologie e riconoscere quando una fibra è strutturale certificata e quando no.

## PRESCRIZIONI PER IL MIX DESIGN (EN 14845-1)

Questa normativa definisce le materie prime da impiegare per la realizzazione degli impasti di calcestruzzo fibrorinforzato, il mix design del conglomerato, gli additivi da utilizzare, e prescrive come si realizzano la miscelazione e la successiva stagionatura. Questa norma fa sì che i test per la marcatura EN 14889-1 e -2 siano effettuati sempre con le stesse modalità e a partire dallo stesso calcestruzzo (almeno in linea teorica).

## EFFETTO SULLA CONSISTENZA (EN 12350-3)

La marcatura CE per le fibre sintetiche prescrive l'esecuzione della misurazione della consistenza del calcestruzzo fresco su due miscele: una addizionata con una determinata quantità di fibre e la stessa formula senza fibre. La differenza tra consistenza del calcestruzzo con fibre rispetto a quello senza fibre indica l'effetto dell'introduzione di fibre nella miscela. Questo valore è particolarmente interessante per i pavimentisti e coloro che dovranno "lavorare" il calcestruzzo fresco.

La tecnica per effettuare la prova della consistenza del calcestruzzo fresco è quella che in gergo tecnico si dice anche "prova di Vebè", definita dalla norma EN 12350-3. Per effettuare questa prova, si dispone un cono normalizzato di calcestruzzo fresco (cono di Abrams) su una piastra circolare, la piastra viene fatta vibrare con una procedura ben determinata e si misura il tempo che il

calcestruzzo impiega ad “espandersi” oltre un certo raggio. Minore è il tempo misurato e minore sarà la consistenza del calcestruzzo.

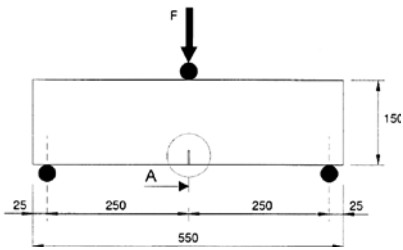
Il valore riportato nella dichiarazione di prestazione rilasciato dal laboratorio è la differenza (misurata in secondi) tra il tempo di Vebè riscontrato con la miscela senza fibre e quello con la miscela addizionata con fibre. Minore è questa differenza e minore saranno gli effetti dell’addizione delle fibre al calcestruzzo.

## RESISTENZA ALLA TRAZIONE (EN 10002-1)

La resistenza alla trazione della singola fibra, normalmente riportata in scheda tecnica, effettuata secondo la norma EN 10002-1 è una misura effettuata sulla fibra da sola, prima che venga inserita nel calcestruzzo.

La tensione di rottura è misurata inserendo la fibra in una macchina che allunga la fibra fino a romperla. La forza che la macchina ha dovuto esercitare per arrivare a rottura è divisa per la superficie della sezione della fibra stessa, ottenendo una quindi una tensione. L’unità di misura è spesso indicata in MPa (megapascal) o anche $N/mm^2$, le due unità di misura sono equivalenti.

## RESISTENZA ALLA FLESSIONE SU TRAVE (EN 14651)

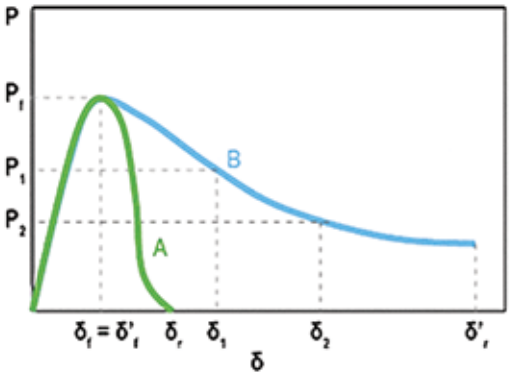



Con questo test si misura la resistenza alla flessione (e per estrapolazione si misura anche la resistenza alla trazione) di un travetto di calcestruzzo addizionato con fibre strutturali. Il test è prescritto sia nella marcatura CE delle fibre d’acciaio che di quelle sintetiche strutturali (Sistema 1).

