



**Materiali innovativi
e loro impiego in campo strutturale**



L. Vergani

INTRODUZIONE

DEFINIZIONE: i materiali compositi sono il risultato di una combinazione tridimensionale di almeno due materiali tra loro chimicamente differenti con un'interfaccia di separazione.

- In natura sono presenti diversi materiali compositi: il legno, costituito da fibre di cellulosa nella lignina, le ossa
- L'uso dei materiali compositi era noto già agli antichi egizi che infatti avevano imparato a miscelare paglia e fango per ottenere mattoni da costruzione più resistenti e meno fragili di quelli ottenuti da solo fango.
- L'aggiunta di tondini di ferro al calcestruzzo impartisce al calcestruzzo armato resistenza alla trazione e l'uso di fibre ad elevate proprietà meccaniche consente di impiegare materiali polimerici per fabbricare aerei od automobili.
- La combinazione di due o più materiali diversi in un materiale composito produce oggi materiali e strutture che trovano applicazioni vaste e sempre più numerose.



INTRODUZIONE

- Ciò che distingue i materiali compositi moderni da quelli più tradizionali è la capacità di ottenere prodotti con struttura e proprietà controllate alla scala microscopica.

Confronto tra le caratteristiche delle diverse classi di materiali di uso ingegneristico: **metalli**, **ceramici** e **vetri**, **polimeri**

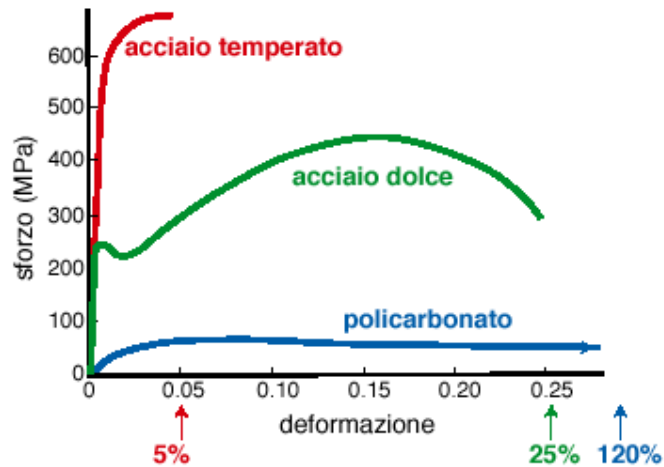
Proprietà	Metalli	Ceramiche		Polimeri
		in massa	in fibre	
Resistenza a trazione	↗	↘	↗↗	↔
Rigidezza	↗↗	↔	↗↗	↘
Tenacità	↗	↘	↔	↗
Resistenza all'impatto	↗	↘	↔	↗
Limite di fatica	↗	↔	↗	↗
Creep	↔	↔	↗↗	↘
Durezza	↗	↗	↗	↘
Densità	↘	↗	↗	↗↗
Stabilità dimensionale	↗	↔	↗	↘
Stabilità termica	↔	↗	↗↗	↘
Caratteristiche igroscopiche	↗↗	↔	↗	↔
Resistenza all'ambiente	↔	↔	↔	↗
Usura	↗	↗	↗	↘
Resistenza alla corrosione	↘	↔	↔	↗↗

↗↗ : eccellente
 ↗ : buona
 ↔ : variabile
 ↘ : scarsa



INTRODUZIONE

Confronto tra le caratteristiche meccaniche



Materiale	Modulo E [MPa]	Resistenza R_m [MPa]
Acciaio temprato	200.000	700-1000
Acciaio dolce	200.000	300-600
Policarbonato	2000-5000	40-80



INTRODUZIONE

I materiali compositi permettono di combinare le caratteristiche dei diversi materiali per ottenere un materiale **"su misura"**



matrice

polimerica, ceramica, metallica

- permette l'**utilizzo strutturale** delle fibre tenendole insieme e trasmettendo alle stesse la sollecitazione esterna
- **protegge** le fibre dagli agenti ambientali
- conferisce al composito **tenacità e resistenza alla fatica**

+



fibre

vetro, carbonio, arammide
continue, discontinue
unidirezionali, tessute, ...

- sostengono i carichi (**resistenza**)
- limitano le deformazioni (**rigidezza**)
- danno **proprietà ottimali** in direzioni volute (se orientate opportunamente)



Il polimero utilizzato come matrice può essere:

- termoplastico (non modifica le sue caratteristiche se è scaldato e poi raffreddato)
- termoindurente (modifica la struttura se è scaldato)

		Max temperatura utilizzo [°C]	Vantaggi	Svantaggi
POLIMERI TERMOPLASTICI	PA, PP, PBT, PET, PC, POM, ...	100 – 180	buona tenacità	lavorazioni ad alta temperatura
	Polietereterchetone (PEEK)	300	temperature d'impiego elevate	difficoltà di impregnazione delle fibre
	Poliammideimmide (PAI)	260		
	Polieteresulfone (PES)	200		
POLIMERI TERMOINDURENTI	Poliestere	120	lavorazioni a bassa temperatura	spesso fragili
	Fenoliche	200	facilità di impregnazione delle fibre	temperature d'impiego medio basse
	Eossidiche	180		



- Le resine *termoplastiche* sono mediamente più tenaci e possono essere impiegate a temperature più elevate rispetto alle resine termoindurenti.
- Inoltre, la possibilità di rendere fluido il materiale aumentando la temperatura consente di semplificare notevolmente le operazioni di manutenzione e di riparazione dei manufatti.
- Il principale limite all'uso di queste matrici è la loro elevata viscosità, che può rendere problematico il processo di impregnazione delle fibre.
- Nel settore dei materiali compositi a fibra continua per applicazioni strutturali l'impiego di matrici polimeriche termoplastiche è in costante aumento, soprattutto laddove siano richieste elevata resistenza all'impatto ed elevate temperature di esercizio.

Resine acetaliche:

- fino a 90°C
- basso coefficiente di attrito (possibilità di diminuirlo con additivi al fluoro)
- Tecnologia: stampaggio a iniezione
- Applicazioni: ruote dentate, molle, galleggianti, pale di ventilatori...

Resine al polimetilmetacrilato (PMMA):

- ottime caratteristiche termiche, ottiche, chimiche
- nomi commerciali: plexiglas, acrylite
- tecnologia: stampaggio a iniezione o laminazione
- problemi: elevato ritiro
- applicazioni: pannelli, tubi, ...



Resine acrilonitrile-butadiene-styrene (ABS):

- buona resistenza all'urto
- basse caratteristiche meccaniche
- basso costo
- tecnologia: stampaggio a iniezione
- problemi: elevato ritiro
- applicazioni: sedie, tavoli, copricerchi per auto, oggettistica, componenti per PC



Le resine poliammidiche:

- Buone caratteristiche meccaniche e tenacità anche a temperature elevate
- Buona resistenza all'abrasione
- Basso coefficiente di attrito
- Buona riciclabilità
- Tecnologia: stampaggio ad iniezione e altre
- Applicazioni: componenti in campo automobilistico e anche aerospaziale

Policarbonato:

- Buona resistenza agli urti e al creep
- Tecnologia: stampaggio ad iniezione
- Applicazioni: sedie, tavoli, alimentari, elmetti, caschi ...



Le resine *termoindurenti* sono sostanze polimeriche a basso peso molecolare, liquide a temperatura ambiente con viscosità sufficientemente bassa da permettere un agevole processo di impregnazione delle fibre. Quando miscelate con opportuni agenti reticolanti e in presenza di catalizzatori, queste resine danno luogo ad una reazione chimica di reticolazione che ne eleva il peso molecolare fino a portarle allo stato solido vetroso (*indurimento*). Tale reazione è spesso attivata mediante un riscaldamento ad una temperatura opportuna detta temperatura di *cura*.

Le più comuni resine termoindurenti per compositi sono le fenoliche, le poliestere, le epossidiche.

I limiti intrinseci delle resine termoindurenti sono: la scarsa tenacità, le temperature massime di esercizio piuttosto modeste e la tendenza ad assorbire umidità dall'ambiente

