

Materiali Compositi

Un ***Materiale Composito*** può essere definito come:

Un sistema di materiali composto da una combinazione di due o più costituenti che differiscono nella forma e nella composizione chimica e che sono insolubili l'uno nell'altro



Materiali distinti vengono combinati assieme per formare un sistema che possieda proprietà superiori rispetto a quelle dei singoli costituenti ossia che

- Sfrutti l'azione sinergica dei costituenti di base
- Superi le limitazioni dei singoli costituenti

In natura ci sono vari esempi di materiali compositi:

Il *legno*, ad esempio, è costituito da un materiale di natura fibrosa, elastico e flessibile (la cellulosa), tenuto insieme da una sostanza cementante molto più rigida (la lignina). Anche le *ossa* e il *tessuto muscolare* del corpo umano, sono di fatto compositi fibrosi.

Materiali compositi a matrice Polimerica

Questo tipo di materiali sono costituiti da due fasi diverse macroscopicamente separate da una superficie chiaramente identificabile detta ***interfaccia***:

✓ *Matrice*

✓ *Rinforzo*

La ***Matrice***, costituita da materiale polimerico (termoplastico o termoindurente), ha i seguenti ruoli:

- trasferire lo sforzo tra le fibre
- garantire un effetto barriera verso gli agenti atmosferici
- proteggere la superficie delle fibre da abrasioni meccaniche
- dare forma al materiale

Il ***Rinforzo*** è in forma fibrosa, (ma si utilizzano anche rinforzi particellari o scheletrici) e ad esso è demandato il compito principale di **sostenere il carico a cui sarà sotto posta la struttura.**

Perché un materiale Composito?

1. Elevati rapporti caratteristiche meccaniche/Peso

In un Composito a matrice polimerica fibrorinforzato vengono dunque combinati due costituenti:

- ✓ La matrice che conferisce al materiale la sua proprietà principale ossia la leggerezza
- ✓ Le fibre che conferiscono al materiale le loro ottime proprietà meccaniche



Si ottiene così un materiale che risulta essere sia leggero che
“performante” dal punto di vista meccanico

Perché un materiale Composito?

2. Progettabilità e Anisotropia

- La principale particolarità dei compositi risiede nella **possibilità di poter progettare il materiale in funzione delle proprietà desiderate** mentre nel caso di un materiale tradizionale si possono sfruttare, al massimo, le sue caratteristiche



I materiali compositi, a differenza dei tradizionali sono **anisotropi**,
Le fibre possono essere disposte lungo determinate direzioni, assicurando al materiale caratteristiche chimico-fisiche e meccaniche ottimali lungo le stesse.

Tale peculiarità li rende i veri e propri “materiali del futuro” e li fa preferire ai materiali di uso tradizionale in numerosissime applicazioni

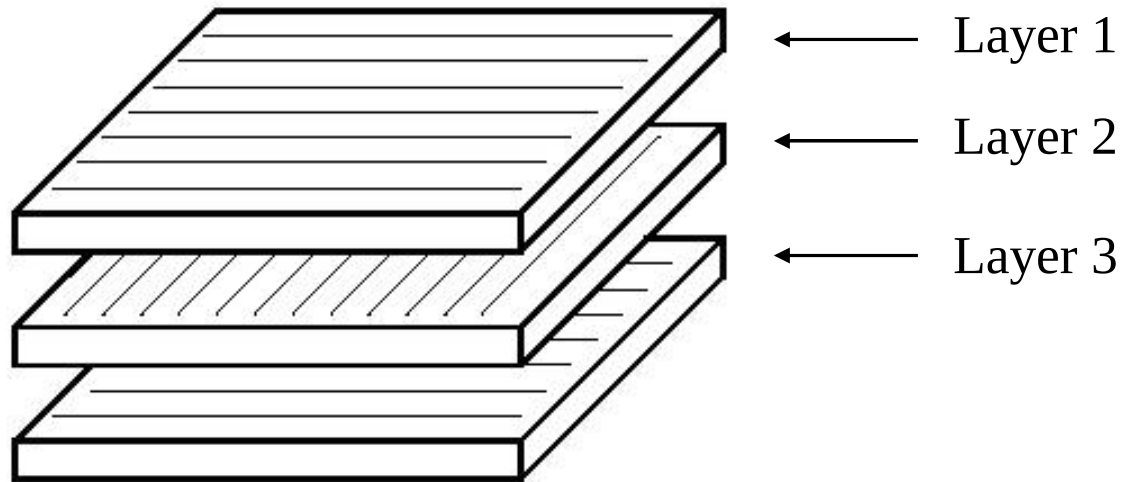
Applicazioni dei materiali compositi

SETTORE INDUSTRIALE	ESEMPI
AERONAUTICO-AEROSPAZIALE	parti di ali e code, fusoliere, antenne, pale di elicottero, carrelli di atterraggio,, pavimenti, pannelli interni, serbatoi, involucri esterni e coni terminali di razzi e missili
AUTOMOBILISTICO	parti di carrozzeria, cabine per camion, spoilers, quadri comandi, pannelli porta-strumenti, alloggiamenti per luci, paraurti, organi di trasmissione, ingranaggi,
NAUTICO	scafi , ponti, alberi, vele e relative stecche, profili strutturali ,, boe d'ancora, protezioni per motori, pannelli interni
CHIMICO	tubazioni, serbatoi, recipienti in pressione, tramogge, valvole, pompe, ventole e giranti
EDILE	passerelle e ponti per traffico leggero , condotte sotterranee, recinzioni, profilati strutturali, zoccolini corrimano, ringhiere, grondaie, profili per finestre, elementi di rinforzo per il recupero edilizio
ELETTRICO	basette per circuiti stampati, pannelli, alloggiamenti, interruttori, isolatori, connettori, condotte porta cavi, scale isolate, corde, tralicci, componenti per motori e trasformatori, utensili isolati
AGRICOLO	strutture per silos e serre, palificazioni per piantagioni, recinzioni, archetti per tunnels, scale, botti per alimenti
SPORTIVO	mazze da golf, racchette da tennis, elmetti protettivi, sci, tavole da surf e snow-board , archi e frecce, biciclette, canne da pesca, canoe, piscine,

Principale strutture in composito

1. Laminati Compositi

Un laminato può essere considerato come l'assemblaggio di più lamine composite con rinforzo di fibre unidirezionali (in inglese **ply, layer, lamina**) legate tra loro tramite un legante posto in direzione normale ai piani



Laminati Compositi

I laminati vengono classificati in funzione degli angoli di orientazione delle loro lamine :

