

# COMPONENTI IN FRP (FIBER REINFORCED POLYMERS)

## produzione, modellazione e durabilità

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

### Processi di produzione

Il processo produttivo dei materiali compositi ricopre un ruolo importante per la definizione delle caratteristiche meccaniche finali del materiale: in funzione delle caratteristiche che si vogliono ottenere o dell'esigenza di una produzione in continuo, si possono impiegare diverse tecnologie che utilizzano stampi chiusi o stampi aperti. Tra i metodi più diffusi e ingegnerizzati vi è la pultrusione, ovvero la realizzazione di un profilo estruso mediante una forza di tiro ("pull"). Essa si basa su un processo continuo di produzione, articolato essenzialmente in tre fasi: formatura, impregnazione, consolidamento. Nella versione più comune, concepita per matrici termoindurenti, i componenti (resina e fibre) sono alimentati separatamente in una macchina in grado di afferrare e trascinare le fibre attraverso i diversi stadi di produzione. Una versione molto diffusa del processo è quella con impregnazione a bagno di resina. Le fibre sono prelevate da un gruppo di rocchetti e convogliate, attraverso rastrelliere che ne uniformano la disposizione, verso un bagno di resina, dove avviene l'impregnazione. Il fascio di fibre impregnate entra quindi in uno stampo riscaldato, nel quale il materiale si consolida sotto pressione. Durante questa fase i vuoti presenti tra le fibre sono eliminati, garantendo così la continuità del materiale in direzione trasversale. Il calore viene di solito fornito attraverso resistenze elettriche e la temperatura è controllata mediante

termocoppie opportunamente posizionate. Il tempo di permanenza in temperatura è regolato dalla velocità di produzione. All'uscita dallo stampo, la matrice si è solidificata e il composito può essere afferrato dal dispositivo di traino che lo trascina a velocità costante. Una sega circolare taglia il prodotto nella lunghezza desiderata in prossimità della parte terminale della linea di produzione.

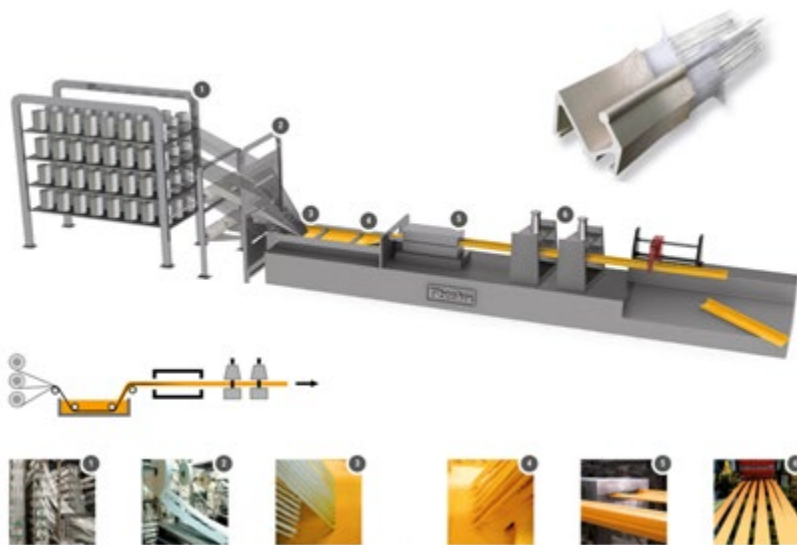
È possibile aggiungere strati di "mat" o tessuti per rinforzare il materiale anche in direzioni diverse da quella di traino. Con speciali apparecchiature è anche possibile la tessitura, l'avvolgimento e l'intreccio di fibre direttamente sulla linea di produzione.

I compositi pultrusi sono leggeri, re-

sistenti alla corrosione e presentano una sezione costante con spessori che possono raggiungere anche alcuni centimetri. I classici manufatti pultrusi sono lamine, barre, profili a sezione sagomata (ad angolo, a "C", a doppio "T", etc.), pannelli e piastre.

Tali manufatti trovano impiego come rinforzi esterni ed interni in campo civile, come componenti strutturali nel settore dei trasporti, come canaline passacavi nell'edilizia, come tiranti e montanti per scale, come supporti per illuminazione e cartellonistica stradale, etc.

