

COMPONENTI IN FRP (FIBER REINFORCED POLYMERS)

e applicazioni in ambito edilizio

Enrico Sergio Mazzucchelli – Karin Bottelli, Politecnico di Milano – Dip. ABC

L'esigenza di disporre di materiali leggeri, meccanicamente resistenti e flessibili, ha portato negli anni allo sviluppo dei cosiddetti "compositi", cioè materiali costituiti da una matrice con l'aggiunta di particelle, fibre corte o lunghe, che possono essere orientate e/o allineate unidirezionalmente. I vantaggi di questi materiali rispetto a quelli tradizionali non si limitano solo agli aspetti di resistenza meccanica e leggerezza, ma anche alla capacità di resistere in ambienti aggressivi, al contatto con acidi, alcalini e solventi, favorendo il loro utilizzo in ambienti caratterizzati da condizioni climatiche particolarmente severe. Attualmente, questi materiali vengono utilizzati in numerosissimi campi, tuttavia, uno degli aspetti che dovrà essere necessariamente affrontato nel prossimo futuro riguarda principalmente l'ambiente: pur avendo un indice di impatto ambientale minore rispetto alla maggior parte dei materiali

tradizionali, risultano esserci ad oggi problematiche per quanto riguarda le emissioni nel processo produttivo e ancora limitate possibilità di riciclo a fine vita. Le caratteristiche di un materiale composito fibrorinforzato FRP (Fiber Reinforced Polymers) e le distinte tecniche di produzione, unite alle sensibili differenze prestazionali dei componenti fibra e matrice, rendono ancora di difficile definizione una serie di valori meccanici univoci per il generico materiale; ciò anche per la forte dipendenza dalla percentuale degli elementi (matrice e fibre) che lo costituiscono. Ad oggi, molti di questi materiali vengono utilizzati per rinforzi strutturali e, per tale settore di impiego, il CNR ha appositamente redatto le "Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione e il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati".

I materiali compositi fibrorinforza-

ti FRP: fibre e matrici

I sistemi compositi utilizzano due differenti materiali in combinazione: una fase fibrosa, il cui compito è principalmente la resistenza a trazione, e una fase matrice per l'adesione e l'impregnazione delle fibre. Gli FRP nascono pertanto dall'accoppiamento di fibre di varia natura (in carbonio, vetro o aramide, etc.), con matrici organiche (resine epossidiche, poliestere, fenoliche, etc.). In generale, per materiali compositi si intendono quei materiali che soddisfano i seguenti requisiti:

- sono costituiti da due o più materiali (fasi) di natura diversa e "macroscopicamente" distinguibili;
- almeno due delle fasi presentano proprietà fisiche e meccaniche "sufficientemente" diverse tra loro, in modo da impartire al composito proprietà differenti da quelle dei costituenti.

I compositi fibrorinforzati a matrice polimerica soddisfano entrambe le suddette caratteristiche: sono infatti costituiti da una matrice polimerica di natura organica e da fibre di rinforzo.

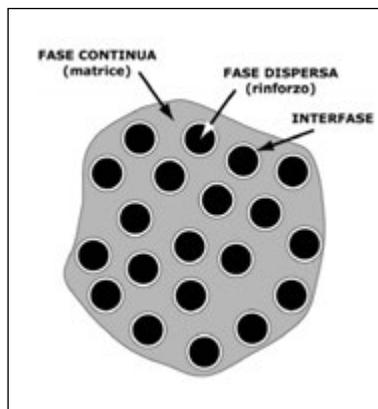
La matrice può essere considerata, almeno nei casi più comuni, come un continuo isotropo. La fase di rinforzo, ad eccezione della fibra di vetro, è invece un materiale anisotropo (proprietà diverse nelle diverse direzioni).

Contribuiscono a definire un materiale FRP:

- la geometria: forma, dimensioni e distribuzione delle dimensioni;
- la disposizione: orientazione delle fi-



Esempio di profilo speciale angolare pultruso in vetroresina PRFV.



Rappresentazione schematica delle fasi costituenti il composito

bre rispetto agli assi di simmetria del materiale. Se essa è casuale (nel piano o nello spazio) il composito risulta avere caratteristiche simili a quelle di un materiale isotropo ("quasi-isotropo"), in tutti gli altri casi il composito è anisotropo;

- la concentrazione: frazione in volume, distribuzione della concentrazione (dispersione).

