

Fibra o tondino?

Le fibre non sostituiscono l'armatura di forza, ma funzionano nel controllo del ritiro plastico, nei piccoli spessori e anche per eliminare il pericolo di "scoppio" in caso di incendio

Alberto Dal Lago*

Quello dei calcestruzzi armati con fibre è uno dei molti campi di applicazione di tecnologie innovative che, da sempre, creano attese, alimentano studi e sperimentazioni, formano "scuole di pensiero".

Il tema è di per sé stimolante, soprattutto per la gamma di prestazioni prefigurabili nei calcestruzzi: dalla sostituzione, almeno parziale dell'armatura tradizionale, al controllo delle qualità plastiche etc.

Come spesso succede nei settori non consolidati, il know how è disperso tra istituti di prova, laboratori di produttori, studiosi, con una letteratura spesso non confrontabile e "orientata" a vario titolo.

In questo contesto vogliamo prefigurare con questo articolo un primo contributo a un dibattito su questo tema, che rappresenta una precisa visione tecnica, che potrà essere confrontata con tutto il corpo di dati a oggi disponibili. G.B.

Partendo dalla reminiscenza storica tra argilla e paglia il connubio fibre e calcestruzzo sembra al primo impatto quanto di più avvincente si possa ipotizzare per l'innovazione tecnologica, ma rischia, se non viene inquadrata nei limiti di una parziale e specifica utilizzazione, di diventare causa di disinformazione.

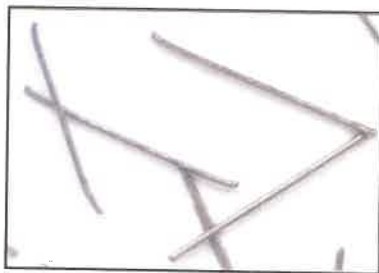
Certo in buona fede non pochi produttori di fibre si sono lasciati trascinare in sperimentazioni da cui hanno tratto risultanze non sempre corrette, per cui ritengo che occorra fare chiarezza sperando di riusci-

re a precisare i presupposti tecnici di un'utilizzazione valida delle fibre, pronto comunque a rivedere le mie convinzioni, ringraziando quanti vorranno correggerle o perfezionarle.

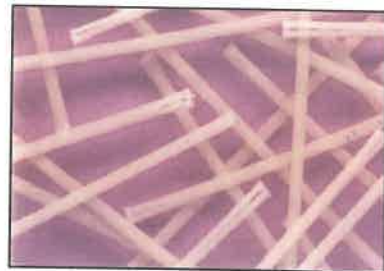
Le fibre vanno caratterizzate, per essere utilizzate insieme al calcestruzzo, da un primo parametro fondamentale che è il modulo elastico.

Ci sono fibre che hanno un modulo elastico maggiore di quello del calcestruzzo, e in genere si avvicinano al modulo elastico dell'acciaio, 10 - 6 volte superiore a quello del calcestruzzo (la variabilità non è dovuta alla fibra, ma al calcestruzzo).

In questo gruppo di fibre che chiameremo "metalliche", oltre naturalmente alle fibre in



Fibre metalliche. Scala 1:1



Fibre sintetiche. Scala 5:1

acciaio ci sono anche quelle al carbonio, al titanio, ecc.

Un secondo gruppo, è costituito da quelle fibre che hanno un modulo elastico di 7- 15 volte inferiore a quello del calcestruzzo; sono in genere quelle chiamate fibre sintetiche, tra cui si possono inserire quelle in

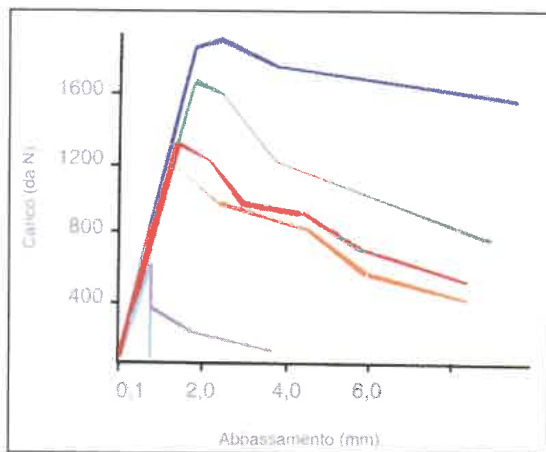
* ingegnere, architetto, DLC

polipropilene o in polivinil alcool, più o meno trattate con fibrillazione e con altri processi chimici per poter aumentare la resistenza e giustificare la denominazione di "fibre sintetiche strutturali".