Resine fenoliche

- sono state le prime resine termoindurenti ad essere utilizzate in applicazioni aeronautiche.
- caratteristiche di resistenza alla combustione con trascurabile sviluppo di fumo e gas tossici le rendono tutt'oggi competitive con le altre resine termoindurenti.
- La temperatura massima di esercizio è prossima a 200°C, ma la resistenza all'ossidazione è piuttosto modesta.
- buona resistenza all'attacco dei solventi e dell'umidità ambientale.
- densità di reticolazione è piuttosto elevata e di conseguenza il comportamento a rottura è tendenzialmente fragile.
- Applicazioni: vastissime, in particolare i pannelli ottenuti per laminazione con tessuti di rinforzo

resine poliesteri

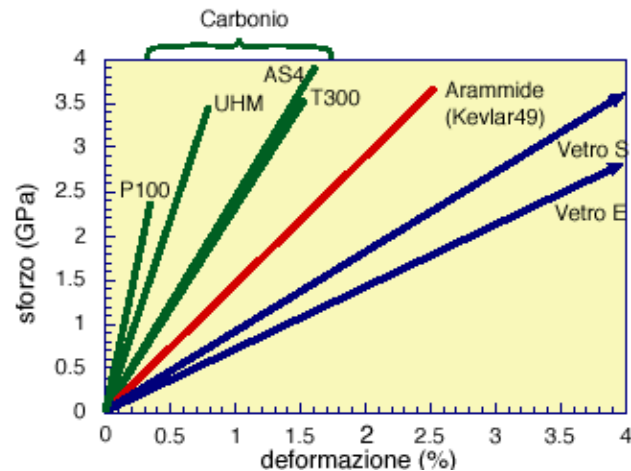
- notevole versatilità ed elevata reattività.
- ritiro di volume durante la reticolazione, coefficiente di espansione termica e capacità di assorbire umidità dall'ambiente piuttosto elevati, per cui si possono creare problemi legati allo sviluppo di sforzi interni e perdita adesione con le fibre.
- La resistenza meccanica e le proprietà adesive sono modeste e la temperatura massima di esercizio è dell'ordine dei 120°C.
- Variando il tipo e la quantità di catalizzatore la reazione può essere condotta sia a temperatura ambiente che ad elevata temperatura a seconda delle necessità tecnologiche e delle proprietà finali desiderate.
- La famiglia delle resine poliesteri per materiali compositi è composta essenzialmente da *isoftaliche*, *ortoftaliche* e *bisfenoliche*.
- Per impieghi in ambienti fortemente aggressivi dal punto di vista chimico ad elevata temperatura sono state sviluppate le resine *vinilestere*, che dal punto di vista applicativo hanno caratteristiche intermedie tra le resine poliesteri tradizionali e le resine epossidiche.

resine epossidiche

- costo più elevato rispetto a quello delle resine poliestere
- Ottime proprietà adesive e maggiore resistenza all'umidità e agli agenti chimici.
- Facilità di lavorazione
- indicate per la realizzazione di compositi ad elevate prestazioni.
- Il loro comportamento a frattura è tendenzialmente fragile, ma la loro tenacità può essere aumentata sensibilmente con l'aggiunta di particelle di gomma.
- La temperatura massima di esercizio può arrivare fino a circa 180°C.

Rinforzo

Rinforzo	Modulo E [GPa]	Resistenza [GPa]	Massa Volumica [Kg/dm ³]	Vantaggi	Svantaggi
Vetro E	76	~2.0	2.54	elevata resistenza basso costo	bassa rigidezza bassa vita a fatica
Vetro S	85	~3.5	2.48		
Arammide (Kevlar)	60-125	~3.5	1.45	elevata resistenza a trazione	scarsa resistenza a compressione
Carbonio (alta resistenza)	250	~3.0	1.8	elevata resistenza e rigidezza	costo elevato
Carbonio (alto modulo)	390	~2.2	1.8	rigidezza molto elevata	modesta resistenza costo elevato
Acciaio	210	0.4	7.8		
Polimeri	1-4	0.04-0.1	~1		



Circa il 65% delle applicazioni dei materiali compositi utilizza la fibra di vetro come fase di rinforzo e resine poliesteri, vinilisteri o epossidiche come matrice. Questa categoria di compositi è comunemente detta *vetroresina*.

I fili sono caratterizzati essenzialmente dalla loro composizione chimica, dal diametro dei filamenti e dal loro numero.

I fili vengono infine raccolti, perlopiù senza ritorcitura, in fasci da 20 a 200 che prendono il nome di *roving*.

Il roving viene direttamente utilizzato in processi tecnologici di lavorazione quali pultrusione, avvolgimento e laminazione manuale o può essere tagliato in fibre molto corte (*chopped-strand fibers*) di lunghezza di solito inferiore al mm, da impiegare nella realizzazione di compositi meno pregiati.

Le fibre di vetro sono anche disponibili in forma di foglio sottile, che prende il nome di *mat*. Un *mat* è essenzialmente un tessuto non tessuto, e può costituito sia da fibre continue che da fibre discontinue, queste ultime di lunghezza tipica compresa tra 25 e 50 mm. In entrambi i casi, le fibre sono disposte casualmente sul piano e assemblate mediante un legante chimico.

- basso costo,
- elevata resistenza - oltre 4 volte superiore rispetto a quella dell'acciaio
- media resistenza a fatica.
- il modulo di elasticità (di poco superiore a 70 GPa) e la resistenza all'abrasione sono relativamente modesti,
- soggette a perdita di adesione con la matrice, specialmente in ambiente umido, (uso di appretti silanici applicati direttamente durante la fase di filatura delle fibre).
- La densità del vetro è la più elevata nella classe delle fibre di rinforzo (2.5 kg/dm^3).

Per la fabbricazione di compositi ad alte prestazioni si utilizzano altri tipi di fibre come le fibre di carbonio e le fibre aramidiche.

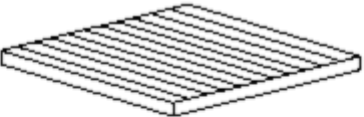
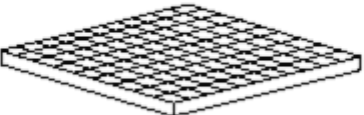
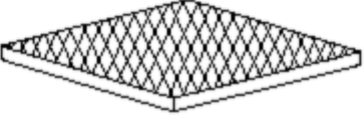

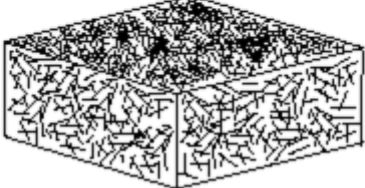
Fibre di carbonio,

- costituite da piani di grafite orientati in direzione longitudinale,
- modulo di elasticità molto più elevato rispetto a quello delle fibre di vetro,
- resistenza che può superare di oltre 10 volte quella dell'acciaio
- densità compresa tra 1,7 e 1,9 kg/dm³.
- fibre di *carbonio*, con tenore di grafite compreso tra l'80 e il 95%,
- fibre di *grafite*, con tenore di grafite superiore al 99%.
- fibre ad *alto modulo* (fino a oltre 600 GPa)
- fibre ad *alta resistenza* (fino a oltre 6 GPa)
- Il diametro dei filamenti è compreso tra 6 e 10 mm
- I fili sono classificati in base al numero totale dei filamenti espresso in migliaia, solitamente compreso tra 1k e 18k.

- Le fibre aramidiche sono fibre sintetiche ottenute per filatura da soluzione di una poliammide parzialmente aromatica e sono state prodotte per la prima volta nel 1973 da DuPont col nome commerciale di Kevlar™.
- Il modulo di elasticità e la resistenza sono intermedi rispetto a quelli delle fibre di vetro e di carbonio
 - la densità è più bassa (1,5 kg/dm³)
 - Le fibre aramidiche a basso modulo presentano un'ottima resistenza all'impatto e sono perciò utilizzate per armature e protezioni individuali in applicazioni balistiche.
 - Il principale limite nell'uso di queste fibre è legato alla modesta resistenza a compressione, pari a circa 1/4 di quella a trazione, dovuta a fenomeni di instabilità locale nella struttura della fibra con formazione di pieghe (*kinks*) che determinano lo snervamento del materiale.
 - Le fibre aramidiche possono anche degradarsi per esposizione prolungata alla luce solare, con perdita della resistenza a trazione fino a oltre il 30% in alcuni casi.

Altre fibre di rinforzo inorganiche utilizzate per la fabbricazione dei materiali compositi sono ad esempio quelle di boro, di basalto e di carburo di silicio, mentre tra le fibre di natura sintetica sono particolarmente impiegate quelle a base di alcool polivinilico (PVA), polietilene (PE) ad alto modulo e polipropilene (PP).

Negli ultimi anni si è inoltre assistito ad un impiego progressivamente crescente di fibre di rinforzo naturali, come ad esempio fibre di canapa e di lino.

Disposizione delle fibre		
Uniassiali		continue
Cross-ply		
Angle-ply		
Random in 2D		discontinue
Random in 3D		



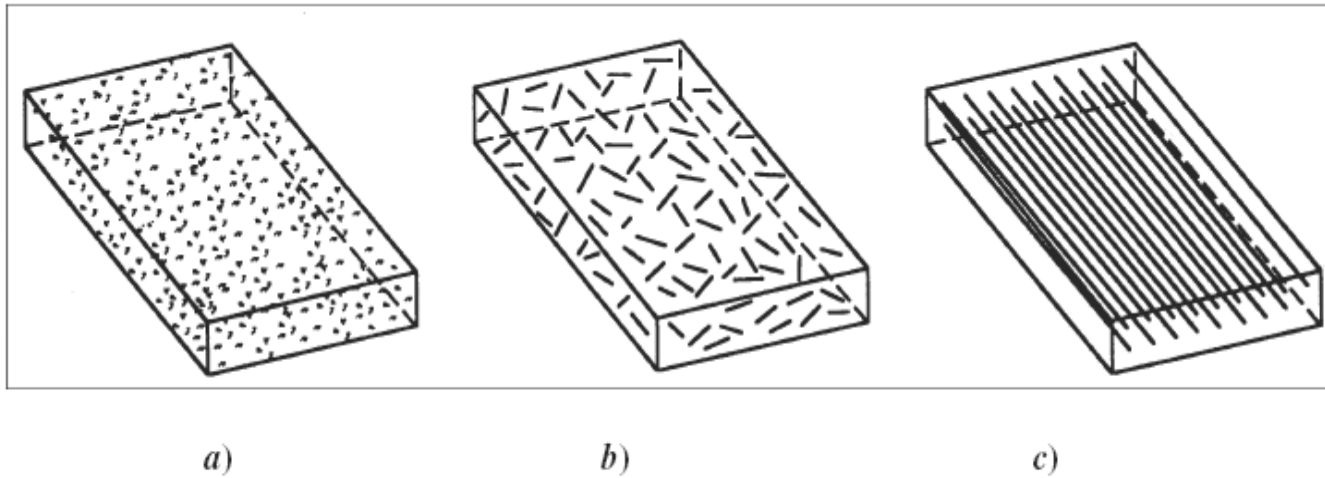


Figura 10.6 Diversi tipi di rinforzo: *a)* a particelle; *b)* a fibre corte; *c)* a fibre lunghe.

