

MATERIALI COMPOSITI: PROPRIETÀ, PROGETTAZIONE E NORMATIVE DI RIFERIMENTO
(ing. Ludovico Panunzi, WAVE Ingegneria, Fano)

L'associazione intima di due (o più) elementi insolubili l'uno nell'altro, che differiscono nella forma e nella composizione chimica, dà luogo a un materiale composito le cui caratteristiche risultano completamente diverse dai materiali costitutivi.

Uno degli elementi viene chiamato matrice mentre gli altri costituiscono le inclusioni (fibre di vetro, di carbonio, di kevlar ecc.).

Nella tabella seguente sono raggruppate le caratteristiche meccaniche di alcune fibre di maggiore uso.

	E	d	σ_R
VETRO E	72000	2550	2400
CARBONIO HS	248000	1810	4500
KEVLAR	124000	1450	2800

E [N/mm²] = modulo di elasticità longitudinale o modulo di Young

d [Kg/m³] = densità

σ_R [N/mm²] = carico di rottura

Molto importanti per le loro proprietà meccaniche sono i compositi a matrice polimerica tra i quali, particolarmente degna di rilievo è la vetroresina, derivante dall'unione di una resina e di un rinforzo vetroso che si presenta sotto forma di filamenti, di tessuti e di stuoie.

Il rinforzo di vetro, carbonio o kevlar viene associato a resine che possono essere di origine diversa. Si hanno così resine ortoftaliche, resine isoftaliche e resine vinilestere.

L'associazione della resina e del rinforzo viene favorita dall'aggiunta di sostanze catalizzanti e acceleranti.

Il tempo di conservazione delle resine si aggira attorno a 6 mesi. La loro applicazione esige temperature ambientali non superiori a 16°C e un livello di umidità inferiore al 50-60%.

La tabella seguente fornisce le caratteristiche meccaniche di alcune resine.

	d	E	σ_{RT}	σ_{RC}	ε_{RT}	HDT
	kg/m ³	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	%	°C
Poliestere isoftalica	1210	3600	60	130	2.5	95
vinilestere	1120	3400	83	120	5	110
epossidica	1200	3000	85	130	5	110

σ_{RT} = tensione di rottura a trazione

σ_{RC} = tensione di rottura a compressione

ε_{RT} = allungamento a rottura per trazione

HDT = resistenza alla temperatura

Le matrici più usate sono:

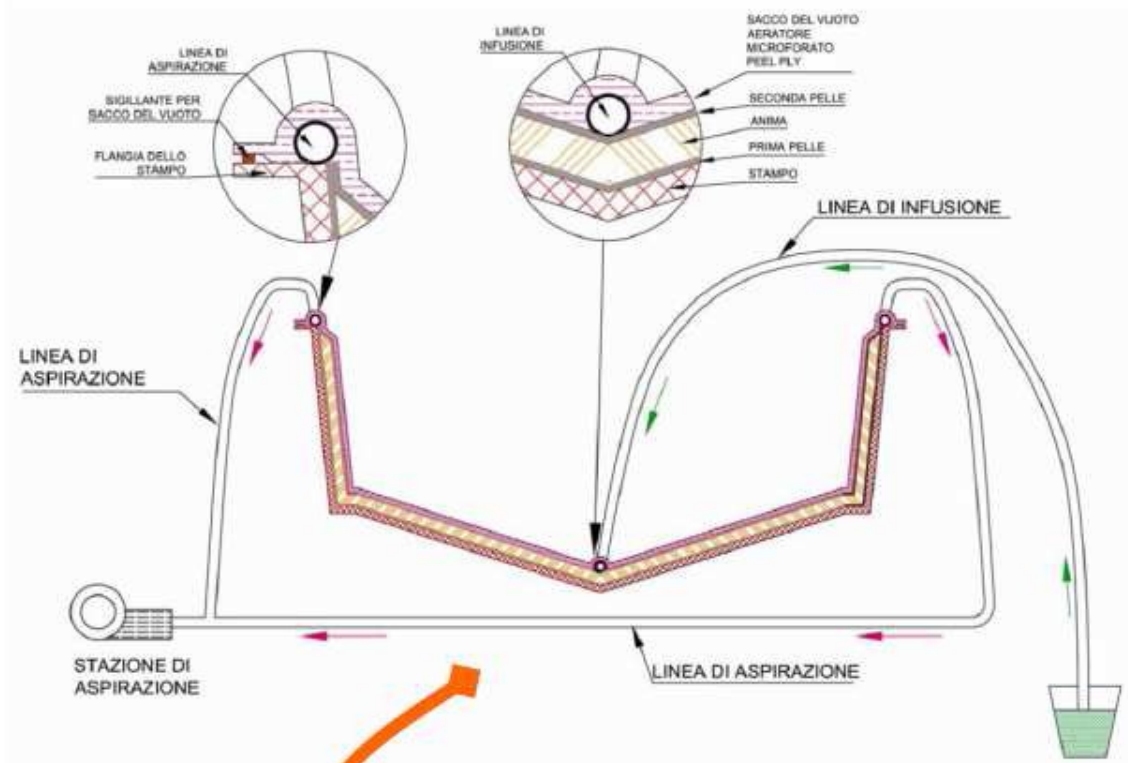
- matrici epossidiche, utilizzate per lo più con fibre di carbonio e aramidiche (per compositi pregiati, aeronautica