Per l’esecuzione del test si utilizza una speciale attrezzatura che applica una forza sul centro di un travetto pre-fessurato all’estradosso (il lato inferiore) e poggiato su due supporti laterali. L’esercizio della forza sviluppa una tensione di flessione che fratturerà il concio al centro.

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 sotto. 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 fessurasse. 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 CMOD1 e a CMOD4, cioè quando l'apertura di fessura all'estradosso è aumentata rispettivamente di 0.5 mm e di 3.5 mm rispetto alla situazione iniziale. 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.

## TEST SU PIASTRA QUADRATA (EN 14488-5)

Diverse sono le versioni del test della flessione su piastra, a seconda delle normative applicate. Lo standard europeo è descritto nella norma EN 14488-5. Questa norma prevede la realizzazione di un provino piatto di 60x60 cm di lato e spessore 10 cm. Il provino è poggiato sul perimetro e una pressa lo preme al centro, sino a completa rottura.

Il test della resistenza alla flessione su piastra quadrata è solitamente prescritto dai progettisti nel caso di spritz-beton strutturale in galleria.

Questa prova di laboratorio è infatti stata concepita per simulare gli effetti di un cedimento nella roccia in una galleria, dove all'interno si è eseguito un rivestimento con spritz-beton. In una situazione simile infatti si ha una lastra di calcestruzzo sulla quale viene esercitato una pressione.

Da notare che il test della piastra quadrata non è prescritto dalla norma EN 14889 sulle fibre strutturali, quindi non è indispensabile eseguirlo ai fini della marcatura CE e i valori ottenuti non sono riportati nella dichiarazione di conformità CE.

## EVOLUZIONE FUTURA

Sembra che il futuro dei calcestruzzi fibrorinforzati debba cambiare nel giro di qualche anno, a giudicare dai segnali inviati dai legislatori nazionali ed europei. Sempre più infatti la procedura per l'utilizzo delle fibre sarà quello per cui il progettista non dirà più quante e quali fibre utilizzare in una certa opera, ma bensì prescriverà nel suo capitolato il tipo di calcestruzzo da utilizzare.

Spieghiamo meglio: negli anni '90 si è assistito in Italia ad una transizione dal tradizionale calcestruzzo "a dosaggio" al calcestruzzo "a resistenza". La situazione di mercato iniziale vedeva le imprese ordinare il calcestruzzo all'impianto di betonaggio indicandogli direttamente quanti kg di cemento usare nella ricetta; a seguito del cambio normativo, questa pratica si è interrotta e le imprese hanno cominciato a ordinare il calcestruzzo richiedendone la prestazione, incuranti di quale fosse la ricetta e di quanti kg di cemento si utilizzassero. Era diventato compito dell'impianto di betonaggio sapere come ottenere quella prestazione e garantirla.

Allo stesso modo, con il calcestruzzo fibrorinforzato, la situazione probabilmente subirà una evoluzione simile, nel corso dei prossimi anni. Sono già descritte, da recenti normative, delle classi di "tenacità" del sistema fibrorinforzato. In base a queste indicazioni un calcestruzzo è classificato in base alla resistenza massima raggiunga nel test della resistenza a flessione, e dall'andamento del comportamento nel tratto post-fessurativo.

# Domande e risposte

## LE FIBRE NON SI MESCOLANO BENE NEL CALCESTRUZZO, PERCHE'?

Le fibre per calcestruzzo, come ogni additivo, per funzionare correttamente deve essere distribuito e diffuso il più omogeneamente possibile in tutta la matrice del conglomerato. La mancanza o l'errata miscelazione comporta seri rischi in termini di estetica o di prestazioni meccaniche non soddisfacenti localizzate laddove si venisse a creare una zona con una percentuale in volume troppo elevata di fibre. Vediamo alcune cause tipiche di una non corretta miscelazione:

### *Errato caricamento delle fibre*

Le fibre, specialmente le macro-fibre, se caricate nella miscelatrice o nell'auto-betoniera vuota, prima di aver caricato almeno gli aggregati in betoniera o nel mescolatore, potrebbero creare dei veri e propri "grovigli" che poi non si riescono più a sciogliere durante la miscelazione normale. Una situazione simile, anche se improbabile, si potrebbe verificare addizionando le fibre a fine carico, come ultimo elemento, troppo velocemente. In questo caso tutte le fibre sarebbero inglobate nella pasta cementizia in quantità notevole in poco volume, aumentando il rischio che si creino grovigli localizzati.