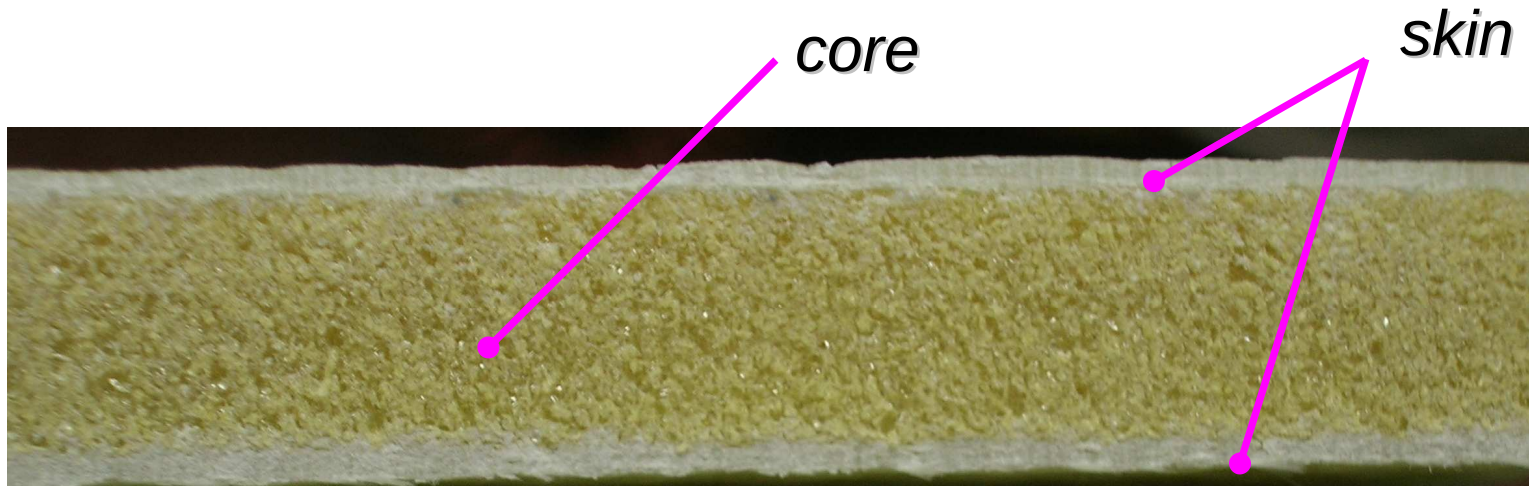
- ✓ Laminato **Unidirezionale**: L'angolo della fibra di una lamina è identico all'angolo di una qualsiasi altra lamina del composito.
- ✓ Laminato **Cross-ply**: L'angolo della fibra di ogni lamina è normale o parallela a quello delle altre lamine (per esempio contiene sono lamine 0-90°)
- ✓ Laminato **Angle-ply**: L'angolo della fibra non ha alcun limite di parallelismo o ortogonalità alle altre fibre del laminato

In realtà le lamine composite possono essere costituite anche da veri e propri tessuti di fibre chiamati **WOVEN** (con trama e ordito) oppure da stuoie di fibre corte orientate random chiamati **MAT**



2. Sandwich Compositi

Un sandwich è una struttura composita costituita essenzialmente da due pelli esterne (in inglese skin) in laminato ed un'anima centrale (in inglese core)



- Gli skin sono normalmente sottili, rigidi e resistenti
- Il core è invece molto più leggero, flessibile e meno resistente in quanto costituito in genere da materiali espansi (PVC, PU, PS etc.)

Principali tipi di matrici polimeriche

I Materiali polimerici si suddividono in due principali classi:

1. ***Polimeri Termoplastici***

2. **Polimeri Termoindurenti**



Nonostante esistano compositi a matrice polimerica termoplastica sono i polimeri **Termoindurenti**, ad essere principalmente utilizzati come matrici per i materiali Compositi fibrorinforzati

Matrici polimeriche termoindurenti

Un **polimero termoindurente** è costituito da una rete tridimensionale di atomi di C legati covalentemente fra loro per formare un solido rigido: a volte anche azoto, ossigeno, zolfo ed altri atomi sono legati covalentemente nel reticolo tridimensionale

Come si ottiene un termoindurente allo stato solido: **CURING**

1. In partenza si ha in genere la resina a T ambiente allo stato liquido. In tale stato essa è costituita da un insieme di molecole tutte uguali “svincolate” l’una dall’altra ossia libere di muoversi
2. Mediante l’utilizzo di opportuni **catalizzatori** (sostanze chimiche che promuovono le reazione fra le varie molecole di partenza) e l’applicazione di **calore e pressione** avviene un processo chimico chiamato **Curing**
3. Durante tale processo si formano dei legami covalenti (**cross-link**) che uniscono le varie molecole dando vita alla struttura tridimensionale tipica della resine termoindurenti solide (“curate”)

In definitiva, mediante il **Curing** la resina, mescolata con opportuni catalizzatori, passa dallo stato liquido in cui le molecole sono libere di muoversi perché non sono legate fra loro allo stato solido in cui le molecole sono ormai “saldate” mediante i **Cross-link** e non possono più muoversi

Differenze rispetto ai Termoplastici

- Mentre un solido termoplastico può essere rimodellato mediante un ciclo di riscaldamento e raffreddamento, una resina termoindurente una volta solida non può più essere riportata allo stato fuso mediante calore
- Quando un termoindurente è stata conferita una certa forma (ossia una volta “reticolati” o “induriti” attraverso il **Curing**), un eventuale eccessivo riscaldamento condurrebbe alla degradazione del materiale (i **Cross-link** formatisi durante il **Curing** si romperebbero definitivamente)

Resine Epossidiche

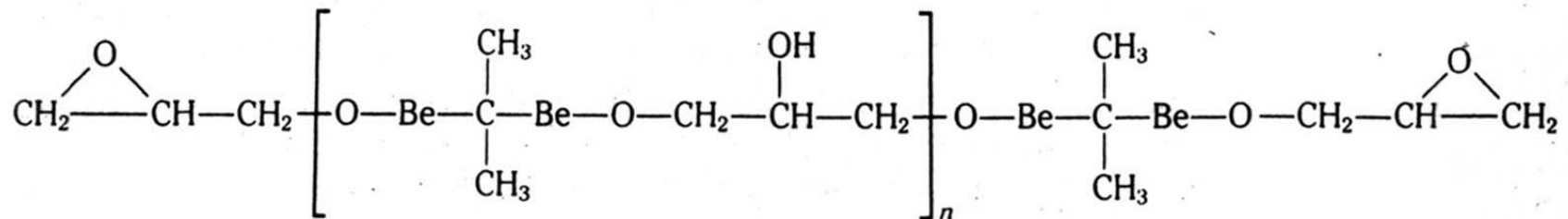
Le resine epossidiche sono una delle più importanti classi di polimeri termoindurenti adoperati come matrici per compositi.