La laminazione trova impiego quasi esclusivamente per la fabbricazione di compositi innovativi. Si tratta di un processo di tipo discontinuo, che per-



Processo di pultrusione. Le fibre di vetro impregnate di resina vengono "tirate" (pull) dentro una matrice calda, in cui avviene l'indurimento. Le fibre assumono la sagoma geometrica della matrice. L'avanzamento del profilo avviene grazie a un sistema di trazione. Un'ultima stazione con sega taglia il profilo su misura. Fonte: <https://fibrolux.com/it>

mette di produrre laminati composti di spessore massimo fino ad alcuni centimetri, con struttura molto complessa. Rispetto alla pultrusione, la laminazione consente una libertà pressoché assoluta in termini di orientamento delle fibre nelle diverse lamine e di curvatura dei pezzi prodotti. La principale limitazione consiste nella lentezza del ciclo di produzione, che è caratterizzato da una velocità dell'ordine di 0.5 kg/h per componenti non troppo complessi.

Nella realizzazione di un laminato tipico, è possibile identificare le seguenti fasi fondamentali:

- preparazione (dello stampo e del materiale);
- laminazione (taglio del materiale, sovrapposizione degli strati e compattazione);
- realizzazione "vacuum bag" (cioè estrazione dell'aria presente all'interno del laminato, tramite l'applicazione di vuoto parziale);
- reticolazione del materiale (a temperatura ambiente, in forno o in autoclave);
- controlli non distruttivi (ispezione visiva, con ultrasuoni e con raggi X);
- finitura (taglio dei bordi con fresa o getto d'acqua ad alta pressione).

### Durabilità

Considerando i GRFP, maggiormente diffusi nel settore delle costruzioni, numerose ricerche (Schutte, 1994; Corricciati, Corvaglia, & Mosheyev, 2009; Benichou, Bisby, & Chowdhury, 2009; Martins & Martins, 2011) hanno evidenziato che i fattori ambientali che possono influire maggiormente sul degrado dei materiali composti dipendono dal tipo di matrice e fibra utilizzati, ma principalmente si possono riassumere in: umidità, alcalinità dell'ambiente, temperatura, scorrimento, fatica, radiazione UV, fuoco. In seguito all'esposizione in ambienti caratterizzati da elevata umidità si possono riscontrare rigonfiamenti, fenomeni di plastificazione o microcricche nella resina che possono

portare alla riduzione della resistenza della fibra di vetro, diminuire la temperatura di transizione vetrosa e la rigidità.

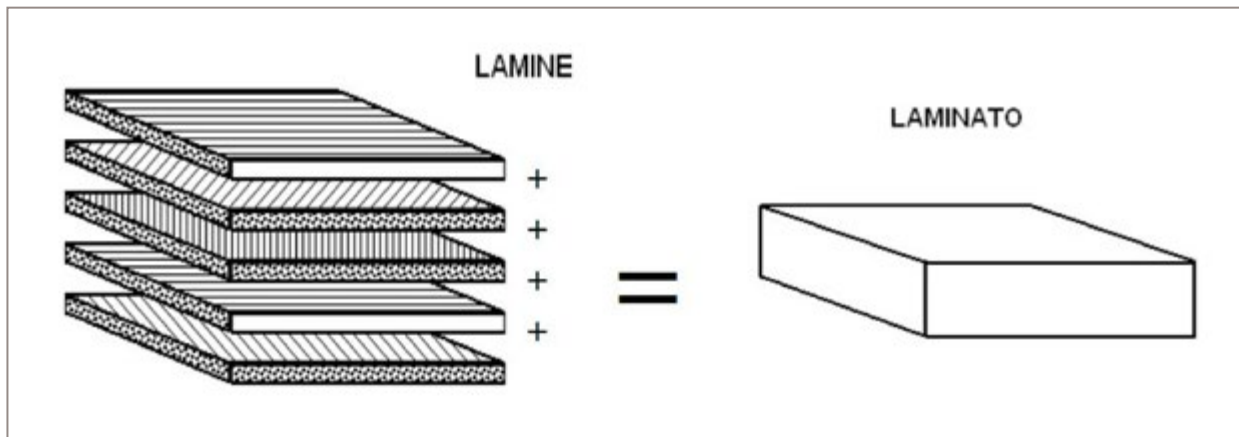
Per quanto riguarda l'esposizione in ambiente alcalino, è fondamentale rilevare la notevole differenza che intercorre tra armature e rinforzi metallici (acciaio) e materiali composti fibrorinforzati, in particolare con fibra di vetro. Nel caso di rinforzi in acciaio, la presenza di un ambiente alcalino risulta benefica, in quanto favorisce una passivazione superficiale contro la corrosione galvanica. In questi casi è proprio la riduzione del pH a costituire una potenziale minaccia per l'innescare di fenomeni ossidativi di nota pericolosità. Nel caso di rinforzi in fibra di vetro, invece, la sensibilità chimica del materiale costituente il rinforzo, in ambiente alcalino potrebbe portare ad un danneggiamento chimico, anche severo, del rinforzo stesso, con conseguente riduzione delle proprietà meccaniche a livello macroscopico. Considerando i GRFP, negli ambienti alcalini si preferisce l'utilizzo di fibre E-glass, prive di boro. Si è verificata una perdita di peso di fibre che vengono poste in una soluzione alcalina per 28 giorni in un contenitore ermetico con una temperatura di  $22^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$  e con un'umidità relativa pari a  $50\% \pm 5\%$ . Anche dal punto di vista della massima tensione longitudinale e del massimo carico ammissibile, si è individuata una diminuzione di entrambi in seguito all'esposizione ad una soluzione alcalina.