I tessuti *multiassiali* sono costituiti da strati di fibre monodirezionali sovrapposti tra loro con angoli di orientazione diversi ma non intrecciati; l'insieme degli strati è infatti stabilizzato con una cucitura leggera realizzata con filo di cotone o di poliestere.

Esistono infine anche tessuti *tridimensionali*, in cui la presenza di una seconda “trama” in direzione ortogonale al piano impartisce maggiore resistenza e proprietà specifiche (ad esempio, la capacità di rigonfiarsi quando vengono impregnati con la resina).

Rappresentano il “terzo elemento” che viene aggiunto per:

- Migliorare il processo
 - Ridurre i costi del materiale
 - Ridurre il ritiro
 - Modificare le caratteristiche meccaniche
 - Abbassare il coefficiente di attrito
- etc

Si tratta di:

- Coloranti
 - Ritardanti alla fiamma
 - Lubrificanti
 - Agenti per migliorare il “curing” (catalizzatori etc)
- etc

La produzione di un manufatto in materiale composito implica l'unione di diversi materiali tra loro e avviene di solito all'interno di uno stampo; di questi materiali, almeno uno (la matrice) deve essere fatto fluire per poter riempire gli spazi vuoti presenti all'interno della fase dispersa di rinforzo e per dare così continuità al materiale. Al termine del processo il materiale fluido deve essere consolidato per consentire al manufatto di mantenere la forma dello stampo.

Se la matrice è un polimero termoindurente il consolidamento è dato dalla reazione chimica di reticolazione, mentre nel caso di un polimero termoplastico questo avviene per raffreddamento e conseguente solidificazione a partire dallo stato fuso.

Limitando per semplicità l'esame alle sole matrici termoindurenti, una generica tecnologia di trasformazione di un materiale composito in manufatto deve poter attuare le seguenti operazioni fondamentali: impartire all'oggetto la *forma* desiderata, provvedere alla *sintesi* della matrice secondo le reazioni chimiche prima esaminate, controllare la *struttura* del materiale in modo che le fibre di rinforzo siano disposte secondo le direzioni desiderate e infine garantire la *continuità* del materiale ed una *dispersione omogenea* delle fibre nella matrice.

L'impregnazione delle fibre da parte della resina è governata dai processi che avvengono all'interfaccia, che occupa normalmente una superficie molto grande all'interno del materiale.

L'area di interfaccia tra fibre e matrice per un pannello piano di materiale composito di 1 m² di area per 2 cm di spessore risulta pari a circa 5000 m², praticamente la superficie di un campo di calcio per un pannello troppo piccolo per costituire il piano di una scrivania.

Per sviluppare questa interfaccia, necessaria per proteggere le fibre dal contatto reciproco, per ripartire uniformemente i carichi esterni tra le diverse fibre e per garantire una certa coesione del materiale in direzione trasversale, è indispensabile che la resina venga in contatto con ciascuna fibra.

I liquidi a bassa tensione superficiale tendono a “bagnare” spontaneamente solidi ad elevata tensione superficiale.

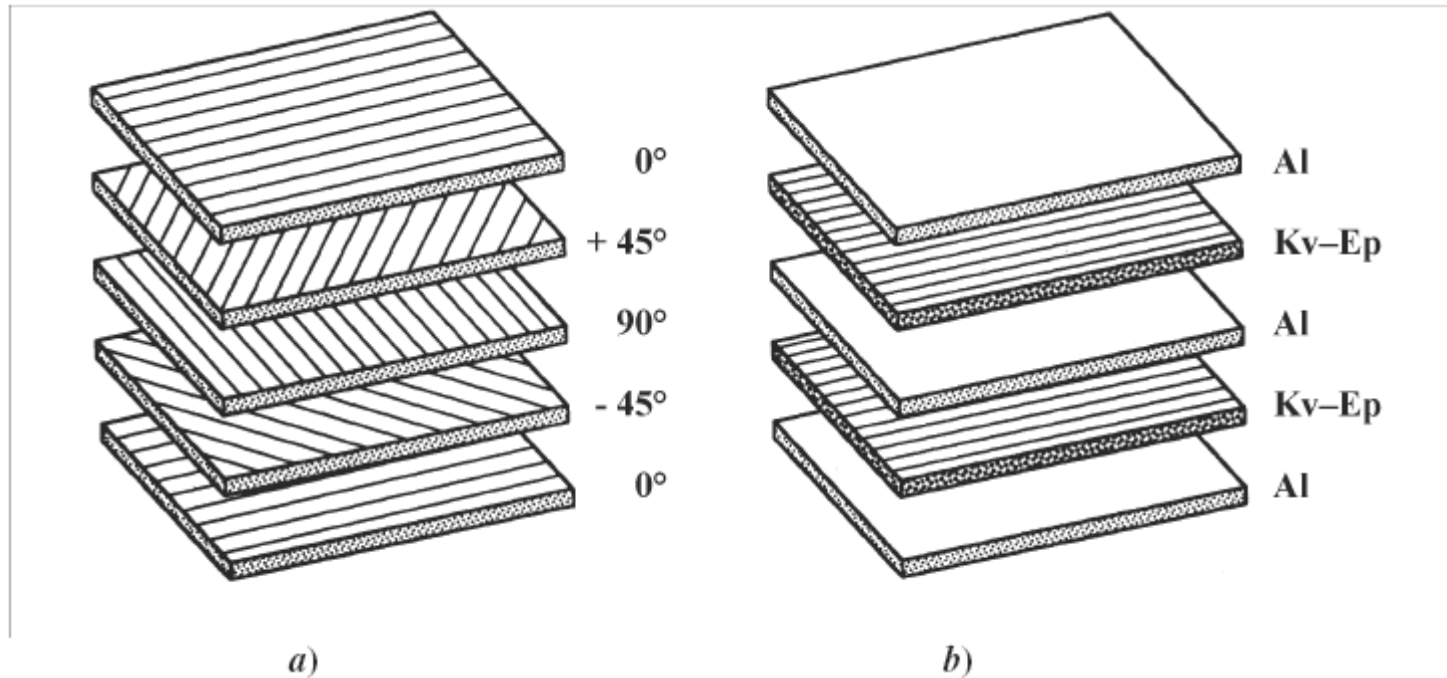
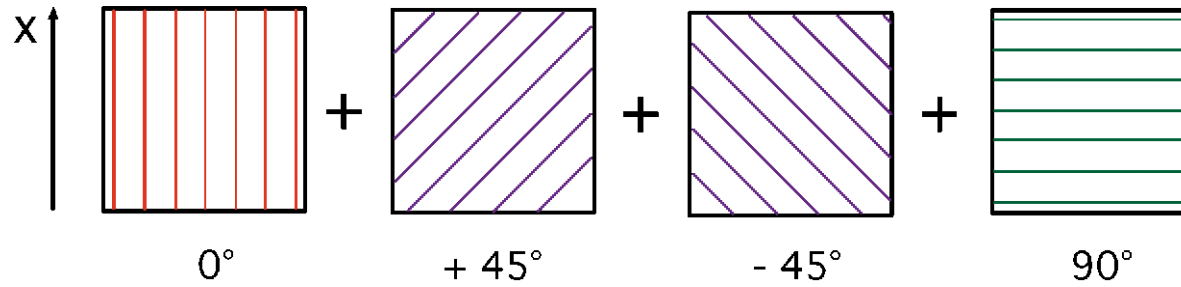
Le più comuni tecnologie di trasformazione dei materiali compositi a fibra continua sono:

- la stratificazione (detta anche *laminazione*) seguita da consolidamento in autoclave,
- l'avvolgimento,
- la pultrusione,
- lo stampaggio a trasferimento di resina (RTM)
- l'infusione di resina sotto vuoto.
- Per la produzione di componenti semi-strutturali con fibre discontinue sono anche utilizzati lo stampaggio di lastre con fibre lunghe e matrice termoplastica (LFT) e lo stampaggio di lastre a fibre lunghe orientate (HexMC®).

La produzione di compositi stratificati mediante consolidamento in **autoclave** trova impiego quasi esclusivamente nella fabbricazione di pannelli strutturali per componenti ad elevate prestazioni (compositi avanzati) per l'industria aerospaziale e nella produzione di imbarcazioni e autoveicoli sportivi e da competizione.

Il processo tecnologico prevede diverse fasi successive, di cui la prima è la deposizione su uno stampo aperto di numerosi strati di un semilavorato, detto *preimpregnato*, costituito da fibre già impregnate con la quantità necessaria di matrice. La sequenza di stratificazione viene stabilita in fase di progettazione del componente ed è definita mediante l'uso di un *codice di laminazione*.