Sono resine liquide organiche a basso peso molecolare, ma, una volta reticolate, diventano solidi che possono rammollire con il riscaldamento, ma non fondere di nuovo



Il processo di reticolazione degli epossidi è un processo irreversibile

- La maggior parte delle resine epossidiche commerciali hanno la formula generale di struttura:



Be = anello benzenico

Per prodotti liquidi $n < 2$ mentre per le resine solide $n \geq 2$

Aspetti positivi

- ✓ Elevata bagnabilità (a causa del basso peso molecolare delle resine non reticolate che comporta una mobilità molecolare elevata)
- ✓ Ottime proprietà meccaniche (Durezza, resistenza meccanica e rigidità)
- ✓ Elevata resistenza chimica (l'elevata reattività del gruppo epossidico con agenti di reticolazione come le ammine comporta un elevato grado di reticolazione)
- ✓ Bassi ritiri durante l'indurimento (non rilascia sostanze volatili durante la cura)
- ✓ Elevata rigidità dielettrica
- ✓ Capacità di mantenere inalterate le loro proprietà in una larga varietà di condizioni ambientali, ad esempio in ambienti acquosi e in condizioni di elevata umidità
- ✓ Assenza di sostanze cancerogene

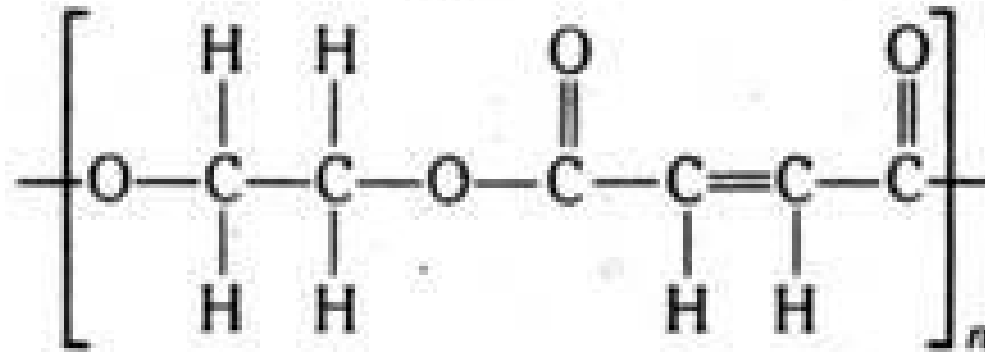
Aspetti negativi

- ✓ Bassa Resilienza
- ✓ Bassa deformazione a rottura
- ✓ Elevata Fragilità
- ✓ Lunghi tempi di Cura
- ✓ Elevato costo

Resine Poliestere

Le poliesteri hanno doppi legami covalenti Carbonio-Carbonio reattivi che possono venire reticolati per dare materiali termoindurenti

Sono le più utilizzate nel settore della nautica



Poliestere lineare

Aspetti positivi

- ✓ Bassa viscosità
- ✓ Corti tempi di cura
- ✓ Bassi costi

Aspetti negativi

- ✓ Proprietà meccaniche e chimiche più scarse (rispetto alle epossidiche)
- ✓ Elevato Ritiro
- ✓ Uso dello Stirene (cancerogeno ed altamente infiammabile) come diluente

I principali tipi di fibre utilizzati come rinforzo per materiali polimerici sono:

- **Fibre di Vetro**
- **Fibre di Carbonio**
- **Fibre Aramidiche**

Fibre di vetro

Vantaggi

- ✓ Basso costo
- ✓ Alta resistenza a trazione
- ✓ Alta resistenza chimica
- ✓ Eccellenti proprietà isolanti

Svantaggi

- ✓ Bassa Rigidezza
- ✓ Peso specifico alto (tra le fibre commerciali)
- ✓ Sensibilità all'abrasione
- ✓ Bassa resistenza alla fatica
- ✓ Eccessiva durezza

I due tipi di fibra più comunemente usati nell'industria FRP sono:

✓ **E-Glass** E = Electrical

✓ **S-Glass** S = Strength

Principali Tipologie di Fibre di vetro

- E-Glass, ha un costo più basso rispetto agli altri tipi di fibre; questo è il motivo principale del suo largo uso in campo industriale.
- La S-Glass originariamente sviluppata per componenti automobilistici, ha la più alta resistenza a trazione tra tutte le fibre commerciali in uso. Tuttavia la differenza nella composizione ed il più alto costo di manifattura fa il suo uso più dispendioso rispetto alla E-Glass.
- Una versione a costo più contenuto è la S-2Glass è stata creata negli ultimi anni.
- C-Glass, è usato nelle applicazioni chimiche dove è richiesta una maggiore resistenza alla corrosione agli acidi.
- La A-Glass è stata formulata specificatamente per l'isolamento termico.

Fibre di vetro:

Tipo	Resistenza a trazione [MPa]	Allungamento [%]	Modulo [GPa]	Coeff. Poisson
A	3310	4.8	68.9	0.183
C	3310	4.8	68.9	0.276
E	3448	4.8	72.4	0.20
S	4585	5.4	86.0	0.22
S-2	4890	5.7	86.9	0.23

Fibre di carbonio:

Vantaggi

- ✓ Alto rapporto σ/P
- ✓ Alto rapporto E/P
- ✓ Basso coefficiente di espansione termica lineare
- ✓ Alta resistenza a fatica

Svantaggi

- ✓ Bassa resistenza all'impatto
- ✓ Alta conducibilità elettrica
- ✓ **Alto costo**

A causa del loro elevato costo il loro utilizzo è ancora oggi
spesso escluso in numerose applicazioni

Vengono dunque utilizzate in quei settori in cui l'aspetto economico non ha la priorità:

- Automobilismo
- Aeronautico
- Nautico sportivo (Off Shore – Regate etc.)

Fibre di carbonio:

Tipo	Resistenza a trazione [MPa]	Allungamento [%]	Modulo [GPa]
AS 4	4070	1.8	228
IM 4	4500	1.6	276
IM 7	5150	1.9	276
T 50	2900	0.6	390
T 650	4550	1.75	241
T 300	3650	1.4	231
UHM	3730	0.8	440
GY 70	1520	0.38	483
P 55	1900	0.5	380
P 100	2400	0.3	760

Fibre Aramidiche

Esistono 3 diversi tipi di fibra aramidiche che si differenziano per composizione e caratteristiche e sono:

- Kevlar 29 (ad alta tenacità)
- Kevlar 49 (ad alto modulo di elasticità)
- Kevlar 129 (ad altissimo modulo di elasticità)

Tipo	Densità [g/cc]	Resistenza a trazione [MPa]	Allungamento [%]	Modulo [Gpa]
Kevlar 29	1.45	3620	3.6	70
Kevlar 49	1.45	3620	2.4	112
Kevlar 149	1.47	3150	2.0	179

