



# CARBON FIBER DESIGN CONTEST

SAILING

new applications and innovative uses  
for yacht design

## SCHEDA TECNICA DEI MATERIALI PER IL CONCORSO

### I MATERIALI COMPOSITI E LORO PROPRIETÀ

I materiali compositi rappresentano l'evoluzione della scienza e delle tecnologie dei materiali fondendo al loro interno le migliori caratteristiche di più materiali, prodotti con tecnologie innovative che ne determinano le elevatissime caratteristiche fisico-meccaniche. Lo studio dei compositi è una filosofia di progetto di materiali che si propone di ottimizzare nello stesso tempo la composizione del materiale con il progetto di ottimizzazione strutturale in un processo convergente ed interattivo. È una scienza e una tecnologia che richiede la stretta interazione di diverse discipline come progetto ed analisi strutturale, analisi dei materiali, meccanica dei materiali ed ingegneria di processo.

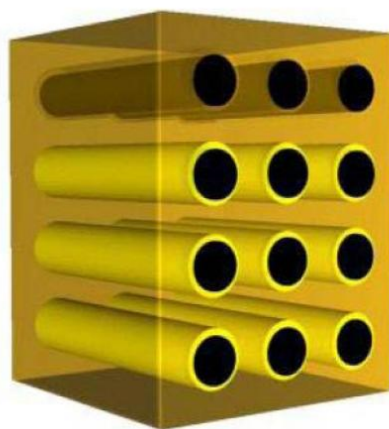
Dal punto di vista storico il concetto di rinforzo con fibra è assai vecchio. Ci sono addirittura nella bibbia riferimenti al rinforzo di laterizi con paglia nell'antico Egitto. Barrette di ferro erano usate per rinforzare le murature nel XIX secolo e questo portò allo sviluppo del cemento armato. Resine fenoliche rinforzate con amianto furono introdotte nel XX secolo. La prima barca in vetroresina fu realizzata nel 1942 e dello stesso periodo sono le plastiche rinforzate per l'impiego aeronautico e per componenti di apparecchiature elettriche. Elementi avvolti furono inventati nel 1946 ed usati in applicazione nel campo missilistico negli anni '50. Le prime fibre di boro e di carbonio ad alta resistenza furono introdotte nei primi anni '60 con l'applicazione di compositi avanzati per componenti aeronautici. Compositi con matrici metalliche come boro/alluminio furono introdotte nel 1970. La Dupont sviluppò fibre aramidiche nel 1973.

A partire dagli ultimi anni '70 le applicazioni dei compositi si espansero fortemente in campo aeronautico, automobilistico, per articoli sportivi e per applicazioni in industrie biomediche. Gli anni '80 portarono ad un significativo sviluppo nell'utilizzo di fibre ad alto modulo di elasticità.

Oggi l'enfasi è posta sullo sviluppo di più moderni compositi con matrici a base i malte e matrici ibride con malta e resina epossidica per le applicazioni ad alta temperatura. Si hanno innumerevoli applicazioni: tubi interrati, container, barche, veicoli di terra, strutture aeronautiche e spaziali, applicazioni nell'edilizia civile, componenti per automobili, attrezzi sportivi, prodotti biomedici e moltissimi altri prodotti progettati per avere alte prestazioni meccaniche e/o stabilità dimensionale nei diversi ambienti accoppiati e bassi pesi.

### ***DEFINIZIONE E CARATTERISTICHE***

Si definisce materiale composito un sistema costituito da due o più fasi, le cui proprietà e prestazioni sono progettate in modo tale da essere superiori a quelle dei materiali costituenti che agiscono indipendentemente. Normalmente una delle due fasi è discontinua, più rigida e più forte ed è chiamata "rinforzo", mentre la fase meno rigida e più debole, è continua ed è chiamata "matrice". Talvolta a causa di interazioni chimiche od altri effetti, esiste una fase aggiuntiva, chiamata "interfase", tra rinforzo e matrice.