Il raggiungimento di una temperatura prossima a quella di transizione vetrosa della resina, può comportare una diminuzione repentina del modulo elastico e una riduzione della resistenza longitudinale del composito; questo comportamento è probabilmente dovuto alla mancanza di interazione tra matrice e fibre e quindi alla perdita di distribuzione del carico tra le fibre, dovuto all'ammorbimento della matrice. Per quanto riguarda gli effetti all'esposizione ai raggi UV, vi possono essere

delle significative variazioni cromatiche (colore tendente al giallo) per i composti sottoposti a radiazione diretta, causa di un degrado estetico in applicazioni a vista. Tuttavia, in tutte le condizioni di invecchiamento, le variazioni cromatiche sembrano stabilizzarsi dopo un breve periodo di esposizione. Anche per quanto concerne la diminuzione di resistenza media a trazione in seguito all'esposizione di 2.000 ore ai raggi UV l'effetto è limitato (4-5%), così come il modulo di Young risulta pressoché inalterato. È tuttavia consigliabile utilizzare rivestimenti protettivi in ambienti aggressivi, le cui proprietà di mitigazione degli effetti di esposizione si mantengano inalterate (in seguito a prove sperimentali) per tutta la vita utile della struttura. In generale è possibile affermare che le proprietà meccaniche dei composti sono leggermente influenzabili dall'esposizione agli UV e l'entità del deterioramento dipende dal tipo di resina e dall'orientamento e concentrazione delle fibre. Infatti, le resine poliestere sono più suscettibili al danneggiamento da UV rispetto alle resine epossidiche.

### Modellazione

Le caratteristiche meccaniche di un elemento fibrorinforzato dipendono dal tipo di matrice e di fibre utilizzate e la risposta meccanica, essendo il composito un materiale anisotropo, dalla direzione nella quale avviene la sollecitazione. Dal momento che un elemento può essere sollecitato da ogni direzione, una campagna sperimentale in laboratorio esaustiva potrebbe risultare complessa e dispendiosa. Per ovviare a questo problema, è possibile utilizzare alcune considerazioni della meccanica dei solidi anisotropi, secondo le quali le caratteristiche, in una qualunque direzione, dipendono da un numero limitato di proprietà misurate in direzioni opportune (le direzioni di simmetria) associate alla microstruttura del composito. I profili composti differiscono molto tra di loro in funzione del tipo di fibra e di



Esempio di laminato costituito da più lamine. Fonte: (Albicini, 2017).

matrice, nonché dalla disposizione dei singoli strati che lo compongono.

Ad esempio, considerando i compositi laminati, l'uso di una singola lamina spesso non risulta sufficiente ai fini ingegneristici a causa della mancanza di resistenza nella direzione trasversale. Per ovviare a tale problema si utilizzano elementi costituiti da un numero "n" di lamine disposte in diverse direzioni e orientate in modo tale da soddisfare i requisiti minimi prestazionali richiesti. La determinazione delle proprietà dei laminati può essere eseguita a partire dalla conoscenza delle proprietà delle lamine che lo compongono, utilizzando tecniche di calcolo basate sulla "teoria della laminazione". La teoria dei laminati ha l'obiettivo di fornire un modello matematico in grado di sintetizzare la risposta di un laminato come se lo stesso fosse costituito da un unico strato equivalente, permettendo di predire le caratteristiche elastiche globali. A tal riguardo occorre però evidenziare che si tratta di problematiche ancora in fase di ricerca. Le ipotesi che stanno alla base della teoria dei laminati sono: aderenza perfetta tra gli strati, comportamento elastico lineare degli strati costituenti, spessore complessivo dell'elemento ridotto, modello cinematico di Kirchhoff, piccoli spostamenti, rotazioni e deformazioni.