Pregi

- ✓ Buone proprietà meccaniche
- ✓ Coefficiente di espansione termico negativo (come le fibre di Carbonio)
- ✓ Alta stabilità chimica anche se possono essere soggette ad attacchi da acidi e basi forti
- ✓ Alto allungamento a rottura (circa la metà di quello delle fibre S-Glass, ma maggiore rispetto a quello delle fibre di carbonio)

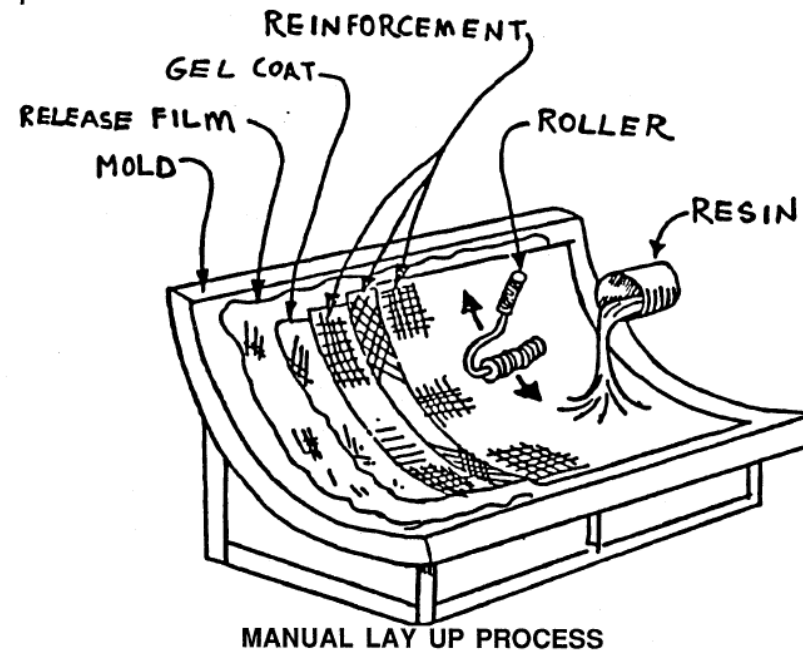
Difetti

- ✓ Bassa resistenza alla compressione
- ✓ Difficoltà nell'essere tagliate o macinate
- ✓ Alta degradazione se esposte ai raggi ultravioletti in presenza di ossigeno
- ✓ Assorbono acqua (è richiesto l'utilizzo di una protezione per conservarle dai raggi ultravioletti, l'ossigeno e l'umidità)

Tecnologie di Lavorazione dei Materiali Compositi

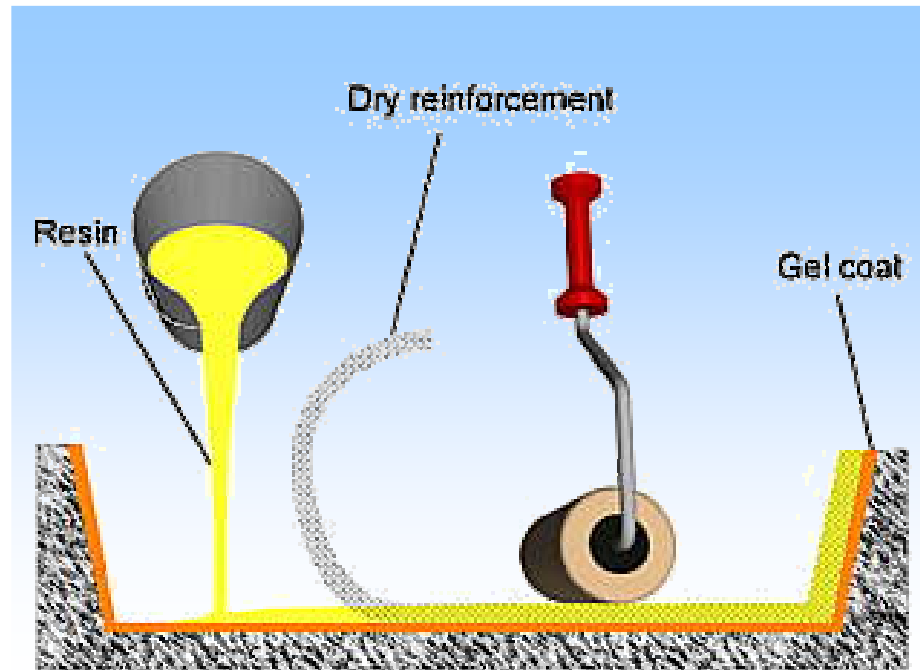
- ✓ Laminazione manuale (*Lay Up Manuale*)
- ✓ Stampaggio Sottovuoto (*Vacuum Bagging*)
- ✓ Stampaggio ad infusione (*Vacuum Infusion*)
- ✓ *Resin Transfer Moulding*
- ✓ Avvolgimento Filamentare (*Filament Winding*)
- ✓ Pultrusione (*Pultrusion*)

Tecnologie di produzione: Lay Up Manuale



- ✓ Metodo artigianale e semplice
- ✓ Fa uso di dispositivi economici (rulli o spatole)
- ✓ Lo stampo (Mold) è l'unico elemento che ha elevata incidenza economica

Tecnologie di produzione: Lay Up Manuale



- ✓ Si dispongono all'interno dello stampo le fibre (*Dry Reinforcement*)
- ✓ Queste vengono impregnate di resina liquida (*Resin*) tramite opportuni rulli (*Roller*)
- ✓ Tale operazione viene ripetuta varie volte fino a ottenere lo spessore voluto

Aspetti negativi del Lay - Up Manuale

1. Tecnica di tipo Manuale

La componente umana è fondamentale:

I pezzi realizzati spesso sono caratterizzati da diverse tipologie di difetti



Tutto dipende dall'esperienza e dalla bravura degli operatori

2. Processo a stampo aperto

Contatto diretto, durante la fase di laminazione, degli operatori con la resina liquida la quale contiene sostanze volatili infiammabili e cancerogene (Es: Stirene)