LAMINAZIONE



Allo scopo di limitare la distorsione dei pannelli dovuta sia alla contrazione termica a seguito del ciclo di consolidamento che all'applicazione di carichi esterni (fenomeno di *accoppiamento* delle deformazioni) è frequente il ricorso a sequenze di laminazione *simmetriche* rispetto al piano di mezzeria del laminato.

In questo caso è necessario specificare soltanto la prima metà della sequenza di stratificazione.

I laminati simmetrici sono identificati dal pedice “S” applicato alla parentesi quadra.

Il procedimento di stratificazione è molto flessibile e la sequenza di laminazione può comprendere anche strati composti da materiali diversi (laminati *ibridi*) o strati interni di materiali espansi o strutture a nido d'ape racchiusi tra due “pelli” di materiale composito (laminati “*sandwich*”) allo scopo di ottimizzare il comportamento strutturale del pannello a parità di massa totale.

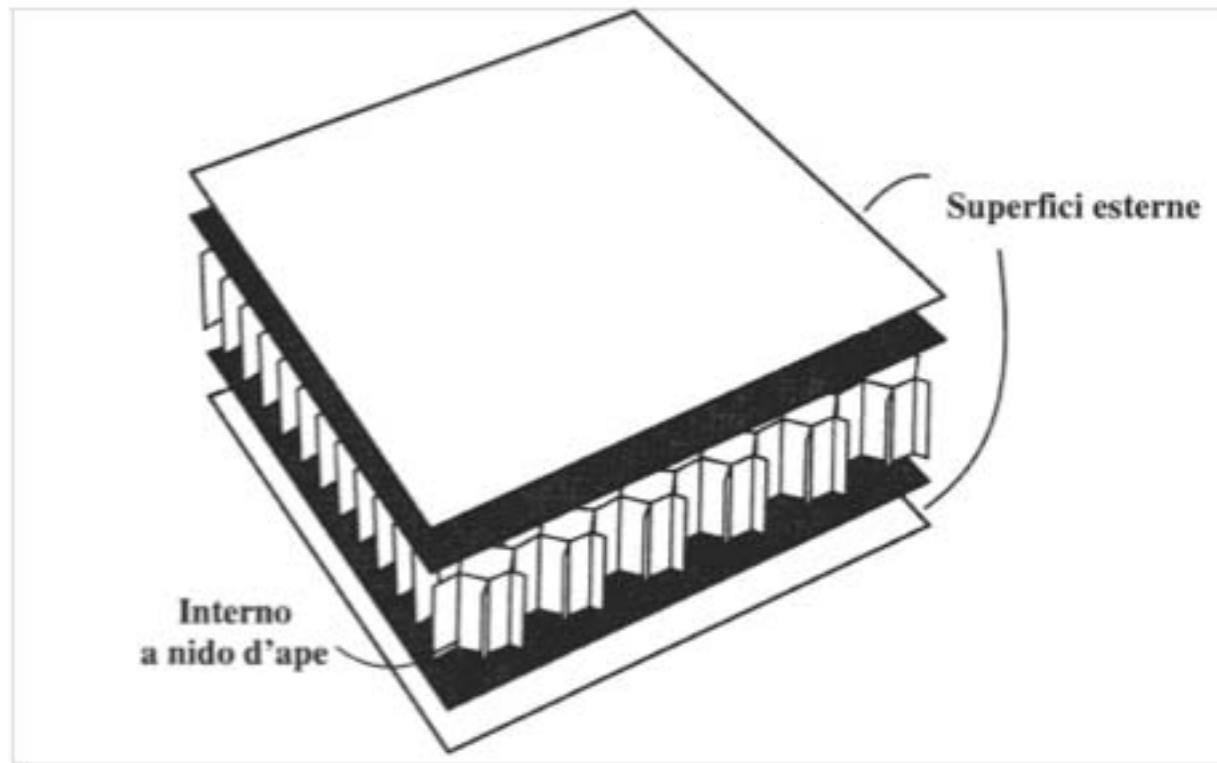


Figura 10.10 Composito tipo *sandwich*.

Prima dell'inserimento in autoclave il laminato viene racchiuso all'interno del cosiddetto *sacco da vuoto*, che è essenziale per la conduzione del successivo processo di reticolazione della matrice.

L'autoclave consiste essenzialmente in un recipiente con aria in pressione provvisto di regolazione della temperatura.

Il consolidamento in autoclave ha l'obiettivo di fare avvenire il processo di reticolazione della resina eliminando i vuoti contenuti nel laminato e facendo compenetrare tra loro le diverse lamine in modo da garantire la continuità del materiale in direzione trasversale.

La temperatura di ciclo può superare i 200°C di picco massimo e la pressione, di solito compresa tra 3 e 7 kPa, viene applicata allo scopo di espellere l'aria intrappolata durante la laminazione, ridurre le dimensioni dei vuoti e compattare il laminato espellendo la resina in eccesso fino a portare le fibre contenute nelle diverse lamine a contatto tra di loro.

AVVOLGIMENTO

La tecnologia di *avvolgimento* può essere impiegata per fabbricare tutte quelle forme che possono essere pensate come rivestite da un filo o da nastro avvolti in strati successivi.

I manufatti prodotti trovano impiego in molti settori nell'industria quali ad esempio rotor e alberi di trasmissione, pale eoliche o serbatoi e tubazioni per l'industria chimica o agroalimentare.

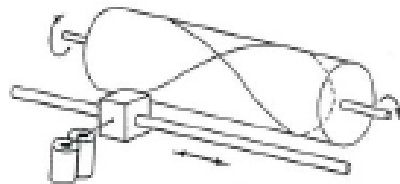
Il processo consiste in pratica nella deposizione di strati successivi di fibre impregnate di resina su un mandrino posto in rotazione attorno al proprio asse.

Le resine utilizzate per impregnare le fibre sono prevalentemente termoindurenti, di solito poliestere o epossidiche, ma esiste anche la possibilità di utilizzare nastri a matrice termoplastica.

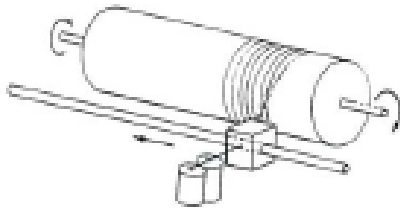
Alla fase di avvolgimento può in alcuni casi seguire il consolidamento in autoclave, ma più comunemente la polimerizzazione della resina viene fatta avvenire a temperatura e pressione ambiente.

La macchina di avvolgimento, nella sua versione più semplice, consiste in un albero rotante su cui è fissato un mandrino che determina la forma da produrre e in un carrello che guida la deposizione delle fibre traslando con movimento alternato in direzione parallela all'asse di rotazione del mandrino.

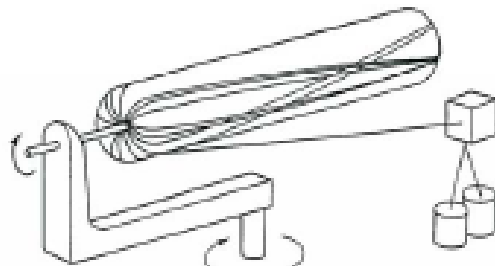
AVVOLGIMENTO



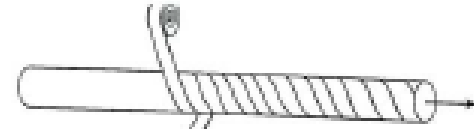
(A) Classical helical winder



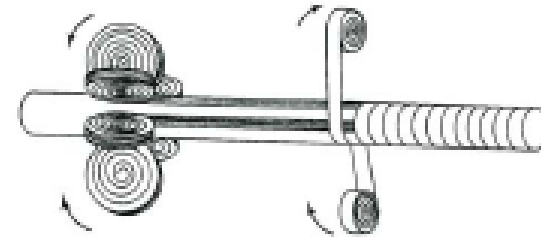
(B) Circumferential winder



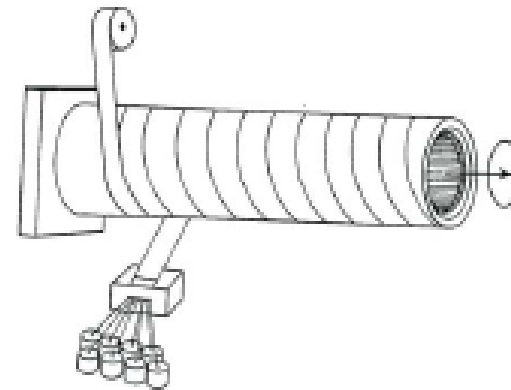
(C) Polar winder



(D) Continuous helical winder



(E) Continuous normal-wire winder



(F) Continuous coating mandrel with wire

PULTUSIONE

La tecnologia di *pultrusione* è un processo continuo con caratteristiche compatibili con la produzione di serie medio-alte a basso costo e con buona qualità.

Il nome deriva dal termine inglese “*pultrusion*”, che richiama l’analogia con i processi di estrusione dei profili metallici o plastici pur evidenziando che in questo caso il materiale viene “tirato” (*pull-trusion*) e non “spinto” (*ex-trusion*) attraverso l’apparecchiatura.

Il materiale viene trasportato attraverso stadi successivi dell’apparecchiatura, (formatura, impregnazione e consolidamento).

I profili pultrusi sono caratterizzati dall’aver una sezione costante e le fibre orientate prevalentemente in direzione della lunghezza.