Trattandosi di un materiale anisotropo, la resistenza di un composito è dipendente dall'orientamento dello stato di

sforzo applicato. In particolare, in una lamina ortotropa, la resistenza è funzione dell'orientamento delle tensioni principali rispetto agli assi di ortotropia. L'uso di un criterio di resistenza permette di analizzare il comportamento del materiale in presenza di uno stato di sforzo non monoassiale, ottenendo delle superfici o delle curve limite nello spazio delle tensioni con il quale confrontare lo stato di tensione reale. Occorre sottolineare che l'applicazione dei criteri di resistenza consente di cogliere bene il momento della crisi di un elemento, ma non la sua ragione (per tale motivo si chiamano criteri fenomenologici). Si sottolinea inoltre che per i materiali compositi realizzati con matrici polimeriche, la crisi è praticamente sempre di rottura in seguito a comportamento fragile.

#### Considerazioni e sviluppi futuri

Nonostante siano già largamente diffusi in alcuni settori, come quelli aeronautici o dell'automotive, i materiali compositi si stanno progressivamente diffondendo anche nel settore edile, dove assumono un ruolo fondamentale laddove vi sia la necessità di impiegare materiali leggeri, resistenti e con una buona durabilità. Tuttavia, le caratteristiche vantaggiose di questi materiali non si limitano a questi aspetti: l'elevata resistenza alla corrosione, la bassa conducibilità termica ed elettrica, la "trasparenza" ai campi

elettromagnetici e alle radiofrequenze, nonché la possibilità di avere colori personalizzati, sono solo alcune tra le caratteristiche che giustificano il loro utilizzo nel settore delle costruzioni. La loro leggerezza può facilitare la posa in opera, traducendosi in un significativo risparmio economico sia per l'impiego di mezzi, sia per la manodopera necessaria all'installazione, così come la durabilità può contribuire a ridurre i costi di manutenzione. In generale, le prestazioni meccaniche dei profili dipendono dalla tipologia della sezione, dal tipo di matrice e di fibra, dalla percentuale in volume dei componenti e dalla direzione delle fibre rispetto al carico applicato. In termini quantitativi, prove sperimentali hanno evidenziato che se il carico è applicato parallelamente alla direzione delle fibre il profilo composito massimizza la sua risposta strutturale. Nel caso invece in cui la direzione del carico sia trasversale alle fibre, si può avere una riduzione delle prestazioni di



L'impiego delle barre di FRP quali armature di strutture di conglomerato cementizio diviene sempre più frequente, specie in virtù dei notevoli pregi nei riguardi della resistenza alla corrosione. Fonte: <https://fibrolux.com/it>

circa 80-90%. Tale decremento raggiunge il 50% già con sensibili rotazioni (di 20°) della direzione del carico applicato rispetto all'orientamento delle fibre.

Nel settore costruttivo, i materiali compositi sono utilizzati per uso strutturale, infrastrutturale e con finalità architettoniche. In particolare, è in continua crescita il numero di edifici che includono parti (o addirittura interi sistemi) realizzate in GFRP con riferimento specifico all'involucro edilizio. Arredo urbano, camminamenti, elementi per il taglio termico dei serramenti o delle facciate continue, telai per serramenti, persiane, ponti, rinforzi strutturali, riqualificazioni, ristrutturazioni, palancole o scale e trabattelli sono solo alcuni degli innumerevoli prodotti che possono essere realizzati utilizzando materiali compositi. In particolare, materiali compositi di tipo GFRP non sono conduttori.

Ne risulta che l'impiego in barre, quali armature di elementi esposti a correnti vaganti, di fatto risolve il problema di corrosione che aggredisce invece le usuali armature metalliche.

La presenza di correnti vaganti affligge, ad esempio, le strutture a servizio del trasporto su rotaia (linee ferroviarie o metropolitane) a cielo aperto o in galleria. Anche le solette di ponti stradali, utilizzati come cavalcavia ferroviari, possono essere interessate dallo stesso fenomeno.

In particolare per le solette da ponte non possono essere dimenticati i danni provocati dalla corrosione delle armature metalliche dovuto allo spargimento di sali, nella stagione fredda, per

ostacolare la formazione di ghiaccio sulla carreggiata.