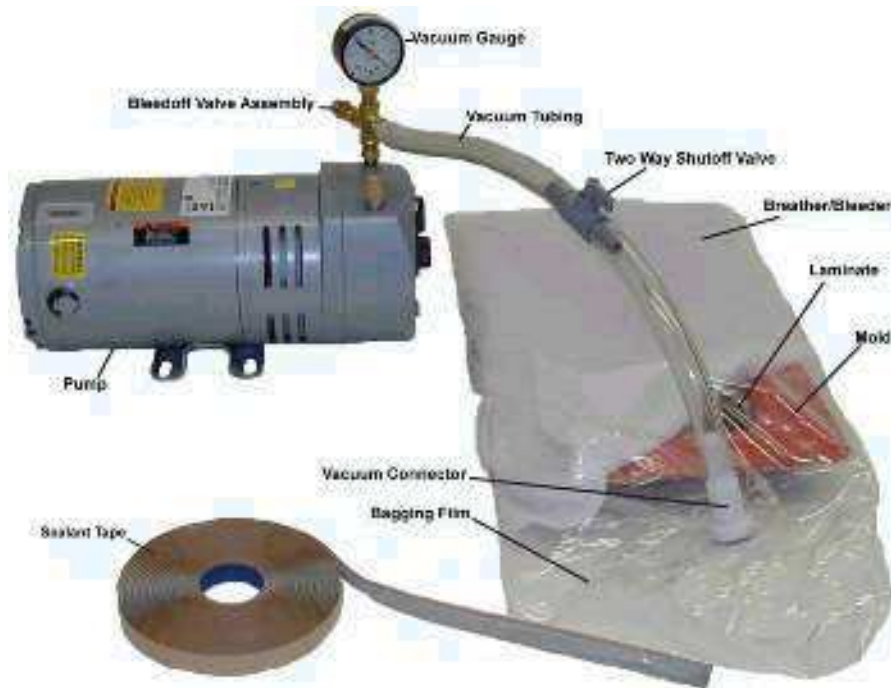
Difetti dovuti alla componente umana

- ✓ **bolle d'aria**: si presentano in quelle zone del laminato non perfettamente impregnate di resina, particolarmente deleterie dal punto di vista strutturale, fungono da siti preferenziali per l'innesco di eventuali delaminazioni, con forte diminuzione delle proprietà meccaniche.
- ✓ **sporczia**: gli operatori, dovendo entrare nello stampo per posizionare le varie pelli, rischiano di portare sotto le suole impurità presenti nella zona del cantiere che vengono inglobate nella stratificazione.
- ✓ **Errata orientazione delle fibre**: Durante la fase di laminazione, che deve essere ridotta al minimo per evitare la reticolazione della resina ancor prima di aver compiuto l'intera laminazione, le fibre tendono a muoversi e ad allontanarsi dall'orientazione stabilita in fase di progetto con la quale si erano disposte all'interno dello stampo

Con il Lay - Up Manuale si hanno:

1. Bassi costi di produzione
2. Pezzi con difetti che, in ogni caso, non presentano le caratteristiche previste in fase di progetto
3. Bassa riproducibilità
4. Consumo di elevate quantità di materiale (per compensare le carenze dovute alle difettosità)
5. Forte impatto ambientale e sulla salute dell' uomo

Stampaggio sottovuoto (Vacuum Bagging)



Tale tecnica consiste nel creare una pressione meccanica su un laminato durante il suo ciclo di cura:

1. Lo stratificato si realizza secondo la tecnica del *lay-up* manuale
2. Poi viene inserito all'interno di un sacco per il vuoto, sigillato alle estremità, sul quale viene praticato un foro da cui può essere estratta l'aria, contenuta all'interno del sacco, tramite una pompa da vuoto

Aspetti benefici dovuti alla depressione:

1. Viene rimossa l'aria intrappolata tra gli strati
2. Vengono compattati gli strati di fibra per avere un'efficiente trasmissione delle forze e per impedire lo spostamento delle fibre durante la cura
3. Si riduce l'umidità (eliminando la presenza di acqua che influenza negativamente le proprietà del materiale composito)
4. Si ottimizza il rapporto fibra/resina nella struttura composita, in quanto rende possibile l'eliminazione della resina in eccesso
5. Permette una distribuzione omogenea della resina evitando la presenza di zone in cui il rinforzo non è impregnato e zone in cui c'è un eccesso di resina
6. Consente di realizzare manufatti di peso notevolmente inferiore grazie all'eliminazione della resina in eccesso



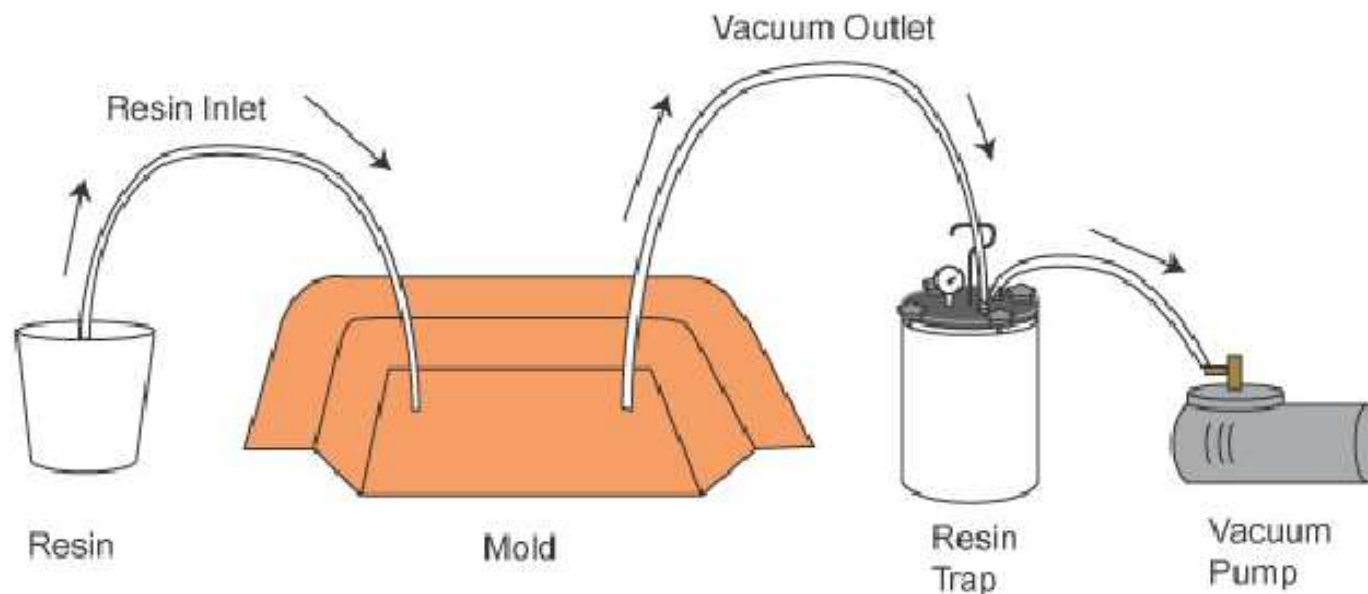
**Gli errori umani nella fase iniziale di laminazione vengono “eliminato”
grazie alla depressione**

Aspetti negativi:

1. Non consente di superare una delle problematiche del **lay up manuale** ossia quella del contatto diretto fra operatori e resina che, come è noto, contiene sostanze tossiche (la laminazione, come nel **lay up**, viene fatta a stampo aperto)
2. E' una tecnica molto più costosa da realizzare rispetto al **Lay Up** (il maggior costo è dovuto soprattutto all'utilizzo della pompa da vuoto)