L’apparecchiatura preleva i componenti (resina e matrice) per fornire (all’incirca 20 m e 30’ dopo) un componente finito, realizzando un ciclo estremamente efficiente in termini di produttività.

Le fibre vengono prelevate da numero di solito molto elevato di rocche e fatte convergere, attraverso una serie di pettini che uniformano la disposizione delle fibre, verso un bagno di resina nel quale avviene l’impregnazione.

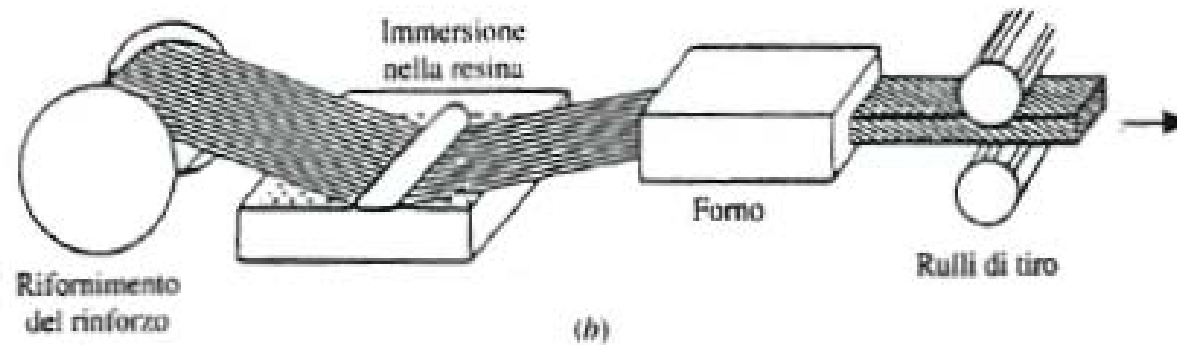
Il fascio di fibre entra quindi in una trafila riscaldata, costituito da un condotto moderatamente convergente che presenta la forma della sezione del profilo da produrre, nel quale avviene la reazione di reticolazione della resina.

La forza di trascinamento è applicata all'uscita dallo stampo, in quanto il profilo è solido e può essere afferrato da un dispositivo di traino a rulli o a tampone che lo trascina a velocità costante.

Se necessario, una sega circolare può tagliare infine il prodotto a misura in corrispondenza della parte terminale della linea di produzione.

Oltre alle fibre monodirezionali che costituiscono la maggior parte del rinforzo, prima dell'ingresso nello stampo è possibile aggiungere al profilo in formazione alcuni strati esterni di mat o di tessuto, allo scopo di rinforzare il materiale anche in direzioni diverse da quella di traino.

PULTRUSIONE



STAMPAGGIO A TRASFERIMENTO DI RESINA E INFUSIONE SOTTO VUOTO

Lo *stampaggio a trasferimento di resina* (RTM) e l'*infusione sotto vuoto* sono due processi che presentano forti analogie, in quanto in entrambi i casi il materiale di rinforzo (di solito in forma di tessuto) viene depositato all'interno di uno stampo che in seguito viene sigillato.

In una fase successiva si inietta una resina che con un flusso di “percolazione” attraverso gli spazi lasciati liberi dal rinforzo impregna le fibre e poi reticola, di solito a temperatura ambiente.

Queste tecnologie permettono un eccellente controllo sulla distribuzione delle fibre con tempi di ciclo molto contenuti se confrontati con quelli richiesti dallo stampaggio in autoclave o dall'avvolgimento.

Gli stampi sono relativamente economici in quanto il processo dà luogo a basse pressioni di spinta ed è possibile produrre di parti di forma anche complessa con struttura multistrato ibrida, a sandwich o con inserti metallici.

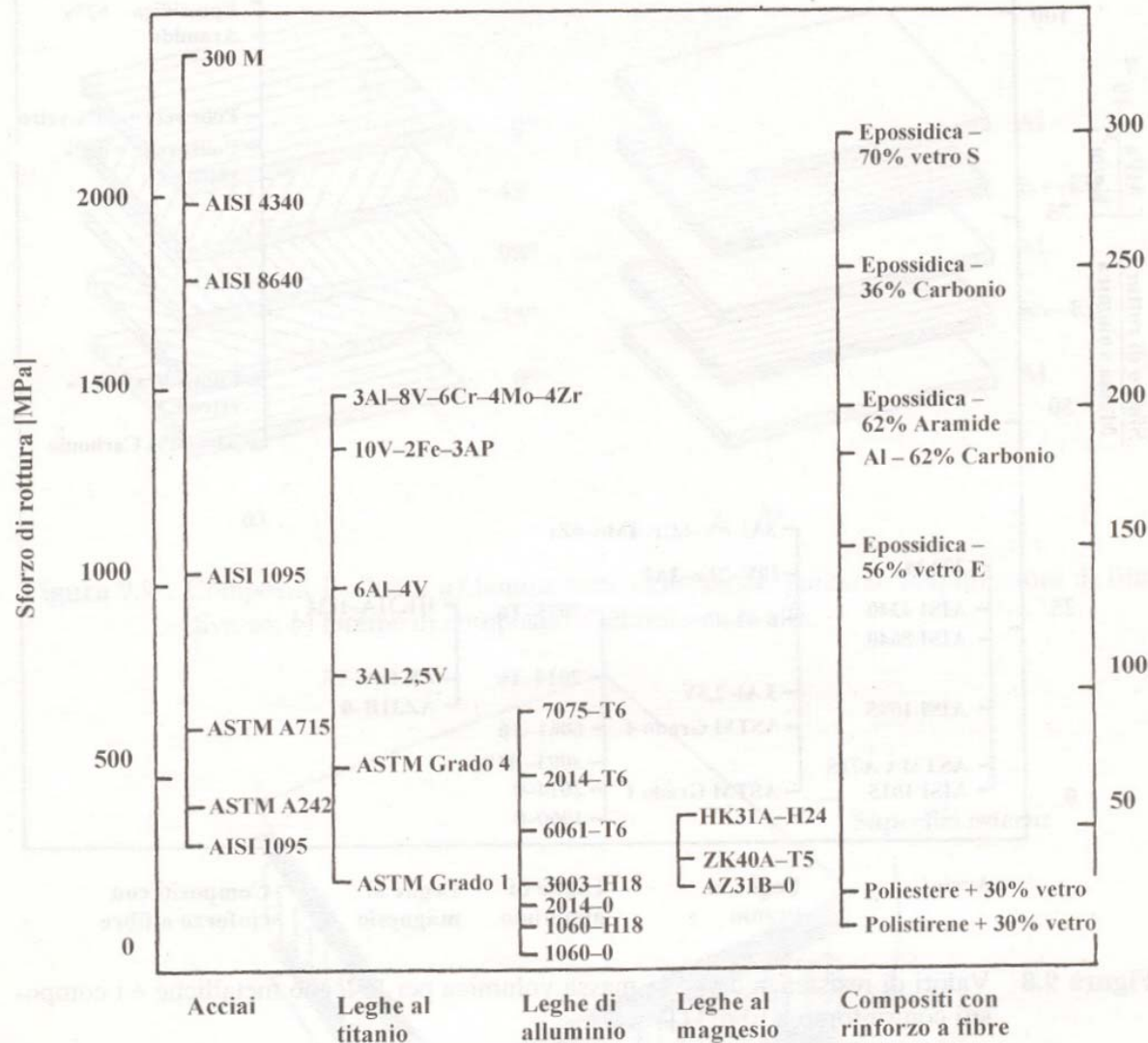
Nel caso dello stampaggio RTM, inoltre, si ottiene una buona finitura superficiale su entrambi i lati.

- ✓ Limitandoci al caso dei materiali compositi di maggiore uso per applicazioni strutturali, e pertanto ai materiali compositi a matrice polimerica rinforzati da fibre, è interessante comparare le proprietà meccaniche di alcune fibre e matrici polimeriche

	MATERIALE	Modulo di elasticità E [MPa]	Sollecitazione di rottura σ_r [MPa]	Massa specifica ρ [g/cm ³]
rinforzo	Fibre di Vetro	70.000	2000-3500	2,5
	Fibre di Carbonio	260.000	2000-3000	1,9
	fibre di Kevlar	120.000	2200	1,5
matrici	epossidiche	2500-4100	50-130	1,2-1,3
	poliestere insature	2100-3500	35-105	1,1-1,4
compositi	Vetro-Resina	45.000	1500	1,8
	Carbo-Resina	200.000	1400	1,6
	Kevlar-Resina	8500	120	1,5