**Fasi di un materiali composito**

Le proprietà di un composito dipendono dalle proprietà dei costituenti, dalla geometria e distribuzione delle fasi. Uno dei parametri più importanti è il volume (o il peso) della frazione di rinforzo o il rapporto di volume delle fibre. La distribuzione del rinforzo determina le caratteristiche del sistema. Meno è uniforme il rinforzo, più è eterogeneo il materiale e più alta è la probabilità di rottura nelle aree più deboli. La geometria e l'orientamento del rinforzo, invece, influiscono sull'anisotropia del sistema.

Le fasi del composito hanno ruoli differenti che dipendono dal tipo e dalla messa in opera del composito. Nel caso di compositi con prestazioni basse o medie, il rinforzo, usualmente fibre corte o particelle, dà un certo irrigidimento ma rinforza solo localmente il materiale. La matrice d'altra parte, è il costituente principale per reggere i carichi e definisce le proprietà meccaniche del materiale.

Nel caso di compositi ad alte prestazioni strutturali, il rinforzo è normalmente costituito da fibra continua e forma lo scheletro del materiale, determinando la rigidità e la resistenza nella direzione della fibra. La fase matrice procura la protezione, il sostegno per le fibre ed il trasferimento degli sforzi locali da una fibra all'altra. L'interfase, anche se di piccola dimensione, può giocare un ruolo importante nel controllo del meccanismo di rottura, nella resistenza alla frattura e, soprattutto, nel comportamento sforzi/deformazioni del materiale.

### *Le fibre*

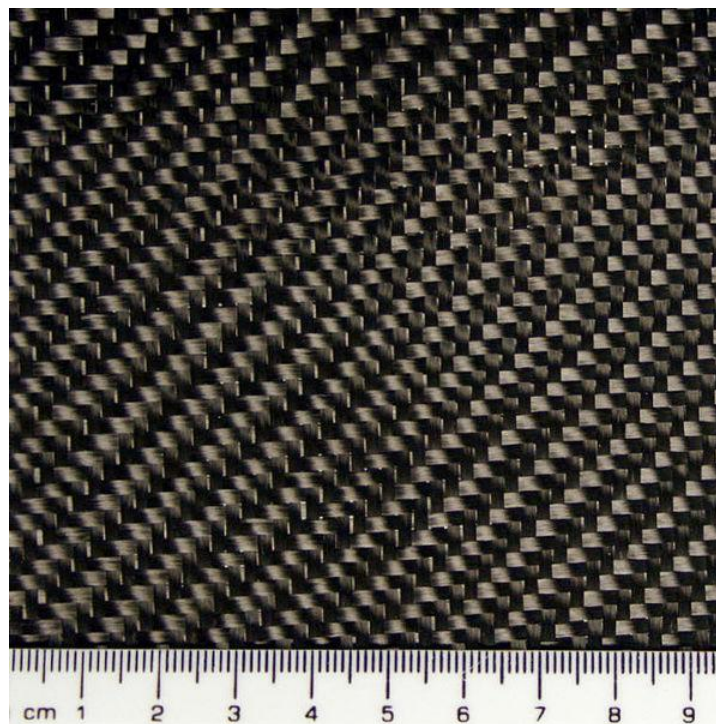
Come accennato, grazie alle loro dimensioni limitate, le fibre presentano una perfezione strutturale fuori del comune; questa caratteristica, unita alle proprietà intrinseche dei materiali costitutivi, assicura ad esse:

- resistenza meccanica elevata
- modulo elastico molto alto
- peso specifico molto basso
- comportamento elastico lineare fino alla rottura.

Le fibre più importanti per uso in compositi possono essere di vetro, carbonio, organiche e minerali. Esse si trovano nei compositi o sotto forma di fibre continue disposte parallelamente in un piano, o sotto forma di fibre tagliate e disposte in un piano con orientazione casuale (MAT) o, infine, possono essere tessute secondo una configurazione trama-ordito e disposte in un piano.