Stampaggio ad Infusione (Vacuum Infusion)

- ✓ Si producono pezzi in materiale composito mediante depressione
- ✓ Una pompa da vuoto è collegata ad un sacco chiuso, all'interno del quale c'è lo stampo su cui sono disposte le fibre" a secco"
- ✓ Il sacco è inoltre connesso a sua volta con un contenitore pieno di resina liquida
- ✓ Il vuoto applicato dalla pompa permette il "risucchio" della resina che va ad impregnare automaticamente le fibre



Una delle caratteristiche peculiari del VIP è la presenza di una membrana flessibile (al posto del controstampo rigido che viene usato in RTM) che viene sigillata sul contorno dello stampo dopo la deposizione delle fibre

Vantaggi del Vacuum Infusion

1. Nessun contatto fra operatori e resina liquida

Poiché le fibre vengono disposte a secco nello stampo e solo dopo aver chiuso lo stampo la resina viene “risucchiata” andando a impregnare le fibre, il ***Vacuum Infusion***, a differenza delle precedenti, è una tecnica a stampo chiuso

2. Produzione di componenti privi di difetti

3. Tempi di produzione contenuti

Poiché il vuoto è applicato mentre le fibre di rinforzo sono ancora secche, si annullano i tempi necessari per l’impregnazione manuale dei tessuti, oltre che agevolare la deposizione dei tessuti stessi (ancora secchi e quindi facilmente posizionabili)

Micromeccanica

Un materiale composito è costituito da due materiali distinti, la fibra di rinforzo e la matrice ognuno con le sue proprietà meccaniche, come rigidità e resistenza



Quando i due materiali sono combinati per realizzare un composito, le proprietà meccaniche non dipendono solo da quelle dei due materiali che sono accoppiati, ma da:

- ✓ Ammontare relativo di ciascun componente (frazioni in peso o volume)
- ✓ Forma e dimensioni del rinforzo
- ✓ Orientamento dello stesso riguardo ai carichi che saranno applicati al composito

Micromeccanica

Lo scopo della micromeccanica è proprio quello di determinare i moduli e la resistenza di un composito, conoscendo le proprietà dei costituenti di partenza

Al fine di semplificare le trattazioni matematiche sono poste delle assunzioni importanti:

1. Perfetta adesione tra fibra e matrice
2. Le sezioni normali all'asse delle fibre rimangono piane
3. Fibre continue e identiche tutte allineate nella stessa direzione

Micromeccanica

Le strutture composite, generalmente, possono essere considerate come costituite dalla sovrapposizione di diverse lamine composite con rinforzo di fibre unidirezionali (in inglese **ply, layer, lamina**).



L'insieme di queste lamine è denominato laminato

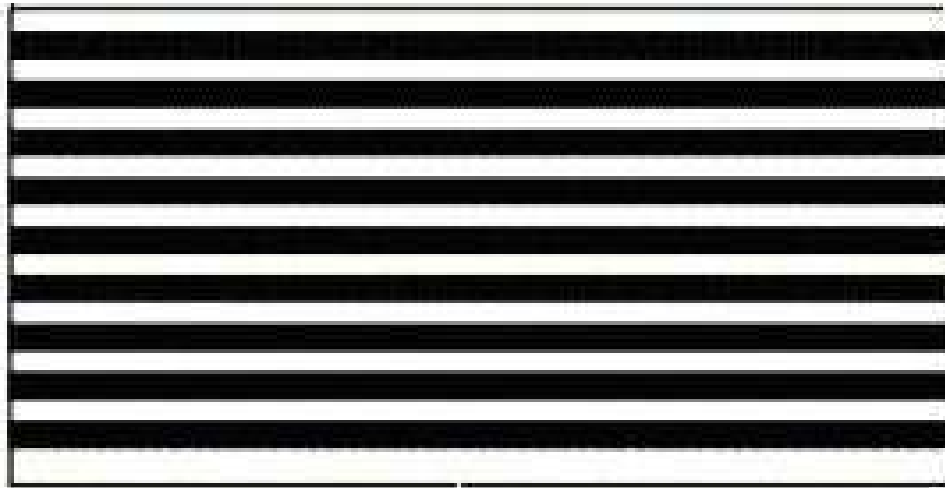
- Se i laminati sono costituiti da lamine diverse tra loro (aventi cioè diverso tipo di fibra, matrice o percentuale volumetrica) sono denominati **laminati ibridi**.



per poter risalire al comportamento meccanico dei laminati è necessario approfondire le conoscenze sulla **singola lamina composita**.

Lamina ortotropa

- Lamina con proprietà meccaniche differenti lungo le varie direzioni del piano.
- Una tipica lamina ortotropa è quella caratterizzata da **fibre di rinforzo lunghe orientate unidirezionalmente**
- Tale lamina presenterà proprietà meccaniche ottimali lungo la direzione delle fibre e decrescenti all'aumentare dell'angolo di orientazione, rispetto alla direzione di cui prima.



Comportamento a carico Longitudinale

Si consideri una lamina a fibre parallele lungo la direzione di carico



Per garantire l'equilibrio lungo la direzione delle fibre, si deve verificare:

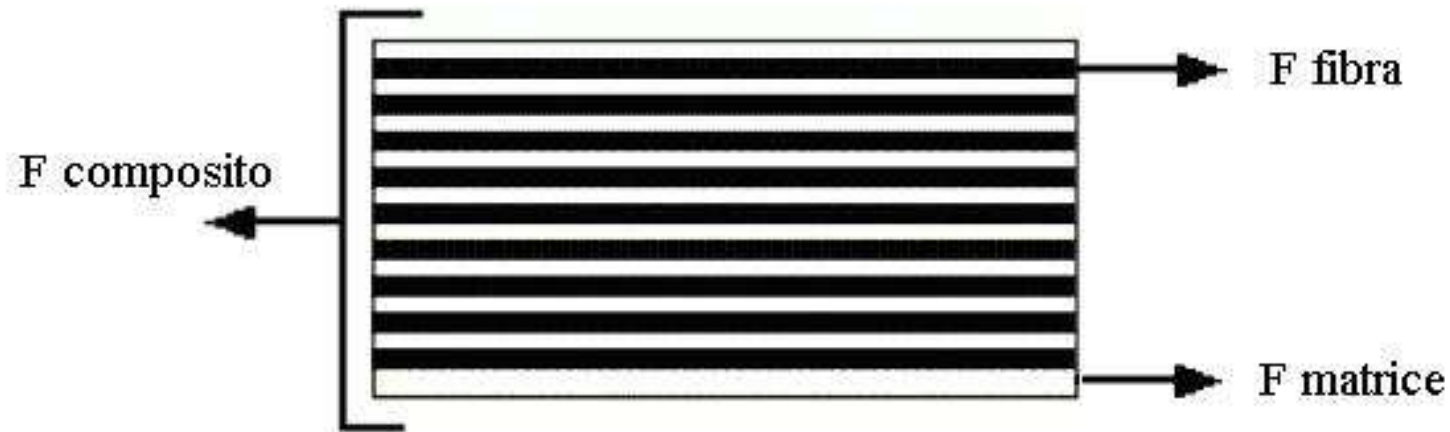
$$F_c = F_f + F_m \quad \rightarrow \quad \sigma_c \cdot A_c = \sigma_f \cdot A_f + \sigma_m \cdot A_m$$