E' possibile quindi considerare 2 gruppi di fibre, il primo quello delle fibre "metalliche" con un modulo elastico 10 volte maggiore di quello del calcestruzzo, il secondo quello delle fibre sintetiche con modulo elastico 10 volte inferiore a quello del calcestruzzo. Pensiamo ad un provino parallelepipedo di calcestruzzo sottoposto ad una trazione e mettiamo al centro una fibra.

Sappiamo che la fibra se deve sostituire l'armatura trazionale del c.a. deve assicurare al

Curva carico-spostamento di differenti tipi di fibre sintetiche con modulo elastico molto simile, ma con differenti resistenze a rottura.



provino la sicurezza a trazione, senza tener conto, per norma, della resistenza a trazione che ha il calcestruzzo.

Se pensiamo di mettere progressivamente in trazione il provino, con la premessa che le deformazioni del provino sono uguali alle deformazioni della fibra, possiamo stabilire che:

- le fibre metalliche, con modulo elastico 10 volte maggiore, omogeneizzate, aumentano l'area resistente, del valore area della fibra x 9;
 - le fibre sintetiche con modulo elastico 10 volte inferiore, omogeneizzate, riducono l'area resistente del valore area della fibra x 9.
- Ne risulta immediatamente una affermazione che è alla base di ogni successiva considerazione, e cioè che le fibre "metalliche" rinforzano la sezione, quelle sintetiche la indeboliscono.

Con l'aggiunta, quindi, di fibre metalliche, posso avere nel provino resistenze maggiori a compressione o a trazione, con le fibre sintetiche resistenze minori a compressione

Portiamo a termine la nostra prova a trazione, supponendo che il provino di calcestruzzo sia di 10x10 cm e la fibra di 1 cm² (concentriamo idealmente in una tutte le fibre).

Se la resistenza a rottura del calcestruzzo è di 4 N/mm²:

- il provino senza fibre si rompe con un tiro di 40 kN;
- il provino con le fibre metalliche si rompe a 43,6 kN;
- il provino con le fibre sintetiche si rompe a 36,4 kN.

La percentuale efficace di fibre in entrambi i casi è l'1% (su 100 cm² di cls, 1 cm² di fibre). Le fibre metalliche alla rottura del calcestruzzo hanno una tensione circa di 40 N/mm².

Le fibre sintetiche alla rottura del calcestruzzo hanno una tensione di 0,4 N/mm².

Entrambe le fibre ci consentono di proseguire la nostra prova, aumentando la trazione dopo che il calcestruzzo si è fessurato.

E' evidente che, all'istante della fessurazione del calcestruzzo, la trazione viene presa totalmente dalle fibre, ed entrambi i tipi, avendo pari area, hanno una tensione di $40 \cdot 10^3 / 100 \text{ mm}^2 = 400 \text{ N/mm}^2$

Si evidenzia a rottura del calcestruzzo la seconda caratteristica essenziale delle fibre, la sua resistenza, che è assolutamente indipendente dal modulo elastico. (come ben risulta nel raffronto tra acciaio normale e armonico, il primo a parità di modulo elastico, avendo una resistenza minore di 5 volte l'altro).

Il modulo elastico differente porta le due parti del provino a staccarsi di entità differenti, e la resistenza a trazione del provino viene, dopo la rottura del calcestruzzo, affidata completamente alle fibre. Supponiamo, senza essere lontani dal vero, che le fibre abbiano la stessa resistenza a rottura, per esempio quella dell'acciaio, cioè 500 N/mm².