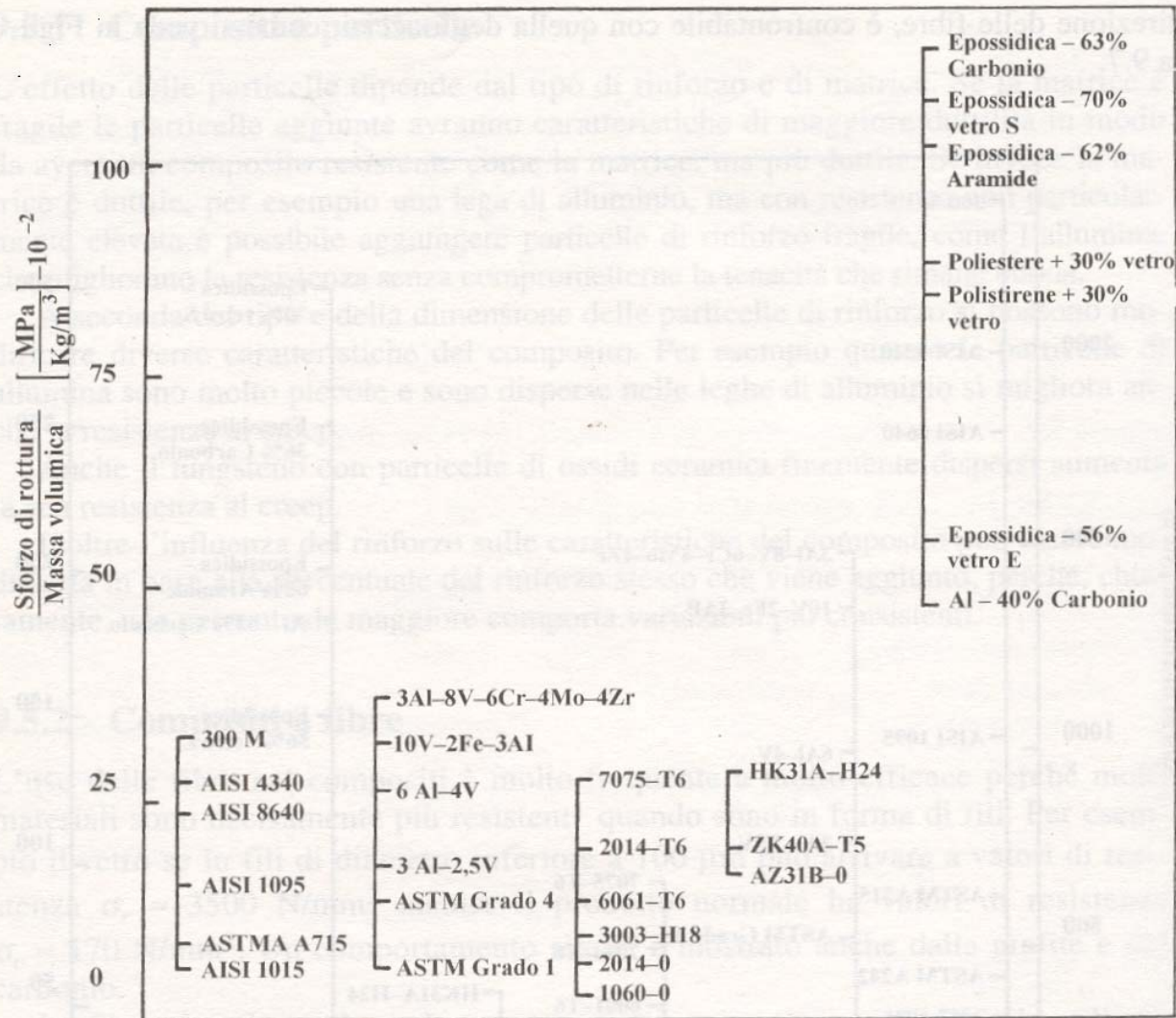


compositi



Range delle sollecitazioni di rottura per materiali di uso ingegneristico





Range delle sollecitazioni di rottura per materiali di uso ingegneristico rispetto alla massa volumica



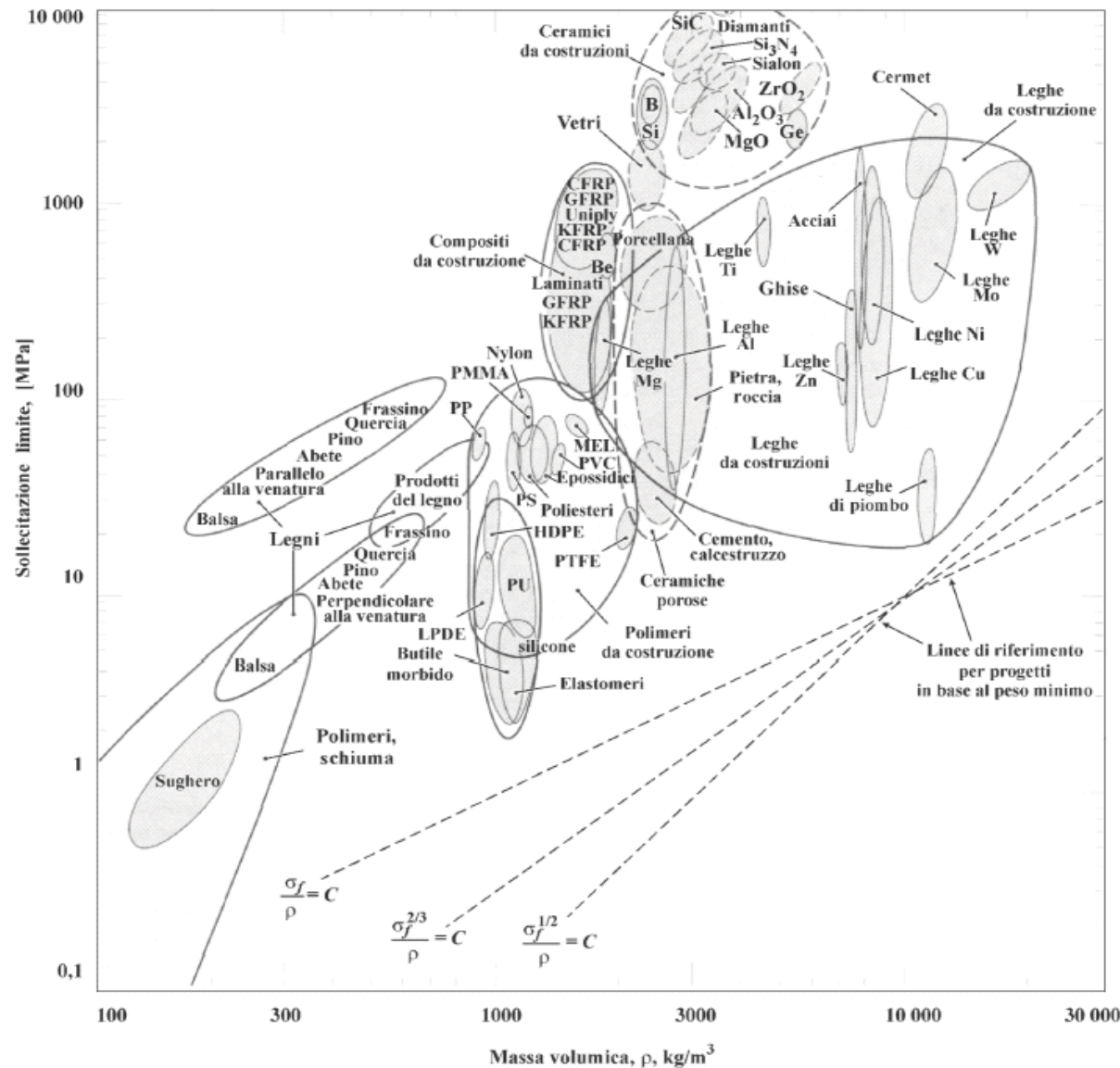


Figura 10.38 Mappa dei valori della sollecitazione limite (σ_{sn} per i metalli e i polimeri, σ_{r-} per i ceramici, σ_{r+} per i compositi) rispetto alla massa volumica. Sono indicate delle linee di riferimento per la progettazione in base al peso minimo [3].