Tenendo conto che $A_f = A_c \cdot v_f$ $A_m = A_c \cdot v_m$ si ha:

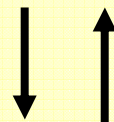
$$\sigma_c \cdot A_c = \sigma_f \cdot A_c \cdot v_f + \sigma_m \cdot A_c \cdot v_m$$

$$\sigma_c = \sigma_f \cdot v_f + \sigma_m \cdot v_m$$

Condizioni di Isodeformazione



Se si assume la perfetta adesione all'interfaccia fibra-matrice



La deformazione ε deve essere la stessa per entrambi i costituenti del composito altrimenti si formerebbero delle aree di discontinuità lungo gli estremi della lamina

$$\varepsilon_m = \varepsilon_f$$

$$\sigma_c = \sigma_f \cdot \nu_f + \sigma_m \cdot \nu_m \quad (1)$$



Lo sforzo nel composito è la somma degli sforzi nella fibra e nella matrice moltiplicati per le loro sezioni trasversali relative

Gli sforzi nelle fibre e nella matrice sono diversi

In campo elastico si ha: $\sigma = E \cdot \varepsilon$



(2)

$$\checkmark \varepsilon_f = \varepsilon_m$$

$$\checkmark E_f \gg E_m$$



$$\sigma_f \gg \sigma_m$$

Sostituendo la (2) nella (1) si ha:

$$E_c \varepsilon = E_f \cdot \varepsilon \cdot \nu_f + E_m \cdot \varepsilon \cdot \nu_m$$

$$E_c = E_f \cdot \nu_f + E_m \cdot \nu_m$$

Valida solo in campo elastico

Laminato sottoposto a carico Longitudinale $\longrightarrow$ Condizioni di Isodeformazione

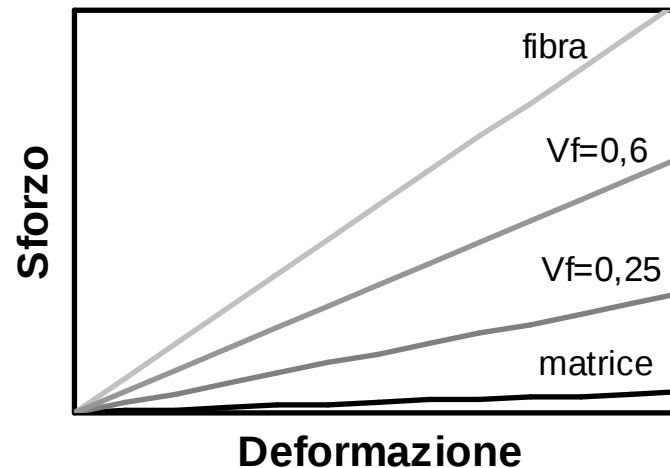
$$\sigma_c = \sigma_f \cdot v_f + \sigma_m \cdot v_m$$

$$E_c = E_f \cdot v_f + E_m \cdot v_m$$

Regola delle miscele

Essendo le media pesate secondo i volumi di fibra e matrice si ha:

1. La **Rigidezza** del composito è intermedia tra quella della matrice e quello della fibra
2. La **Resistenza** del composito è intermedia tra quella della matrice e quello della fibra (dato dalla media pesata secondo i volumi di fibra e matrice)



Resistenza Longitudinale a Trazione e Design

I moduli della fibra, della matrice e del composito possono essere espressi in termini di sforzi e deformazioni

$$E_i = \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i}$$

Considerando che $\varepsilon_f = \varepsilon_m = \varepsilon_c$ si ottiene

$$\frac{E_f}{E_m} = \frac{\sigma_f}{\sigma_m}$$

Allo stesso modo

$$\frac{E_f}{E_c} = \frac{\sigma_f}{\sigma_c} \quad \text{da cui}$$

$$\sigma_f = \sigma_c \cdot \frac{E_f}{E_c} = \frac{\sigma_c \cdot E_f}{E_m \cdot \nu_m + E_f \cdot \nu_f}$$

$$\sigma_f = \frac{\sigma_c \cdot E_f}{E_m \cdot \nu_m + E_f \cdot \nu_f} \quad \rightarrow \quad \frac{P_f}{A_f} = \frac{P_c / A_c \cdot E_f}{E_m \cdot \nu_m + E_f \cdot \nu_f}$$

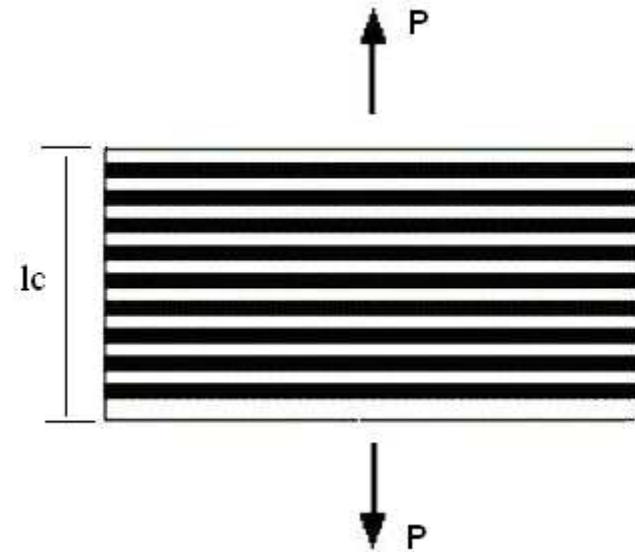
Da cui $\frac{P_f}{P_c} = \frac{A_f / A_c \cdot E_f}{E_m \cdot \nu_m + E_f \cdot \nu_f}$ e quindi:

$$\frac{P_f}{P_c} = \frac{E_f \nu_f}{E_f \nu_f + E_m (1 - \nu_f)}$$

$$\frac{P_f}{P_c} = \frac{\frac{\sigma_f}{\varepsilon} \nu_f}{\frac{\sigma_f}{\varepsilon} \nu_f + \frac{\sigma_m}{\varepsilon} (1 - \nu_f)} \quad \rightarrow \quad \frac{P_f}{P_c} = \frac{\sigma_f \nu_f}{\sigma_f \nu_f + \sigma_m (1 - \nu_f)}$$