La manovra corretta è: distribuire le fibre sul nastro trasportatore durante il carico degli inerti in betoniera o nel mescolatore. Nel caso questo non fosse possibile, addizionare le fibre direttamente in betoniera a fine carico ma avendo cura di attendere almeno 30 secondi tra l'inserimento di un sacchetto ed il successivo.

### *Non si è mescolato per sufficiente tempo*

Un operatore di autobetoniera potrebbe non aver "miscelato" per sufficiente tempo, oppure il cantiere era troppo vicino al punto di carico e la betoniera girava troppo lentamente. La manovra corretta prevede, al termine del caricamento delle fibre in betoniera, di mescolare per almeno 1 minuto per ogni metro cubo di calcestruzzo presente in betoniera, alla massima velocità di rotazione del tamburo.

### *Errata consistenza del calcestruzzo*

Un calcestruzzo troppo duro (S1-S2) potrebbe dare problemi di miscelazione delle fibre. Questa casistica non è concepibile quando si parla di fibre per pavimenti industriali, dato che il calcestruzzo prodotto per la realizzazione di pavimenti è sicuramente un S4 o addirittura S5.

Altro caso è quello di un calcestruzzo troppo fluido, nel quale addirittura le fibre possono tendere a galleggiare. Questa è una casistica estremamente rara e poco probabile, dato che il calcestruzzo in questione dovrebbe essere talmente fluido da essere simile ad una boiacca.

***Betoniera troppo vecchia***

Qualora l'elica all'interno del tamburo della betoniera fosse consumata e non riesca a mescolare a dovere il calcestruzzo, alcuni agglomerati di fibre potrebbero formarsi e non essere dissipati durante la miscelazione. E' un caso molto raro ma di questi tempi, in cui gli imprenditori del mondo del calcestruzzo sono afflitti da una grave crisi e avranno poca voglia di rinnovare il parco automezzo, potrebbe diventare una casistica leggermente più probabile.

## IL PAVIMENTO È AFFETTO DA AFFIORAMENTO SUPERFICIALE

Le fibre sono alloggiate nella pasta del calcestruzzo. Il volume di pasta del calcestruzzo è generalmente dimensionato con un certo quantitativo di cemento, di acqua e additivo al fine di possedere un preciso rapporto a/c. Introducendo le fibre nell'impasto si modifica il volume della frazione inerte a scapito della lavorabilità che, purtroppo, viene spesso ripristinata aggiungendo acqua peggiorando il rapporto a/c. Tale attività modifica in negativo le prestazioni meccaniche della pasta e, soprattutto, penalizza la capacità adesiva della stessa e, quindi, la capacità di opporsi allo sfilamento delle fibre. Qualora non vengano messe in atto le dovute precauzioni reologiche in fase di prequalifica del composito fibroso, le penalizzazioni del rapporto a/c si manifestano con affioramenti di fibre che tendono a sfilarsi soprattutto in superficie laddove, per effetto della sedimentazione e del bleeding, il rapporto a/c è già fisicamente peggiorativo rispetto alla restante sezione. Inoltre, qualora le operazioni di frattazzatura e lisciatura siano eseguite con apporto di ulteriore acqua, si penalizza ulteriormente il rapporto a/c e si hanno gli affioramenti.

E' quindi ragionevole affermare che gli affioramenti sono generati da errata valutazione dei corretti volumi di pasta, del rapporto a/c, di una sua penalizzazione apportata durante le operazioni di lisciatura o dalla sommatoria di tali evenienze.