Il composito riesce ad adempiere al suo compito solo se si ha un'ottima adesione tra le due fasi presenti. Per garantire una idonea adesione è possibile aggiungere un terzo componente, molto sottile, sulla superficie delle fibre creando così la cosiddetta interfaccia. In sintesi, i materiali di rinforzo possono essere particelle, fibre o fiocchi/piastrine, ma in tutti i casi devono avere una dimensione caratteristica nell'ordine dei micrometri ($\approx 10 \mu\text{m}$).

Le fibre utilizzate nella produzione di materiali compositi si presentano come filamenti continui molto sottili di materiale, al punto da poter essere considerate monodimensionali. Le fibre continue sono quelle maggiormente utilizzate nel campo dell'edilizia, in quanto permettono di ottimizzare la struttura del composito grazie alle loro proprietà, alla frazione volumetrica introdotta nella matrice e alla possibilità di controllarne l'orientamento.

La forma più diffusa che caratterizza le fibre di rinforzo è quella circolare, ma non è raro trovare all'interno di compositi anche fibre di forma molto appiattita o triangolare.

Le fibre possono essere utilizzate sotto diverse forme, tra cui le principali sono le seguenti:

- filamento (monofilamento): elemento base con dimensioni di circa $10 \mu\text{m}$ di diametro;

- cavo di filatura (tow): è il prodotto della macchina di filatura ed è costituito da un fascio formato da un gran numero di filamenti (dell'ordine delle migliaia), praticamente senza torsione, destinato ad essere filato, ritorto o strappato per l'utilizzazione sotto forma di fibra

discontinua;

- filo o filato (spun yarn): filo formato da fibre tenute insieme da torsione;

- filo assemblato (roving): fascio costituito da filati assemblati parallelamente e senza torsione intenzionale.

Combinando insieme alcune centinaia di "tows" o "yarns" si ottiene il "tape", in cui i "tows" o gli "yarns" possono essere semplicemente affiancati oppure cuciti tra loro o fissati su un supporto. La classificazione delle fibre è mutuata direttamente da quella tradizionalmente utilizzata per le fibre tessili. Attualmente, le fibre di vetro ricoprono più dell'80% dei prodotti realizzati con i compositi, seguite dalle fibre di carbonio, aramidiche e, in minor quantità, dalle fibre naturali, di acciaio e di basalto.

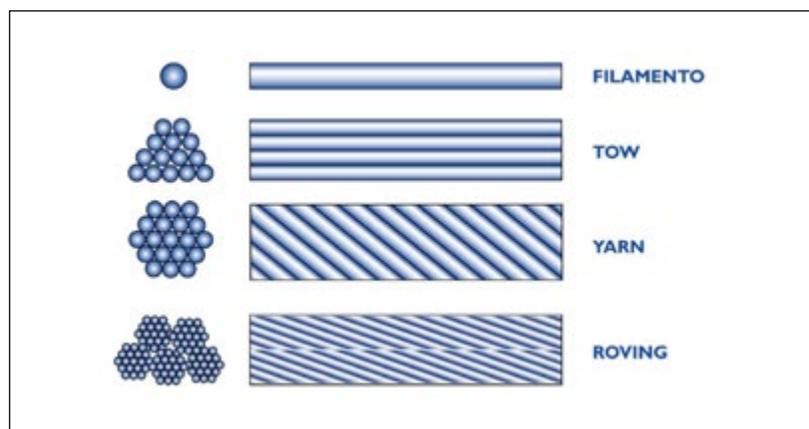
Fibre di vetro.

Il buon rapporto costo/prestazione, l'elevata resistenza meccanica, la loro facilità di produzione e le proprietà dielettriche sono le caratteristiche che contraddistinguono le fibre di vetro e che ne hanno favorito l'elevata diffusione. Le fibre di vetro sono caratterizzate da un modulo di elasticità normale inferiore a quello delle fibre di carbonio o a quello delle fibre aramidiche (circa 70 GPa per le fibre di vetro E) ed offrono una resistenza all'abrasione relativamente modesta, che richiede una certa cautela nelle operazioni di manipolazione prima dell'impregnazione. La scarsa resistenza all'abrasione e alla fa-