Le fibre di vetro con matrici polimeriche termoidurenti garantiscono buone capacità dielettriche, riducendo il rischio di creazione di archi elettrici, assicurano la trasparenza alle onde elettromagnetiche e sono caratterizzate da un'alta resistività superficiale e volumica. Gli elementi così realizzati sono facilmente lavorabili mediante l'utilizzo di utensili diamantati e possono essere efficacemente collegati con bulloni, rivetti o ancoranti. Un ulteriore vantaggio è la stabilità dimensionale in seguito ad ampie escursioni termiche, con una risposta dei materiali praticamente sempre in campo elastico.

Infine, i materiali compositi in fibra di vetro presentano una conducibilità termica bassa, cosa che li rende ottimi nel campo dell'edilizia e dell'isolamento termico. Il prodotto finale è un materiale sicuramente più costoso rispetto ai materiali tradizionali, ma in grado di offrire prestazioni più elevate per usi specifici.

A differenza degli altri settori, dove si registra un crescente impiego, nel settore delle facciate uno degli attuali ostacoli alla diffusione di componenti realizzati con materiali compositi è legato al loro comportamento in caso di incendio.

La resistenza al fuoco di un profilo pultruso in GFRP è difficile da identificare con un unico valore, dal momento che essa dipende molto dal tipo di profilo utilizzato nonché dal numero di facce esposte in caso di incendio e dallo

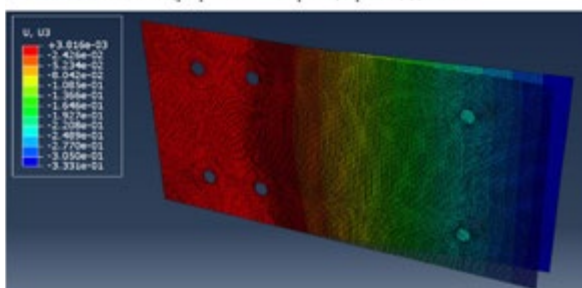
scenario di incendio stesso. Tuttavia, alcuni studi hanno mostrato che utilizzando un'adeguata protezione passiva del profilo pultruso, si può ottenere un significativo miglioramento della resistenza al fuoco. Ad ogni modo, l'utilizzo di materiali GFRP deve essere valutato in base ai vincoli imposti dall'attuale mercato dalle costruzioni, in cui l'aspetto della sostenibilità rappresenta un requisito fondamentale. Un materiale per essere considerato ideale dal punto di vista della sostenibilità, dovrebbe avere un ciclo di vita circolare e un impatto ambientale minimo.

Nel caso dei compositi in GFRP, uno dei principali vantaggi è la possibilità di estendere la durata di vita delle strutture esistenti e di sviluppare nuove strutture con una durata di servizio superiore rispetto a quelle realizzati con materiali tradizionali e che necessitano di una manutenzione minima.

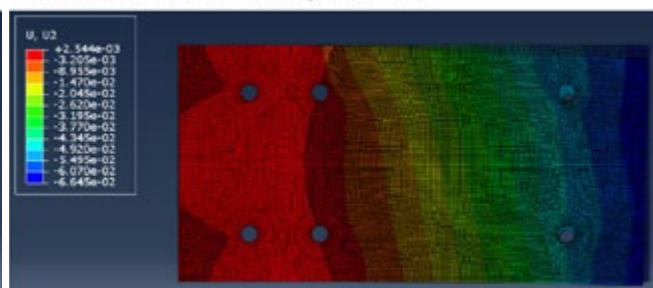
Inoltre, la leggerezza del composito può comportare costi di costruzione inferiori e una maggiore velocità di realizzazione, con conseguente riduzione dell'impatto ambientale in fase di costruzione.

Si sta cercando (con successo) di utilizzare fibre di vetro e polimeri riciclati mantenendo però inalterate le proprietà meccaniche del prodotto finale. In sintesi, i materiali compositi potranno essere considerati sostenibili nel momento in cui i costi di produzione e l'impatto ambientale saranno ridotti al minimo e si provvederà alla formazione di progettisti in grado di ottimizzare il prodotto.

La freccia in direzione Z (perpendicolare al piano) è pari a 0.33 mm.



La freccia in direzione Y (trasversale) è pari a 0.07 mm.



Esempio di modellazione FEM di staffa in GFRP per la valutazione delle deformazioni sotto carico