Quando le fibre affiorano sulla superficie del pavimento, specialmente lungo il perimetro, intorno a pilastri e pozzetti e in genere in tutte quelle posizioni in cui le eliche dell'elicottero (frattazzatrice meccanica ad eliche) non sono riuscite ad appiattirle nello spessore, il motivo dipende dal fatto che in quelle posizioni la finitura superficiale è fatta completamente a mano con apporto di ulteriore acqua per promuovere la formazione di boiacca. Questo fenomeno è del tutto normale e purtroppo intrinseco nella natura dei pavimenti fibrorinforzati con fibre strutturali. Si deve adeguatamente avvisare il cliente prima dell'esecuzione del pavimento dandogli la giusta aspettativa. E' possibile togliere l'80% del problema estetico, bruciando con un bruciatore da guaine (anche detto "boffa") le fibre fuoriuscenti. Nei pavimenti esterni, nelle stesse posizioni, l'asportazione delle fibre fuoriuscenti è aiutata dai raggi UV. In ogni caso, il traffico veicolare e pedonale aiuterà in poco tempo a rimuovere le fibre affioranti.

Se il fenomeno dell'affioramento dovesse presentarsi in misura molto massiccia e in zone distanti da pilastri, bordi e angoli, potrebbe essere successo che il pavimentista abbia sbagliato a valutare il tempo di presa del calcestruzzo e abbia frattazzato il pavimento in ritardo, quando la superficie era già troppo dura.

## POSSO UTILIZZARE LE FIBRE IN UN PAVIMENTO "SCOPATO"?

Assolutamente NO!

L'effetto "scopato" (o rigato) è ottenuto facendo passare una normale scopa sulla superficie del calcestruzzo non ancora indurito completamente. Questa operazione lascia dei piccoli solchi sulla superficie, aumentandone l'attrito. L'azione della "scopatura" su un pavimento fibrorinforzato, però, è molto deleteria. Il passaggio della scopa infatti ha lo stesso effetto di un pettine che pettina le fibre e le farebbe affiorare in grande quantità, con pessime ripercussioni sull'estetica del pavimento.

## SI POSSONO MISCELARE PIÙ TIPI DI FIBRE NELLO STESSO CALCESTRUZZO?

Certamente si!

La presenza di diversi tipi di fibra normalmente non da problemi. Ciò che di solito si tende a fare è di combinare le proprietà antifessurative delle fibre ausiliarie con le proprietà strutturali delle macrofibre, appunto, strutturali per avere una combinazione di benefici.

Nel caso dei pavimenti industriali, ad esempio, la combinazione delle READYMESH PF-540 con le READYMESH PM-180 non solo è benefica ma è anche raccomandabile!

In questo caso, dato che le fibre strutturali hanno un effetto benefico anche per quanto riguarda il contrasto al fenomeno delle fessurazioni da ritiro, il consiglio è quello di utilizzare solamente 0,5 kg/$m^3$ anziché i classici 0,75 o 1,0 kg/$m^3$.

## Nota di cautela legale

Le indicazioni tecniche e d'impiego, contenute nel presente documento, sono basate sulla nostra esperienza, nonché sulla scorta dello stato attuale delle conoscenze tecnologiche e pratiche in argomento. Come tali non sono in alcun modo impegnative e non stabiliscono relazione alcuna, legale e contrattuale, né obbligo accessorio in ordine ad eventuali contratti di compravendita. Le indicazioni di cui trattasi non comportano quindi dispensa alcuna dalla responsabilità, esclusiva dell'acquirente, di verificare direttamente e personalmente i prodotti che ritiene di utilizzare, per quanto attiene l'idoneità degli stessi, relativamente all'uso previsto.

**©2016 Azichem srl** - Tutti i diritti riservati

**READYMESH**
**www.readymesh.it**

è un prodotto della linea
**“INFRATECH”**

azichem®
PRODOTTI SPECIALI PER L'EDILIZIA E LA BIOEDILIZIA

**Azichem srl -** Via Giovanni Gentile 16/A - 46044 Goito (MN) Italy
Tel. +39 0376 604185 - +39 0376 604365 - Fax +39 0376 604398
**info@azichem.com - www.azichem.com**