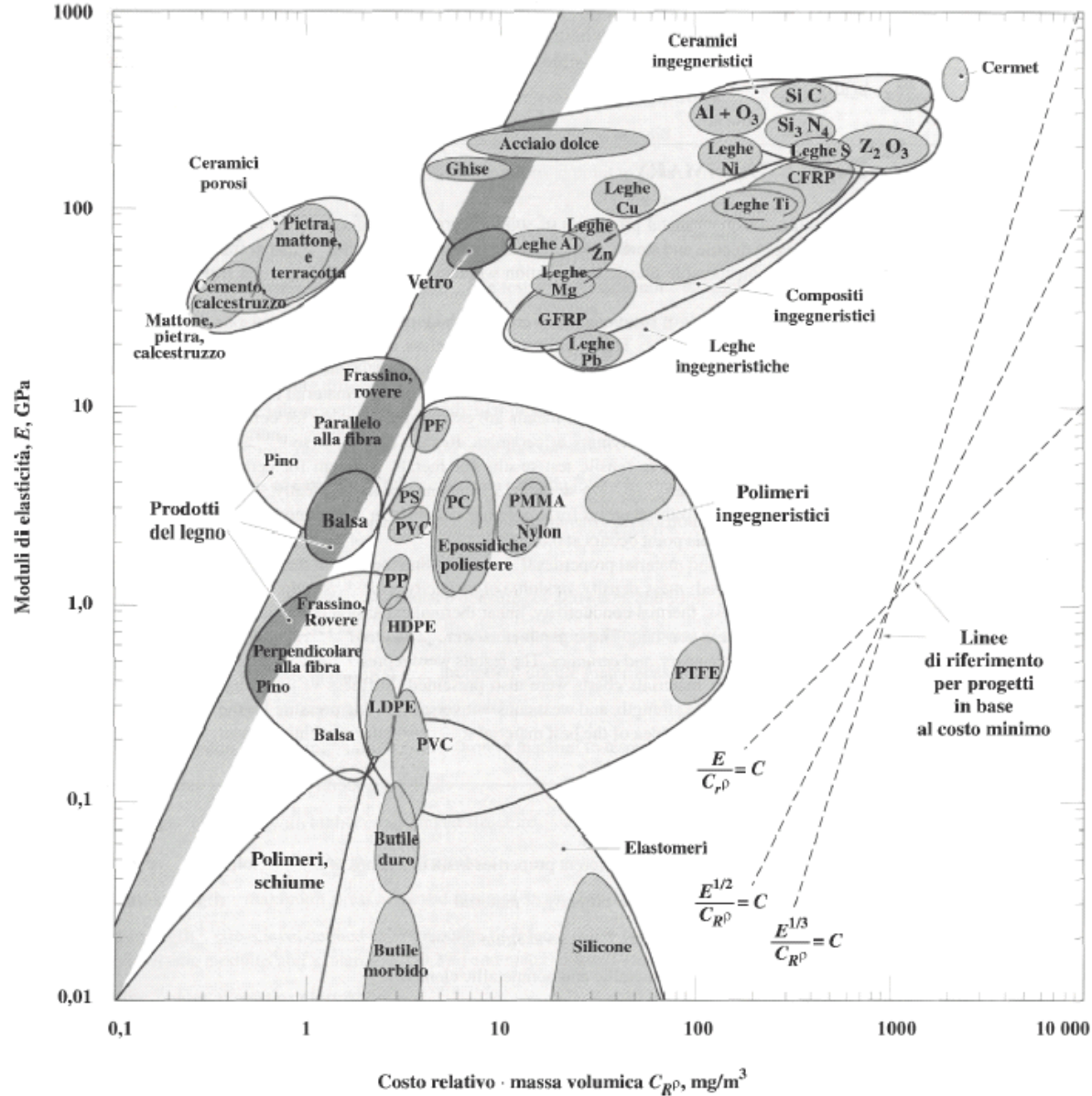


Figura 10.39 Mappa dei valori del modulo di elasticità rispetto alla costo relativo. Sono indicate delle linee di riferimento per la progettazione in base al costo minimo [3].

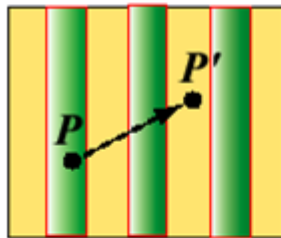
CARATTERIZZAZIONE MECCANICA⁴⁸

- I materiali compositi sono sempre più spesso utilizzati per le loro caratteristiche in applicazioni strutturali
- Per queste applicazioni è necessario che i materiali abbiano caratteristiche di resistenza e di affidabilità
- Diventa quindi indispensabile la caratterizzazione meccanica anche se risulta complessa a causa della eterogeneità della struttura



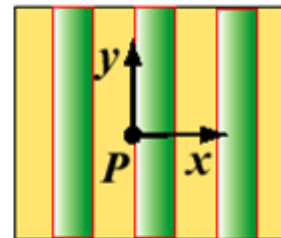
I materiali compositi rispetto ai materiali tradizionali non sono né omogenei né isotropi

eterogeneo



la composizione e le proprietà dipendono dalla **POSIZIONE**

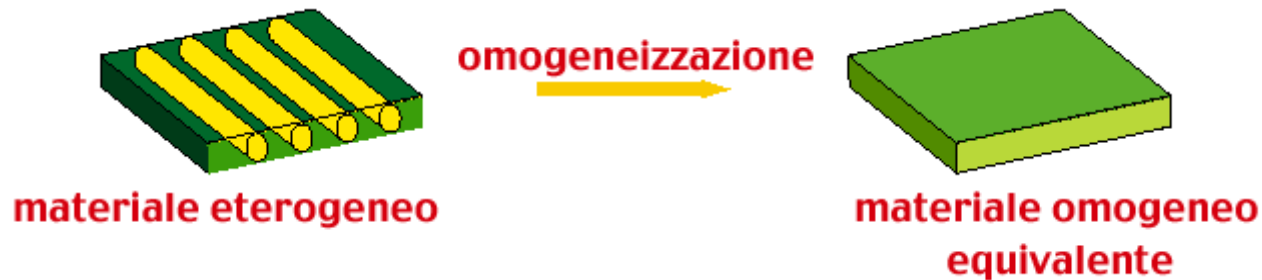
anisotropo



le proprietà dipendono dalla **DIREZIONE** di sollecitazione



- Si trascura l'eterogeneità (che ha dimensioni \ll applicazione)
- Si considera un volume equivalente omogeneo

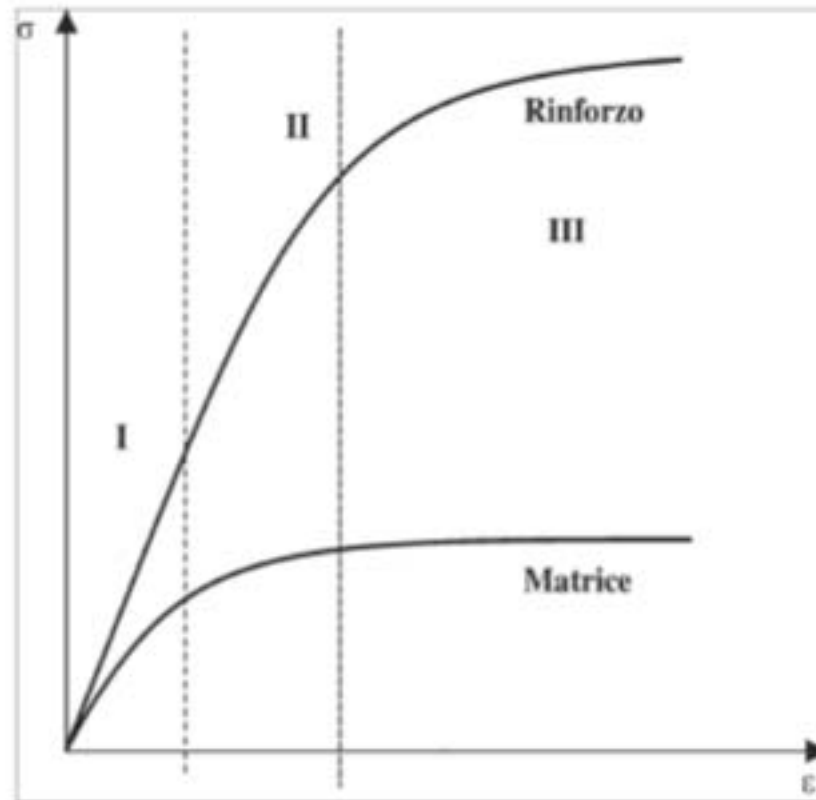


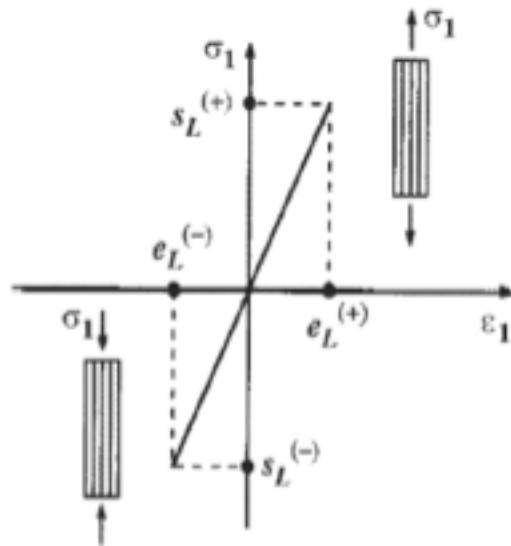
La trattazione meccanica è più semplice

Prove di caratterizzazione meccanica nelle diverse direzioni

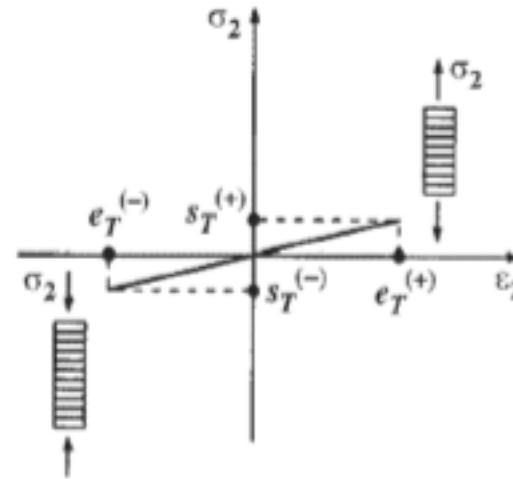


Caratterizzazione meccanica

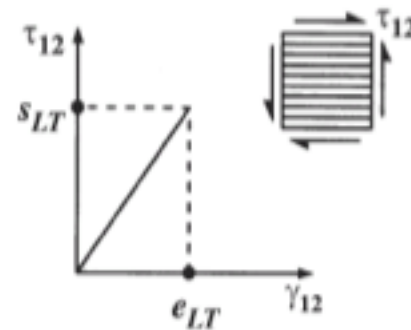




a)



b)



c)