- matrici poliestere, utilizzate con fibre di vetro, per la costruzione di scafi, pannelli per edifici, carrozzeria autoveicoli, apparecchiature...

I manufatti di vetroresina possono assumere la forma di lastre o di sandwich. Questi ultimi, rispondono a requisiti di maggiore rigidità flessionale; si ottengono interponendo, tra due lastre esterne, un'anima alveolare oppure compatta, costituita da balsa, coremat ecc.

La resina pura (cioè con contenuto di vetro pari a 0%) ha una densità $d = 1200 \text{ kg/m}^3$ che aumenta linearmente man mano che il contenuto vetroso cresce, fino ad assumere il valore di 2560 kg/m^3 quando il contenuto di vetro sale fino al 100%.

Uno dei tanti metodi di costruzione di uno scafo in composito è il processo di infusione che consiste nella stesura delle fibre "a secco" e poi nell'inserimento meccanico, tramite una pompa, della resina, come indicato nella seguente figura. In questo modo si ottiene un manufatto con un contenuto vetroso più alto (meno resina in relazione alla fibra).



Le caratteristiche di resistenza del composito sono determinate dalla resistenza delle fibre ma sono anche influenzate dalla capacità della matrice (resina) di trasferire il carico in presenza di rotture di fibre isolate.

Le interazioni dei costituenti (matrice m e fibra f) sono analizzate nelle due seguenti condizioni teoriche di:

- isodeformazione (analogia delle molle in parallelo) $E_1 = E_f V_f + E_m V_m$

- isosforzo (analogia delle molle in serie):

$$E_2 = \frac{E_m E_f}{E_m V_f + E_f V_m} \quad G_{12} = \frac{G_m G_f}{G_m V_f + G_f V_m}$$

Nelle formule precedenti, le rigidzze: trasversale E_2 e al taglio G_{12} non sono lineari rispetto alla frazione volumetrica V_f delle fibre.

Associando una resina con un rinforzo filamentoso si realizza un materiale non isotropo in quanto esso presenta ottime caratteristiche meccaniche di resistenza a trazione solo se viene sollecitato in direzione delle fibre mentre, se viene sollecitato in direzione perpendicolare ad esse, la capacità di resistenza a trazione si riduce a quella (piuttosto bassa) della resina.

Ne segue che, volendo realizzare un materiale per quanto possibile isotropo bisognerà orientare i filamenti in diverse direzioni. A questo scopo rispondono bene le associazioni della resina con tessuti di fibre.

Per la verifica di resistenza di un generico elemento soggetto a sollecitazione è necessario confrontare il campo tensionale presente con il corrispondente campo tensionale massimo ammissibile determinato attraverso l'uso di un opportuno criterio di resistenza sulla base di dati sperimentali sulla resistenza del materiale, determinati attraverso prove condotte in presenza di sollecitazioni semplici (trazione, compressione, taglio).