tica, nonché una limitata adesione alle matrici polimeriche, influenza il loro utilizzo in ambienti umidi. In commercio esistono numerosissimi filamenti in vetro che si distinguono gli uni dagli altri per la differente composizione chimica, nonché dal peso e dalle caratteristiche meccaniche. Per promuovere l'adesione tra fibre e matrice e per proteggere le fibre dall'azione degli agenti alcalini e dall'umidità, le fibre sono sottoposte a trattamenti di ensimaggio ("sizing") con sostanze aventi funzione di compatibilizzante. Tali trattamenti sono molto utili ai fini della durabilità e della resistenza a fatica (statica e dinamica) del materiale composito. Gli FRP a base di fibre di vetro si denotano usualmente con l'acronimo GFRP.

Fibre di carbonio.

Sono fibre usate per la fabbricazione di compositi ad elevate prestazioni e si distinguono per il loro elevato modulo di elasticità e resistenza. Mostrano un comportamento a rottura intrinsecamente fragile, caratterizzato da un assorbimento di energia relativamente modesto, anche se le tensioni di rottura sono elevate. A confronto con le fibre di vetro e con quelle aramidiche, le fibre di carbonio risultano essere le meno sensibili ai fenomeni di scorrimento viscoso ("creep") e di fatica e sono contraddistinte da una modesta riduzione della resistenza a lungo termine. Gli atomi di grafite, di forma esagonale, si



Tipologie di fibre.

dispongono in strati ordinati e uniti mediante forze trasversali di interazione debole di tipo Van der Waals. Grazie alla presenza di legami forti nel piano tra atomi, si ha un modulo nella direzione del piano estremamente elevato, a differenza di quello trasversale, ottenendo così un comportamento anisotropo della fibra. Nella realtà è difficile ottenere una disposizione perfettamente ordinata, per tale motivo le caratteristiche meccaniche risultanti sono minori rispetto a quelle teoricamente ottenibili.

Fibre d'arammide

Le fibre aramidiche sono fibre di natura organica, costituite da poliammidi aromatiche in forma estremamente orientata. Sono caratterizzate da un'ottima tenacità (sono in grado di assorbire un'elevata quantità di energia prima della rottura) ma da un modesto modulo elastico e una bassa resistenza. In generale, le poliammidi possono essere caratterizzate da una struttura lineare oppure contenente gruppi aromatici, grazie ai quali si ha un incremento delle prestazioni meccaniche rispetto alle prime. Se il quantitativo di anelli aromatici risulta essere maggiore dell'85% di parla di poliammidi aromatiche e di aramididi. Intorno agli anni '70, venne

sviluppato il Kevlar, una fibra organica a bassa densità, e resistenza ed elevato modulo elastico, con una buona resistenza alla corrosione. La loro resistenza a compressione è di norma pari a circa 1/8 di quella a trazione: infatti, a causa dell'anisotropia della struttura della fibra, i carichi di compressione favoriscono lo snervamento localizzato con conseguente instabilità e formazione di piegature. Le fibre aramidiche possono degradarsi per esposizione prolungata alla luce solare, con una perdita della resistenza a trazione fino al 50%. Inoltre possono risultare sensibili all'umidità. Il comportamento viscoso ("creep") è simile a quello delle fibre di vetro, ma rispetto a queste ultime la resistenza a rottura è molto più elevata.

Fibre di boro.

Le fibre di boro sono state ampiamente utilizzate nei campi dell'aviazione e aerospaziale prima della scoperta delle fibre di carbonio. In minima parte, rimangono ancora utilizzate nei compositi a matrice metallica grazie al loro modulo elastico e alla resistenza a compressione longitudinale maggiore rispetto le fibre di carbonio.

I vantaggi di queste fibre risiedono

nell'elevato modulo elastico e nella resistenza a compressione longitudinale, superiore a qualsiasi altra tipologia di fibra.

Fibre di basalto.

Sono fibre molto sottili (9-13 micron) di roccia vulcanica composta da plagioclasti, pirosseni e olivine. Queste fibre hanno avuto un forte sviluppo in ambito civile dopo la seconda guerra mondiale, in particolare come sostituto dell'amianto. Le caratteristiche che contraddistinguono queste fibre rispetto quelle di carbonio o di vetro sono la resistenza meccanica (elevata resistenza a trazione e buona resistenza a compressione) e il costo, che risulta essere decisamente inferiore dei precedenti; inoltre sono un ottimo isolamento termico, acustico ed elettrico, resistono alle alte temperatura con una buona stabilità al calore da -260°C a 900°C, sono caratterizzate da un coefficiente di dilatazione termica praticamente nullo, sono stabili chimicamente e impermeabili all'acqua.