I 2 provini possono entrambi resistere fino allo stesso tiro di $500 \cdot 100 / 1000 = 50 \text{ kN}$. La conclusione è molto semplice: nel calcestruzzo fibroarmato la sicurezza a rottura può dipendere esclusivamente dalla resistenza a rottura delle fibre, ma la fessurazione è poco o per nulla influenzata dal modulo elastico delle fibre.

tradizionale potrebbe quindi concettualmente essere sostituita da fibre metalliche, che in elevate e problematiche quantità garantirebbero la verifica a fessurazione, le fibre sintetiche invece non possono minimamente migliorare la resistenza a fessurazione del calcestruzzo.

Viene ora in gioco il terzo parametro, cioè il costo, che decide dopo la "possibilità" anche la "convenienza".

Precisiamo innanzitutto, che le fibre, quando sono diffuse nel calcestruzzo, hanno inevitabilmente una sola delle tre dimensioni spaziali utili.

E' quindi evidente che in ogni sezione nel nostro provino, al posto di una barra di 1 cm² di acciaio (1 Ø 12 circa) posso ipotizzare la presenza di $1 \cdot 3 = 3$ cm² di fibra "metallica".

Inoltre, statisticamente, ci sono fibre che, pur essendo nella sezione, non possono entrare in tiro, perché non ancorate.

Se i necessari ancoraggi terminali riguardano, per esempio, il 20% della lunghezza delle fibre è di tale entità che occorrerà aumentare la sezione complessiva della fibra, che diventa quindi di $3 \cdot 1,2 = 3,6$ cm². Inoltre, la distribuzione statistica delle fibre non può essere perfetta, tanto più quanto più è ridotto il numero delle fibre. Le fibre al carbonio o quelle sintetiche sono in numero effettivamente elevato per cui con uno spessore di 0,1 mm², per avere 1 cm² ce ne sono mille; le fibre metalliche di spessore 1 mm², sono quindi in numero 10 volte minore.

E', quindi, opportuno utilizzare un coefficiente di disomogeneità, per esempio un coefficiente 1,2 che porta la sezione totale a $3,6 \cdot 1,2 = 4,32$ cm².

La percentuale di effettiva quantità di fibra sulla quantità di calcestruzzo è di 4,32%.

Ipotizzando che il prezzo a kg delle fibre di acciaio sia almeno doppio del prezzo delle armature ordinarie (se non altro perché le fibre metalliche in acciaio devono essere zincate), il costo come ordine di grandezza dell'armatura di fibra d'acciaio è circa 8-10 volte il costo dell'armatura tradizionale equivalente.

Tale valore può essere accettato solo ed esclusivamente se si trova un rilevante risparmio sulla mano d'opera.

Nella pratica, si utilizza nel c.a. l'armatura

non per la trazione pura, ma per la flessione degli elementi, il che porta ad aumentare notevolmente l'incidenza del costo delle fibre, che vanno ad interessare tutto il volume di calcestruzzo, e non solo del calcestruzzo che risulta in trazione, con una previsione quindi che dipende dal prodotto, ma che porta a elevare grandemente il rapporto tra i costi, rendendo poco plausibile la ricerca di una convenienza.

Analogo ragionamento può essere fatto per le fibre al carbonio, il cui rapporto di costo con l'armatura tradizionale è anche maggiore, per via del più elevato costo del materiale.

Quello che si può ipotizzare e che viene in genere proposto, non è la sostituzione di tutte le armature con le fibre, ma la sostituzione con fibre di quella armatura di ripartizione, di confinamento, che spesso è realizzata con rete elettrosaldata.

Per esempio dove nella sezione corrente di una trave occorre posizionare l'armatura minima di staffatura, questa può essere sostituita da armatura in fibra.

In genere, può essere interessante la sostituzione della rete di diffusione dei carichi anche se il terzo parametro, cioè la convenienza all'uso delle fibre, va valutato certamente caso per caso, avendo la sensazione che l'uso di fibre metalliche possa difficilmente risultare conveniente.

Occorre all'interno delle fibre a modulo elastico elevato peraltro di problematica convenienza distinguere pregi e difetti di quelle d'acciaio e di quelle al carbonio, o simili.