Per un materiale isotropo la resistenza del materiale non dipende dall'orientamento della sollecitazione nè dall'orientamento delle tensioni principali e conseguentemente i criteri di resistenza in uso forniscono delle relazioni tra le massime tensioni e deformazioni principali presenti e la resistenza a trazione e/o compressione del materiale, senza tener conto dell'orientamento della sollecitazione. Diversa è la situazione per un materiale ortotropo nel quale la resistenza varia con l'orientamento della sollecitazione. In particolare, essa è individuata da 5 parametri: resistenza a trazione longitudinale, resistenza a trazione trasversale, resistenza a taglio, resistenza a compressione longitudinale e resistenza a compressione trasversale.

La verifica di resistenza di una lamina ortotropa consiste quindi nel confrontare lo stato tensionale presente con tali 5 parametri attraverso l'uso di un opportuno criterio di resistenza. I criteri di resistenza di uso comune nella progettazione meccanica con materiali compositi sono il criterio della massima tensione, il criterio della massima deformazione, il criterio del massimo lavoro (Tsai-Hill e Tsai-Wu).

Criterio della massima tensione

La rottura della lamina avviene allorquando una delle tensioni nel riferimento principale del materiale supera il corrispondente valore che provoca da solo la rottura del materiale. Il criterio è estremamente semplice e non considera affatto possibili interazioni tra le tensioni principali.

Nel caso di trazione, per angoli inferiori a circa 3° la resistenza della lamina è limitata dalla resistenza a trazione longitudinale; per angoli tra 3° e 25° la resistenza è limitata dalla resistenza a taglio mentre per angoli $> 25^\circ$ la resistenza è limitata dalla resistenza a trazione trasversale.

Nei compositi è quindi assolutamente necessario realizzare un accurato allineamento carico-fibre. Il criterio di resistenza, non considerando le interazioni tra le diverse sollecitazioni risulta in genere non conservativo.

Criterio della massima deformazione

Secondo questa teoria, la rottura della lamina avviene allorquando una delle deformazioni nel riferimento principale del materiale supera il corrispondente valore limite che determina da sola la rottura del materiale.

Come il criterio della massima tensione, esso non tiene conto delle possibili interazioni tra le deformazioni nel riferimento principale e pertanto, come questo, risulta non conservativo. Per applicare il criterio è necessario determinare le deformazioni nel riferimento principale e poi confrontarle con i corrispondenti valori limite.

Nel caso di materiale fragile, tale criterio si discosta poco da quello della massima tensione. In caso contrario si possono invece avere significative differenze.

Criterio del massimo lavoro (Tsai-Hill)

Si suppone che la rottura della lamina avvenga allorquando il lavoro di distorsione supera il corrispondente valore limite ammissibile. In pratica si tratta della estensione del criterio di Von Mises ai materiali anisotropi.

A differenza della teoria della massima tensione e della massima deformazione, le condizioni di resistenza di questo criterio tengono conto di tutte le componenti principali di tensione e della loro interazione. Rispetto ai criteri precedenti essa risulta più aderente ai dati sperimentali.

Criterio di Tsai-Wu

In questa teoria la condizione di rottura del materiale è individuata da una relazione quadratica tra le tre tensioni cartesiane nel riferimento principale del materiale.

Nel caso piano, il dominio di resistenza individuato dal criterio di Tsai-Wu è un ellissoide in ottimo accordo con i dati sperimentali. La bontà del metodo è pagata però dalla maggiore complessità delle prove sperimentali necessarie alla determinazione di taluni coefficienti.

Attualmente, in Italia, le norme di riferimento per la progettazione di rinforzi con materiali compositi sono il documento approvato dal CNR DT 200/2004: *“Istruzioni per la progettazione, l’esecuzione ed il controllo di interventi di consolidamento statico mediante l’utilizzo di compositi fibrorinforzati”* e le *“Linee guida per la progettazione, l’esecuzione ed il collaudo di interventi di rinforzo di strutture di c.a., c.a.p. e murarie mediante FRP”*, documento approvato il 24 luglio 2009 dall’assemblea generale del CS.LL.PP.