## *Fibre di carbonio*

Per lungo tempo le fibre più usate in applicazioni di compositi strutturali sono state quelle di vetro. Sebbene abbiano buone caratteristiche di resistenza e bassa densità, presentano un modulo di elasticità relativamente basso. Per questo motivo, circa 25 anni fa, si iniziò a sperimentare e convertire compositi organici in fibre e tessuti di carbonio e grafite.



**Fibre di Carbonio**

Le elevate proprietà meccaniche delle fibre di carbonio derivano dalla particolare struttura cristallina della grafite. Quanto più la struttura cristallina è elevata, tanto più il materiale possiede caratteristiche elevate.

Un cristallo di grafite ha una struttura composta da strati sovrapposti di piani costituiti da atomi di carbonio. I legami fra gli stessi atomi dello stesso piano sono forti (legami covalenti) mentre quelli fra atomi di piani differenti sono relativamente deboli (legami Van der Waals): è evidente come i cristalli siano strutture fortemente anisotrope e sarà compito del processo di fabbricazione disporre la struttura cristallina nella direzione voluta.

Naturalmente ciò non è facile: praticamente non si riesce mai ad ottenere cristalli perfetti e precisione nell'orientamento, per cui le caratteristiche meccaniche risultanti saranno più basse di quelle teoriche.

Le fibre di carbonio sono ottenute grafitizzando in atmosfera inerte, a oltre 2000°C, delle fibre organiche tessili di rayon o poliacrilonitrile (PAN). Le fibre di partenza prendono il nome di precursori. Durante il processo di grafitizzazione le fibre sono sottoposte a trazione, quanto maggiore è lo sforzo di trazione esercitato, tanto più alto risulta il modulo di Young del prodotto.

D'altra parte l'aumento del modulo viene bilanciato da una diminuzione di resistenza. Esistono così in commercio sia fibre di carbonio ad alto modulo, penalizzate nella resistenza, sia a basso modulo e alta resistenza.

I due tipi sono detti rispettivamente C1 e C3 o , con terminologia anglosassone, HM («High Modulus», cioè alto modulo) e HS («High strength», cioè alta resistenza a trazione) o anche in italiano HR.

Rispetto alle fibre di vetro, quelle di carbonio presentano tre vantaggi sostanziali:

- un modulo elastico molto alto;
- una massa volumica bassa;
- un coefficiente di dilatazione termica molto basso.

Esse perciò stanno soppiantando le fibre di vetro in tutti quei campi in cui sono richieste, oltre a un basso peso, un'alta rigidità (strutture aeronautiche, attrezzi sportivi ecc.) o una notevole stabilità dimensionale al variare della temperatura (dispositivi ottici, radar ecc.).

I costi di produzione delle fibre di carbonio sono notevolmente più elevati rispetto alle fibre di vetro ma la loro forte diffusione è giustificata dalle elevate proprietà meccaniche.

## **TECNOLOGIE DI FABBRICAZIONE**

Numerose sono le tecnologie di fabbricazione utilizzabili per la realizzazione di elementi in materiali compositi, è possibile ottenere materiali con caratteristiche fisico-meccaniche elevatissime e con elevatissima percentuale volumetrica di fibre ed è altresì possibile ottenere elementi con caratteristiche meno elevate ma con costi di produzione notevolmente ridotti. Le tecnologie di



fabbricazione di elementi in materiale composito variano secondo la forma, dimensione e proprietà richieste al pezzo finito.

In funzione delle caratteristiche che si vogliono ottenere da un elemento in composito, della necessità o meno di riproduzione dello stesso o di una produzione in continuo, le tecnologie possono essere distinte in tecnologie in cui si impiegano stampi chiusi o stampi aperti; ancora, le tecnologie possono essere distinte in continue o discontinue e manuali e automatizzate.

Nell'ambito dei sistemi di rinforzo strutturale realizzati con materiali compositi viene solitamente utilizzato solo un numero limitato di tecnologie, successivamente andremo comunque ad analizzare le principali caratteristiche delle più note tecnologie che, se pur non attualmente utilizzate in questo giovane settore di applicazione, potrebbero in futuro determinare importanti innovazioni.