Le fibre di acciaio, data per conseguibile la durabilità affidata alla zincatura e l'efficienza degli ancoraggi terminali, hanno il grande inconveniente di consumare le pale di mescolazione e le camice del mescolatore, e di creare un impasto che toglie slump al calcestruzzo, con tutte le conseguenze che ne possono derivare alla lavorabilità e alla resistenza.

Le fibre al carbonio invece, penalizzate da un costo ben più elevato, ma con resistenze 3 o 4 volte superiori, non danno problemi di lavorabilità o di consumo degli impianti, ma hanno il loro punto debole nella resistenza al fuoco, che è praticamente inesistente; come armatura di forza la fibra al carbonio non è praticamente utilizzabile,

mentre come armatura di diffusione non dovrebbe entrare nella verifica di resistenza al fuoco.

Le fibre al carbonio, difficilmente impiegabili se disperse nel calcestruzzo, hanno invece un validissimo impiego quando sono riunite in un nastro al carbonio, che può essere posizionato all'interno del calcestruzzo in sostituzione dell'armatura di forza, o come avviene più spesso, può essere posizionato



Placcaggio di una trave dello Stadio San Siro con rete di fibre al carbonio e malta epossidica.

all'esterno di strutture esistenti per dare maggior sicurezza alla struttura.

Risolve la protezione al fuoco, magari con successive vernici intumescenti, la tecnica del "placcaggio" delle travi per rinforzarle con nastri al carbonio è tecnica ormai consolidata e applicata.

Ma ritorniamo alle fibre, per alcune considerazioni sul provino. Se invece di mettere il 4,32% di fibre (valore molto elevato) ne mettessi la metà, avrei un'area efficiente di $0,5 \text{ cm}^2$.

Nella prova a trazione, ad una trazione di poco distante dai 40 kN, il calcestruzzo si fessura, ma le fibre che vi sono inserite si rompono nello stesso istante in cui si rompe il calcestruzzo, sia che siano metalliche che sintetiche.

Si evidenzia quindi un settore d'impiego delle fibre, sia quelle metalliche che sintetiche, dove il dosaggio delle fibre è ridotto (2% - 4%), e le fibre assicurano la verifica a rottura per trazione del calcestruzzo, una volta comunque che le trazioni siano così limitate da non dar luogo a fessurazioni.

Il percorso logico è il seguente:

- la norma dice che non si può fare affidamento sulla resistenza a trazione del calce-

struzzo;

- l'armatura che devo mettere mi incrementa poco o mi decrementa poco la resistenza a fessurazione, ma ne assicura la resistenza allo stato limite di rottura;

- le fibre possono assicurarmi la resistenza a rottura in sostituzione dell'armatura.

E' come se ipotizzassi, per il mio provino, una trazione per esempio di 20 kN cioè con coefficiente di sicurezza 2 alla rottura. Per norma, devo mettere un'armatura di $40.000 / 500 = 80 \text{ mm}^2 = 0,8 \text{ cm}^2$ sostituibili con $4,32 \cdot 0,8 = 3,46 \text{ cm}^2$ di fibra (metallica o sintetica) pari ad un dosaggio di 3,46% arrotondato a 3,5%.

Supponiamo di avere una trazione di 10 kN, e avremmo un dosaggio del 1,75%.

Esiste, in definitiva, un'interessante possibilità d'impiego delle fibre, quando si hanno trazioni ridotte per cui le fibre possono assicurare quella sicurezza alla rottura che non può essere affidata al solo calcestruzzo, rimanendo comunque praticamente impossibile usare le fibre per elevare il coefficiente di sicurezza a fessurazione.

Questo uso delle fibre, per cui è possibile utilizzare sia quelle metalliche che sintetiche, dove la quantità è funzione della resistenza delle fibre, si presenta problematico perché non è normato l'uso delle fibre, per cui ci si può riferire, almeno per il prefabbricato, a quella clausola che dice che possono essere utilizzati criteri di calcolo e/o materiali non normati, purché nelle prove si ottenga una sicurezza alla rottura non inferiore a 2,5.