Comportamento a carico Trasversale: Isosforzo

1. si consideri una lamina a fibre parallele lunghe sottoposto ad un carico in direzione perpendicolare a quello delle fibre
2. lo sforzo è trasferito alle fibre attraverso l'interfaccia fibra-matrice



✓ Nell'ipotesi di perfetta adesione lo sforzo agente sul composito è uguale a quelli agenti sullo strato di fibra e su quello di matrice :

$$\sigma_c = \sigma_f = \sigma_m$$

✓ Lo spostamento totale del composito lungo la direzione del carico sarà proprio la somma degli spostamenti della fibra e della matrice :

$$\delta_c = \delta_f + \delta_m$$

Condizioni di Isosforzo

$$\delta_c = \delta_f + \delta_m$$

Tenendo conto che $\varepsilon = \frac{\delta}{l}$ si ha: $\varepsilon_c \cdot l_c = \varepsilon_m \cdot l_m + \varepsilon_f \cdot l_f$

Moltiplicando ambo i membri per $A_c = A_f = A_m$ si ottiene:

$$\varepsilon_c \cdot l_c \cdot A_c = \varepsilon_m \cdot l_m \cdot A_m + \varepsilon_f \cdot l_f \cdot A_f \quad \text{per cui si ha}$$

$$\varepsilon_c V_c = \varepsilon_m V_m + \varepsilon_f \cdot V_f \quad \longrightarrow \quad \varepsilon_c = \varepsilon_m \frac{V_m}{V_c} + \varepsilon_f \cdot \frac{V_f}{V_c}$$

$$\boxed{\varepsilon_c = \varepsilon_m V_m + \varepsilon_f \cdot V_f}$$

Condizioni di Isosforzo

$$\varepsilon_c = \varepsilon_m \cdot \nu_m + \varepsilon_f \cdot \nu_f$$

Tenendo conto della legge di Hooke si ha:

$$\frac{\sigma_c}{E_c} = \frac{\sigma_m}{E_m} \cdot \nu_m + \frac{\sigma_f}{E_f} \cdot \nu_f$$

Essendo in condizioni di isosforzo $\sigma_c = \sigma_f = \sigma_m$ da cui:

$$\frac{1}{E_c} = \frac{1}{E_m} \cdot \nu_m + \frac{1}{E_f} \cdot \nu_f \quad \longrightarrow \quad \frac{1}{E_c} = \frac{\nu_m \cdot E_f + \nu_f \cdot E_m}{E_m \cdot E_f}$$

$$E_c = \frac{E_m \cdot E_f}{\nu_m \cdot E_f + \nu_f \cdot E_m}$$

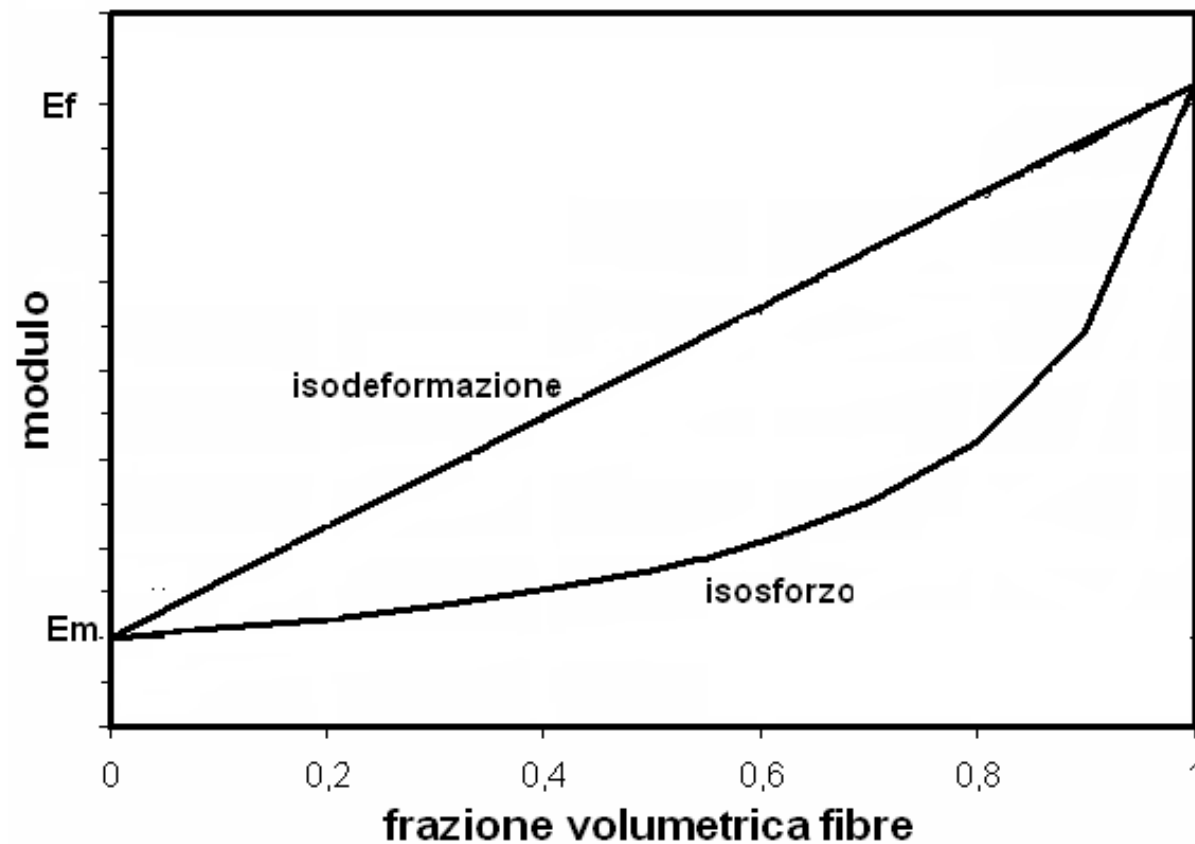
Modulo Elastico a trazione in Isosforzo e Isodeformazione

Isosforzo

$$E_c = \frac{E_m \cdot E_f}{\nu_m \cdot E_f + \nu_f \cdot E_m}$$

Isodeformazione

$$E_c = E_f \cdot \nu_f + E_m \cdot \nu_m$$



Densità dei Compositi

Il peso di un composito può essere considerato come la somma dei pesi dei propri costituenti

$$W_c = W_f + W_m$$

I pesi possono essere espressi in termini delle proprie densità e volumi cioè

$$\rho_c V_c = \rho_f V_f + \rho_m V_m$$

Con
$$v_f = \frac{V_f}{V_c} \quad v_m = \frac{V_m}{V_c}$$
 frazioni in volume dei fibra e matrice

Da cui si ottiene la densità del composito

$$\rho_c = \rho_f v_f + \rho_m v_m \quad \text{Regola delle miscele}$$