Con il termine stampo aperto si indica uno stampo che consente l'ottenimento di una sola superficie a finitura controllata dei particolari. Nel caso dei sistemi di rinforzo in ingegneria civile gli stampi sono costituiti dagli stessi elementi strutturali che vengono rinforzati. I processi a stampo aperto si prestano comunemente alla fabbricazione di parti molto voluminose: in questi casi sarebbe praticamente impossibile disporre di stampi chiusi per la loro difficile movimentazione legata al peso eccessivo. Nel campo dell'ingegneria civile, usando delle fibre secche, l'impregnazione viene eseguita tramite un pennello, al momento dell'esecuzione del particolare, contemporaneamente all'adattamento degli strati alla superficie dello stampo che nel caso specifico è costituito dal supporto in muratura o c.a. Le inevitabili bolle d'aria tra gli strati vengono eliminate eseguendo una rullatura ed eventualmente, qualora siano richiesti migliori risultati, ricorrendo ad un sacco a vuoto.

Questa serie di operazioni presenta però degli inconvenienti rispetto a tecnologie di fabbricazione più avanzate: in primo luogo, impregnando le fibre a mano si utilizza un quantitativo di resina superiore a quello strettamente necessario, ed è assai difficoltoso, anche ricorrendo alla formatura sottovuoto, eliminare la parte superflua, per cui il composito sarà di qualità più scadente perché strati di fibra molto mobili accrescono le difficoltà di esecuzione di un buon sacco a vuoto.

### **Processi produttivi dei materiali compositi**

I processi produttivi dei materiali compositi sono svariati. I più diffusi sono:

1. stesura manuale;
2. resin transfer molding (RTM);
3. filament winding;
4. pultrusione;
5. vacuum infusion (RIFT);
7. produzione in autoclave.

### **Impregnazione manuale senza applicazione di pressione o vuoto**

E' un processo tuttora largamente diffuso per lavori su superfici ampie quali piscine e scafi di imbarcazioni per i quali la produzione si svolge tipicamente per piccoli lotti ed è il processo di fabbricazione maggiormente utilizzato nell'ambito dell'ingegneria civile. Rinforzi in forma di mat, tessuto o stuoia, in percentuale come da progetto sono stesi all'interno dello stampo costituito nel caso delle applicazioni di ingegneria civile dal supporto in muratura o c.a., successivamente le fibre vengono imbevute di resina catalizzata e poi consolidate manualmente usando rulli di metallo o di plastica allo scopo di eliminare la resina in eccesso. La polimerizzazione avviene generalmente a temperatura ambiente.

I valori tipici di  $V_f$ , essendo  $V_f$  la frazione in volume delle fibre (rapporto tra il volume delle fibre ed il volume totale del composito) ottenibili con tale tecnologia, sono 25-30%.

In alcuni casi per migliorare la qualità del laminato stampato l'impregnazione dei tessuti viene effettuata prima della loro posa con apposite attrezzature, in modo da utilizzare la corretta quantità di resina per ogni lamina, in questo caso è possibile raggiungere valori di  $V_f$  anche di 35-38%.

### **Filament Winding**

E' una tecnica conosciuta da più di trenta anni, ma vantaggiosamente utilizzata solo negli ultimi anni grazie all'introduzione di materiali affidabili e di accorgimenti che hanno reso la produzione più agevole ed economica. Assieme alla pultrusione è sicuramente il processo



produttivo che ha conseguito i più rilevanti progressi di serie di elevata qualità e costi relativamente contenuti.

Il processo consiste fondamentalmente nell'avvolgimento di filamenti continui impregnati di resina su di un corpo ruotante, detto mandrino, la cui forma si identifica nella geometria del pezzo da produrre. L'indurimento della resina viene ottenuto inserendo il componente in forno od autoclave. I fattori fondamentali che governano questa tecnologia produttiva e che influiscono in maniera determinante per l'ottenimento delle caratteristiche del prodotto composito finale sono:

- a) il tipo di avvolgimento
- b) il tipo di impregnazione
- c) il tipo di mandrino
- d) il tipo di macchina
- e) il tipo di processo di polimerizzazione.