E' come se per il nostro provino a rottura a 40 kN la tensione di trazione d'esercizio fosse al massimo $4 / 2,5 = 1,6 \text{ N/mm}^2$, ferma restando la quantità di fibra del 3,5% e la necessità di un riscontro sperimentale.

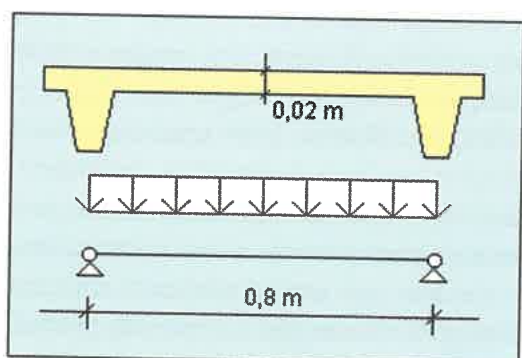
Per tensioni d'esercizio inferiori, la percentuale di fibra può proporzionalmente diminuire.

L'utilizzazione che si presenta interessante per le fibre (in questo caso con il vantaggio di quelle sintetiche di avere un costo ben più ridotto, e un facile inserimento nell'impasto), è per la resistenza a flessione, che è circa 1,2 volte maggiore della resistenza a trazione.

Si può quindi attendersi, sempre come

ordine di grandezza, una trazione di rottura per il calcestruzzo di $4,8 \text{ N/mm}^2$ e quindi una massima trazione in esercizio di $1,92 \text{ N/mm}^2$ con una percentuale massima di fibra del 4,2% (percentuali maggiori non servirebbero).

Diventa allora molto interessante anche perché certamente economico l'utilizzo delle fibre per ridotti spessori di calcestruzzo, cioè per spessori inferiori ai 5 cm, dove non è più utilizzabile un'armatura a rete perché non avrebbe il necessario ricoprimento.

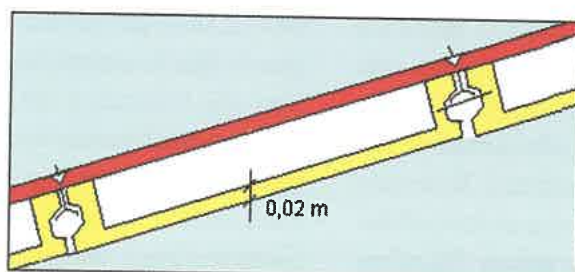
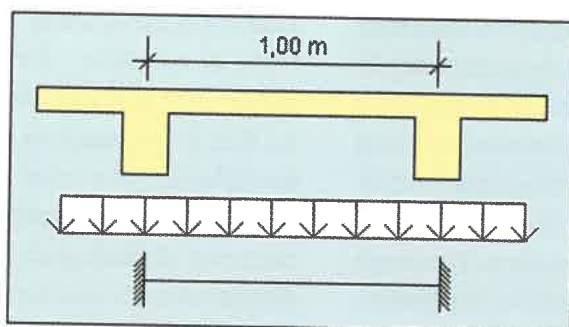


La riduzione di spessore, per esempio per una soletta di 2 cm su 80 cm di appoggio, consente, riducendo di 2,5 volte il volume di calcestruzzo, di minimizzare i costi complessivi del manufatto, a parità di dosaggio. Con una percentuale di fibra del 4,2% (la massima percentuale possibile per flessione associata alla massima trazione), a sezione interamente reagente, il carico ammissibile è di $1,1 \text{ kN/m}^2$ che può essere il normale carico di neve.

Si può aggiungere che la fibra è presente anche al momento di incastro, nel qual caso il carico utile

aumenta del 50% o la luce del 22%, cioè 1 m.

Particolarmente interessante è l'utilizzo delle fibre in solette di piccolo spessore quando queste richiedono nella fase di montaggio la pedonabilità, mentre in esercizio non ricevono carichi.