Fibre di acciaio.

Un'altra tipologia di fibra largamente utilizzata è quella in acciaio. La scelta della tipologia di acciaio dipende dallo

	Modulo di elasticità normale E	Resistenza a trazione σ_T	Deformazione a rottura ϵ_T	Coefficiente di dilatazione termica α	Densità ρ
	[GPa]	[MPa]	[%]	[$10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$]	[g/cm^3]
Fibre di vetro E	70 – 80	2000 – 3500	3.5 – 4.5	5 – 5.4	2.5 – 2.6
Fibre di vetro S	85 – 90	3500 – 4800	4.5 – 5.5	1.6 – 2.9	2.46 – 2.49
Fibre di carbonio (alto modulo)	390 – 760	2400 – 3400	0.5 – 0.8	-1.45	1.85 – 1.9
Fibre di carbonio (alta resistenza)	240 – 280	4100 – 5100	1.6 – 1.73	-0.6 – -0.9	1.75
Fibre aramidiche	62 – 180	3600 – 3800	1.9 – 5.5	-2	1.44 – 1.47
Matrice polimerica	2.7 – 3.6	40 – 82	1.4 – 5.2	30 – 54	1.10 – 1.25

Confronto tra le proprietà delle fibre di rinforzo e delle matrici più comuni.

specifico progetto, tenendo in considerazione che si auspica la realizzazione di un composito in cui la cui rottura del rinforzo preceda lo scorrimento della fibra all'interno della matrice.

Per evitare questa rottura, si devono inserire all'interno della matrice delle fibre di diametro non eccessivamente ridotto.

Per quanto riguarda la loro forma, si commercializzano maggiormente fibre in acciaio sotto forma di filamenti che possono essere disperse all'interno dei calcestruzzi o delle malte ad alta resistenza o in tessuti e reti che permettono di realizzare un sistema di rinforzo

strutturale composito con elevata resistenza meccanica.

Fibre naturali.

La crescente sensibilizzazione verso l'ambiente e verso la sua salvaguardia ha condotto alla ricerca e all'uso di fibre provenienti da materiali rinnovabili o facilmente degradabili o smaltibili alla fine della loro vita utile. Tra queste hanno preso maggior piede le fibre naturali, le quali si distinguono in vegetali, largamente utilizzate nel campo dei compositi, e animali come la lana e la seta utilizzate nel settore tessile. La bassa stabilità termica ad alte temperature, la

loro natura idrofila (che causa rigonfiamenti e ne diminuisce la compatibilità con le matrici polimeriche), nonché la differenza di caratteristiche in funzione della qualità del raccolto, dell'età e dalla parte della pianta da cui sono estratte, sono alcuni degli svantaggi che ne hanno rallentato la diffusione e l'utilizzo come rinforzi all'interno dei materiali compositi. Di contro, i principali vantaggi rispetto alle fibre tradizionali si possono ricondurre a costo ridotto, biodegradabilità e riciclabilità, incremento delle prestazioni di isolamento termico e acustico dei compositi, minore abrasività per le apparecchiature di lavorazione.



Le matrici

Il ruolo della matrice è quello di legare il materiale di rinforzo e di trasferire i carichi tra le fibre in modo uniforme.

Inoltre, la resistenza a trazione trasversale dei materiali compositi, di compressione, di taglio, la resistenza al calore e la resistenza ai terreni ambientali sono tutte più strettamente correlate alla matrice.

Ancora più importante, i metodi di stampaggio e i parametri di processo del composito sono determinati principalmente dalla resina utilizzata. Pertanto, è fondamentale studiare e comprendere la composizione, il ruolo e le prestazioni dei materiali. La matrice può essere di tipi differenti, in particolare di tipo polimerico, ceramico, metallico e cementizio.

Le matrici più utilizzate per la fabbricazione dei compositi fibrorinforzati sono quelle polimeriche a base di resine termoidurenti.

Tali resine sono disponibili in forma parzialmente polimerizzata e si presentano liquide o pastose a temperatura ambiente.