### **Pultrusione**

Il significato del termine pultrusione è estremamente chiaro se si pensa allo schema tecnologico di base del processo. Intatti, mentre l'estrusione dell'alluminio o dei termoplastici si realizza mediante un'azione di spinta sul materiale per costringerlo a passare attraverso lo stampo, nel caso dei plastici rinforzati, la stessa forma può essere ottenuta esercitando una forza di tiro (pull) sulle fibre costringendole a passare, dopo essere state bagnate con la resina, nello stampo. Quindi, l'azione di spinta tipica dell'estrusione viene sostituita dall'azione di tiro (pull), da cui il termine "pultrusion", diventando in italiano pultrusione.

La tecnologia della pultrusione è caratterizzata dalla continuità della produzione; quando il sistema è dotato di una sega automatica di tipo "volante", la produzione avviene con un intervento umano minimo, ridotto all'avvio e alla verifica di eventuali interruzioni nell'alimentazione del rinforzo nonché del livello della resina nella vaschetta d'impregnazione. La tecnologia sta trovando solo di recente applicazioni industriali significative, ma in realtà la prima applicazione si è avuta attorno al 1948 e il primo brevetto risale al 1951. I primi manufatti prodotti mediante pultrusione erano tondini a elevata finitura, i quali ancora oggi rappresentano il tipo di produzione più diffusa.

L'elevata resistenza a trazione e l'elevata percentuale di rinforzo ottenibile, combinata ad altre importanti proprietà come isolamento elettrico, resistenza alla corrosione e basso peso,



hanno ampliato il ventaglio dei prodotti pultrusi ad applicazioni come canalette portachiavi, barre per isolatori, stramazzi per impianti di trattamento liquami, passerelle, piattaforme e parapetti, scale, tubi per sezionatori e fusibili, barriere autostradali, antenne per CB, travi strutturali e tante altre ancora. Il processo richiede un rinforzo fibroso, essenzialmente continuo, e una resina a bassa viscosità, generalmente un termoindurente liquido. Il rinforzo di gran lunga più usato è il roving di vetro; solo recentemente, e per ragioni di costi limitatamente a casi particolari, sono stati impiegati rinforzi in carburo e fibre aramidiche. Questi stessi rinforzi vengono anche impiegati in compositi ibridi con il vetro. Lo schema di base del processo è:

- a) alimentazione del rinforzo;
- b) impregnazione;
- c) preformatura;
- d) formatura e polimerizzazione;
- e) tiro;
- f) taglio;
- g) postformatura.

### **Formatura per iniezione di resina (RTM resin transfer molding)**

Con il termine RTM "resin transfer moulding" si intende una tecnologia mediante la quale si fabbricano compositi a matrice polimerica, iniettando la resina catalizzata in una cavità avente la forma del pezzo da realizzare ed in cui è stato preliminarmente collocato il rinforzo asciutto. La cavità è ottenuta chiudendo stampo e controstampo, l'uno contro l'altro.

Questi possono essere di vario tipo; più comunemente si usano stampi in vetroresina o stampi in metallo.

Le fasi di fabbricazione RTM si possono riassumere nelle seguenti fasi:

- pulitura dello stampo
- applicazione del distaccante
- applicazione del gel-coat
- posizionamento del rinforzo
- chiusura e bloccaggio dello stampo

- iniezione e polimerizzazione della resina
- apertura dello stampo ed estrazione del pezzo
- operazioni di rifinitura

Le prime due fasi sono relative a tutti i tipi di tecnologie e quindi è superfluo discorrerne. Per ciò che riguarda le altre fasi, esse consistono in: deposito del rinforzo secondo le direzioni e la sequenza desiderata, accostamento delle parti dello stampo e del controstampo, iniezione della resina.