Coppella gettata in verticale, con armatura in fibre sintetiche con funzione di rete protettiva per gli spessori più ridotti

*Prova di carico di cappel-
le armate con fibra e con
barre tradizionali nei tra-
vetti. La fibra si rivela
necessaria alla prova di
pedonabilità.*



In tal caso, possiamo garantire che i 200 kg su orma 20×20 del carico mobile, vengano ad essere sostenuti per sicurezza solo dalla fibra, ma con un coefficiente di sicurezza ridotto, per esempio 1,5 purché in caso di comparsa di cavillature per il passaggio dei montatori si sia disponibili a sostituire l'elemento fessurato.

Se si facesse l'indispensabile prova a rottura, necessaria per norma, per esempio con un dosaggio del 1,2% (che corrisponde circa a 10 kg/m^2 di fibra sintetica e a 90



kg/m^2 di fibra metallica) potremmo insomma aspettarci che il calcestruzzo si fessuri sempre a $4,8 \text{ N/mm}^2$, la soletta si rompa e le fibre ... anche!

Con buona pace della schiera di tecnologi che si affannano a fare sperimentazioni, con una percentuale "usuale" di fibra quando questa non dà alcun incremento alla resistenza a trazione del calcestruzzo, il più delle fibre metalliche e il meno delle fibre sintetiche essendo irrilevante, e comunque inglobato nell'ampia gaussiana del valore della resistenza a trazione.

Ma allora perché mettere le fibre?

La prima e corretta risposta è "per sicu-

rezza" oltre che per norma, ma poi sembra doveroso analizzare quale mancanza di sicurezza ci si può presentare.

Scopriamo quindi che il fenomeno del ritiro plastico e idraulico può indurre nel nostro manufatto tensioni e/o fessurazioni di ritiro, che nulla hanno a che fare con le trazioni di flessione sotto i carichi.

Se non ci fosse una rete o appunto la fibra, la nostra soletta, con fessure di ritiro non potrebbe sopportare alcun carico.

L'armatura ridà sicurezza anche se non toglie la fessura.

In quella fase di maturazione definita plastica in cui il modulo di elasticità del calcestruzzo è molto ridotto (per cui la fibra agisce da vera e propria armatura di diffusione degli sforzi, evitando di concentrare le contrazioni su una fessura) la fibra, meglio della rete, la fibra sintetica più che la metallica perché questa è meno diffusa, assorbe gli sforzi di trazione dovuti al ritiro (sempre che le fibre non richiedano più acqua, dando maggior ritiro).

Abbiamo qui introdotto una nuova, interessante ed economica utilizzazione della fibra, cioè quella di evitare fessure di ritiro in fase plastica; la fibra quindi può meglio garantire assenza di fessurazioni da ritiro.

Oltre a manufatti di ridotto spessore, l'uso delle fibre può avere quindi un interessante impiego nei pavimenti industriali, dove il vero pericolo non sono le fessure a flessione, ma il ritiro in fase plastica e le cavillature conseguenti.

Come ulteriore prospettiva di utilizzo delle fibre, si presenta la possibilità di sfruttare la mancanza di resistenza al fuoco di quelle sintetiche che, anche in bassi dosaggi, permettono di evitare che il calcestruzzo in caso di incendio possa "scoppiare", la pressione interna del vapor d'acqua avendo modo di raggiungere l'esterno attraverso i minicondotti che le fibre, diventando aeriformi, creano.

Le fotografie qui riportate, mostrano l'eccezionale risultato ottenuto su provini di calcestruzzo imbevuti d'acqua con fibre sintetiche che, sottoposti al fuoco standard, sono rimasti praticamente illesi (gli spigoli si sono rovinati dopo 240 minuti di fuoco) quando invece i provini di calcestruzzo normale sono scoppiati in numerosi frammenti, e i provini con additivo

areante si sono spezzati in 3 parti.

Con l'aggiunta sistematica nel metro cubo di calcestruzzo di 3 kg di fibra sintetica, si può così eliminare ogni pericolo di scoppio delle strutture in caso d'incendio.

Risultato questo, evidentemente, di eccezionale importanza.



Provinci in C.A.



Provinci in C.A. con areante.



Provinci in C.A. con fibre sintetiche X FIBER 54 dosate a 2 kg/m³.