Per miscelazione con un opportuno reagente esse polimerizzano (reticolano) fino a diventare un materiale solido vetroso; la reazione può essere accelerata agendo sulla temperatura.

Queste resine sono caratterizzate da una bassa viscosità allo stato fluido e quindi da una relativa facilità di impregnazione delle fibre, da ottime proprietà adesive, dalla possibilità di avere formulazioni che reticolano a temperatura ambiente, da una buona resistenza agli agenti chimici, dall'assenza di una temperatura di fusione, etc.

I principali svantaggi sono invece rappresentati dall'ampiezza del campo di temperature di esercizio, limitato superiormente dalla temperatura di transizione vetrosa, dalla modesta tenacità a frattura (comportamento "fragile") e dalla sensibilità all'umidità in fase di applicazione sulla struttura.

Le resine termoidurenti più diffuse nel settore civile sono le epossidiche, mentre meno diffuse sono le resine poliestere o vinilestere. Le resine epossidiche sono caratterizzate da una buona resistenza all'umidità ed agli agenti chimici ed inoltre presentano ottime proprietà adesive.

La temperatura massima di esercizio dipende dalla formulazione e dalla temperatura di reticolazione. Per temperature di esercizio superiori a 60 °C, la resina deve essere opportunamente selezionata tenendo conto delle competenti variazioni delle sue caratteristiche meccaniche.

Al contrario non sussistono, di solito, limiti significativi per la temperatura minima di esercizio.

Sono anche disponibili materiali compositi fibrorinforzati con matrici polimeriche termoplastiche, che possono richiedere tecniche di applicazione diverse dalle precedenti.

Ad esempio, sono allo studio barre di composito con matrice termoplastica le quali, rispetto all'analogo prodotto con matrice termoidurente, hanno il vantaggio di poter essere piegate in qualsiasi momento mediante un opportuno trattamento termico.

Gli additivi hanno lo scopo di aumentare singole proprietà specifiche delle matrici o persino produrre proprietà uniche che il polimero non presenta e sono indispensabili dal momento che senza di essi i polimeri risulterebbero più o meno indispensabili.

È importante regolare la giusta quantità di additivi all'interno della matrice (solitamente non si supera mai il 10% del peso complessivo del prodotto) al fine di non incorrere in una riduzione o alterazione completa delle proprietà di base.

Essi possono essere classificati come:

- additivi che migliorano la stabilità: permettono di prevenire o ritardare l'invecchiamento e la degenerazione del polimero (ad esempio antiossidan-

ti, stabilizzanti alla luce o al calore, fungicidi, etc.);

- additivi che migliorano le proprietà meccaniche di resistenza, durezza, resistenza al calore, tenacità (riempitivi particellari, agenti di accoppiamento, agenti indurenti, etc.);

- additivi che migliorano la lavorabilità: riducono la temperatura di fusione e aumentano la mobilità e la flessibilità dei materiali (plastificanti, lubrificanti, agenti di rilascio, etc.);

- additivi che migliorano la superficie e le prestazioni del composito (antistatici, antiappannamento, agenti coloranti, etc.);

- additivi che attenuano l'inflammabilità (ritardanti di fiamma);

- additivi che cambiano altre caratteristiche come la conduttività, le proprietà magnetiche, endotermiche, assorbenti.

In sintesi, si definiscono materiali compositi a fibra corta quei materiali in cui la matrice (organica o inorganica) è rinforzata dalla presenza di uno o più materiali fibrosi di dimensioni ridotte.

Le fibre si presentano disperse nella matrice in tutte le direzioni, creando in tal modo una tessitura multidirezionale distribuita che migliora il composito in termini di caratteristiche quali isotropia, duttilità, resistenza a trazione, modulo elastico, durabilità, ritiro, resistenza agli urti, resistenza all'abrasione e resistenza al fuoco.

I materiali compositi a fibra lunga rappresentano una evoluzione delle applicazioni dei compositi a fibra corta.

Mentre nei compositi a fibra corta le fibre, disperse nella matrice secondo direzioni casuali, hanno il compito di migliorare le caratteristiche della matrice stessa, nei compositi a fibra lunga la fibra svolge un vero e proprio ruolo di rinforzo strutturale e la matrice ha il compito di trasferire gli sforzi tra le fibre e dal supporto alle fibre, oltre ad una funzione protettiva nei confronti delle fibre stesse.