Tale operazione viene normalmente eseguita a freddo, ma è possibile riscaldare lo stampo per accelerare il processo. La pressione, essendo esercitata mediante la resina ancora liquida, si distribuisce uniformemente su tutto il laminato in fabbricazione consentendo così spessori uniformi e ottima qualità del manufatto. In genere le pressioni usate per l'iniezione variano tra 0,5 e 4 bar ed i tempi di iniezione tra i 20 secondi e i 2 minuti.

La tecnologia di formatura per iniezione di resina è molto interessante per la possibilità di automazione che offre e quindi per la produzione di componenti anche in grande serie. Inoltre è possibile stampare elementi anche di notevoli dimensioni.

### **Resin Infusion Under Flexible Tooling (RIFT)**

I limiti legislativi sull'emissione di stirene causato dall'utilizzo della resina poliestere, nelle lavorazioni per la tutela della salute degli operai, hanno indotto lo sviluppo di nuove tecnologie di fabbricazione di compositi plastici rinforzati. La tecnologia RTM ha consentito lavorazioni anche con elevata frazione volumetrica di fibre realizzando compositi nel rispetto delle tolleranze dimensionali del laminato.

Per strutture di ampie dimensioni i costi di lavorazione con tale tecnologia diventano molto elevati dovendo utilizzare stampi rigidi rinforzati per resistere alla pressione di iniezione della resina. La lavorazione RIFT (Resin Infusion Under Flexible Tooling), variante del RTM, viene eseguita utilizzando il sacco polimerico flessibile al posto di una delle facce dello stampo rigido, è più economica e operando il vuoto all'interno la resina viene spinta all'interno del rinforzo asciutto così da ridurre il contatto dell'operatore con la resina allo stato liquido e con tutti i suoi componenti volatili emessi durante la messa in opera.

Per bassi volumi di produzione si ricorre a resine alternative, epossidica o poliestere con basso contenuto di stirene. A breve termine questa può rappresentare una soluzione effettiva, ma nel lungo periodo il processo deve essere ridisegnato per acquisire i vantaggi dei sistemi economicamente più convenienti e per ridurre i rischi di incolumità.

I criteri utilizzati nella scelta di una tecnologia produttiva sono vincolate da costi, qualità, sicurezza degli operatori, esigenze progettuali. Il RIFT, come già detto, è sostanzialmente differente dalla tecnologia RTM per l'utilizzo di un film polimerico flessibile, invece di uno stampo rigido. Da appositi punti di sfogo viene creato il vuoto che compatta il rinforzo, mentre da altri punti viene fatta entrare la resina, che sotto l'azione della pressione atmosferica esterna, viene convogliata attraverso dei distributori sul rinforzo.

Il flusso potrà impregnare in due diversi modi a seconda del tipo di distributore utilizzato e dal tipo di letto fibroso: un primo modo prevede una direzione del flusso normale al piano di giacitura del rinforzo, un secondo modo prevede un'impregnazione mista con due flussi uno normale ed uno parallelo al piano di giacitura del tutto simile a quello che caratterizza l'RTM .

### **Formatura in autoclave**

La tecnologia di produzione di elementi in composito mediante l'utilizzo dell'autoclave, nata consente di ottenere laminati con caratteristiche meccaniche molto più elevate rispetto alle più tradizionali ed economiche tecnologie fino ad ora analizzate.

Con l'impiego dell'autoclave è possibile intensificare l'azione di compattazione aumentando la pressione durante il ciclo di cura fino a circa 7-10 atm e la temperatura fino a 2000 °C.

Le autoclavi più recenti offrono inoltre la possibilità di variare la pressione e la temperatura durante il ciclo di polimerizzazione secondo le leggi più opportune per il particolare tipo di resina impiegato. Una pressione maggiore garantisce l'assenza di vuoti tra gli strati ed una percentuale che può raggiungere il 65% che è il limite superiore nella fabbricazione di compositi. Questo tipo di fabbricazione viene adottato quando si devono realizzare particolari dalle caratteristiche meccaniche molto spinte come richiesto ad esempio per impiego aeronautico, spaziale e medicale.