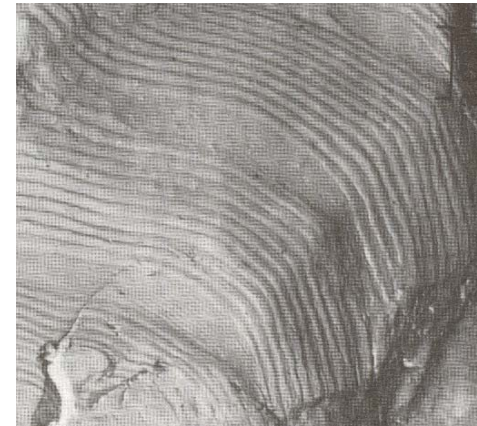
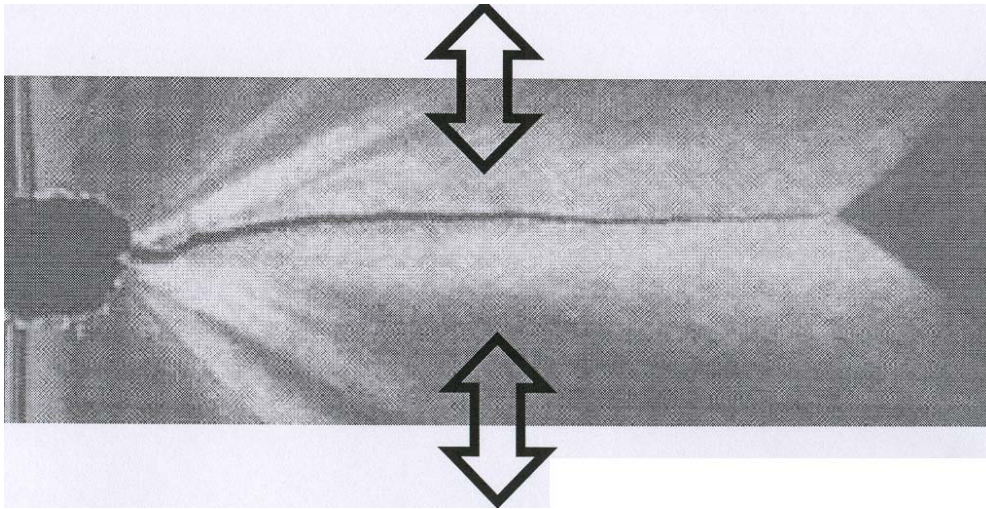
CARATERIZZAZIONE MECCANICA

- In particolare queste strutture sono soggette a carichi variabili nel tempo che provocano danneggiamento e degrado dei materiali
- E' indispensabile avere uno strumento che permetta di valutare la vita della struttura per prevedere la manutenzione e/o la sostituzione di componenti
- A questo scopo è necessario studiare il comportamento a fatica dei materiali compositi a matrice polimerica



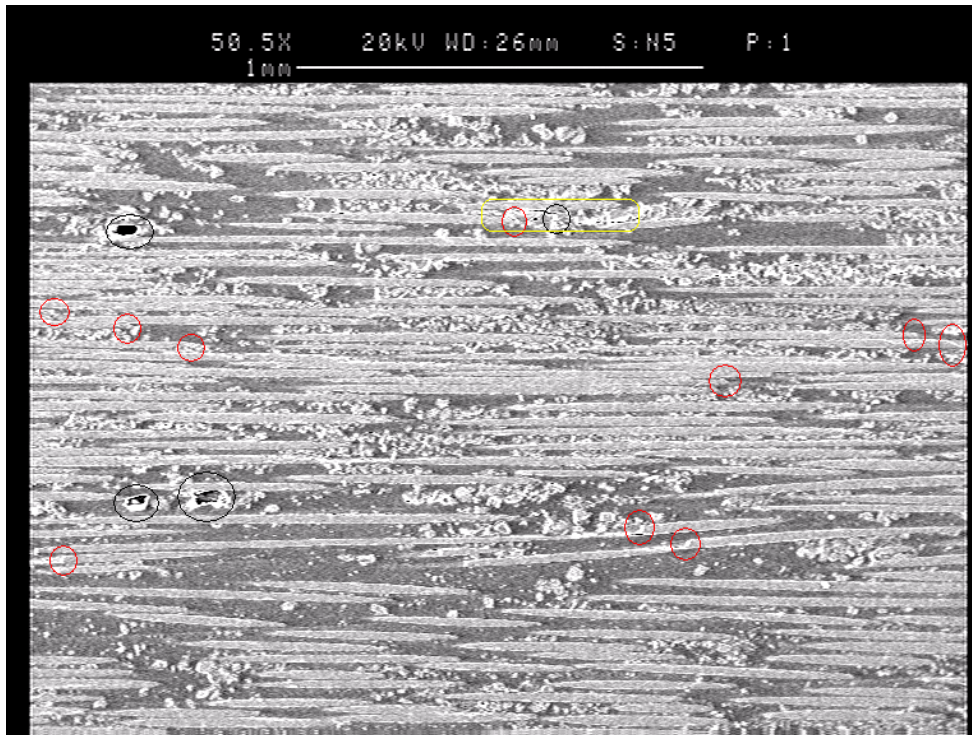
COMPORAMENTO A FATICA

- Lo studio è complesso perché i fattori che influenzano il comportamento a fatica dei materiali compositi sono svariati.
- Nei materiali omogenei ed isotropi il danneggiamento è dato dalla nucleazione di un solo difetto che poi propaga in piani e secondo direzioni stabilite



COMPORAMENTO A FATICA

- I materiali compositi sollecitati a fatica presentano diverse modalità di danneggiamento: cricche nella matrice, rottura della fibre, cricche nell'interfaccia matrice-fibre.



PROBLEMATICHE

Nel caso di componenti strutturali è necessario conoscere il comportamento del materiale a fatica in stato di sforzo multi-assiale.

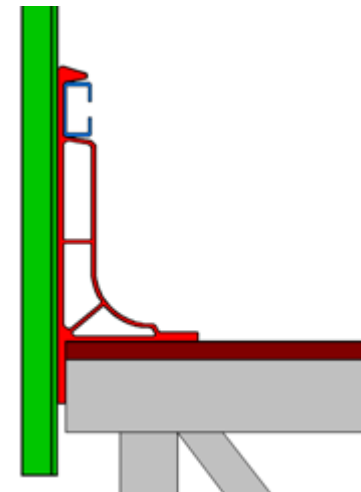
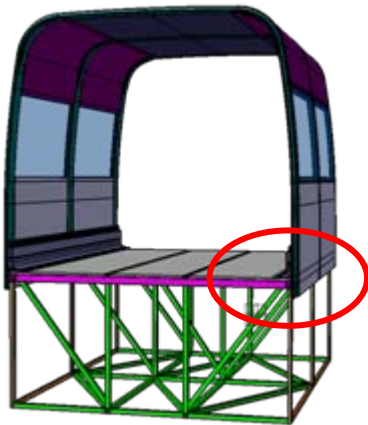
In letteratura ci sono due approcci:

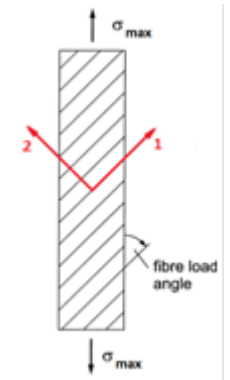
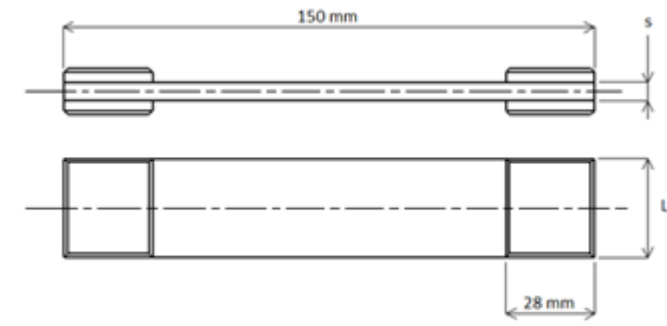
uno basato sul comportamento “micro” (cricche nella matrice, nelle fibre, debonding...)

L'altro basato su parametri “macro” (resistenza residua, modulo elastico..)

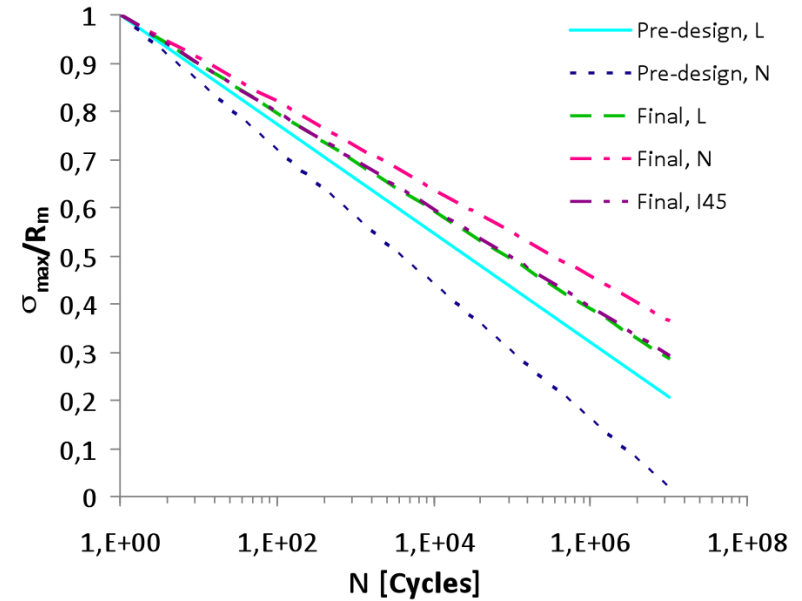
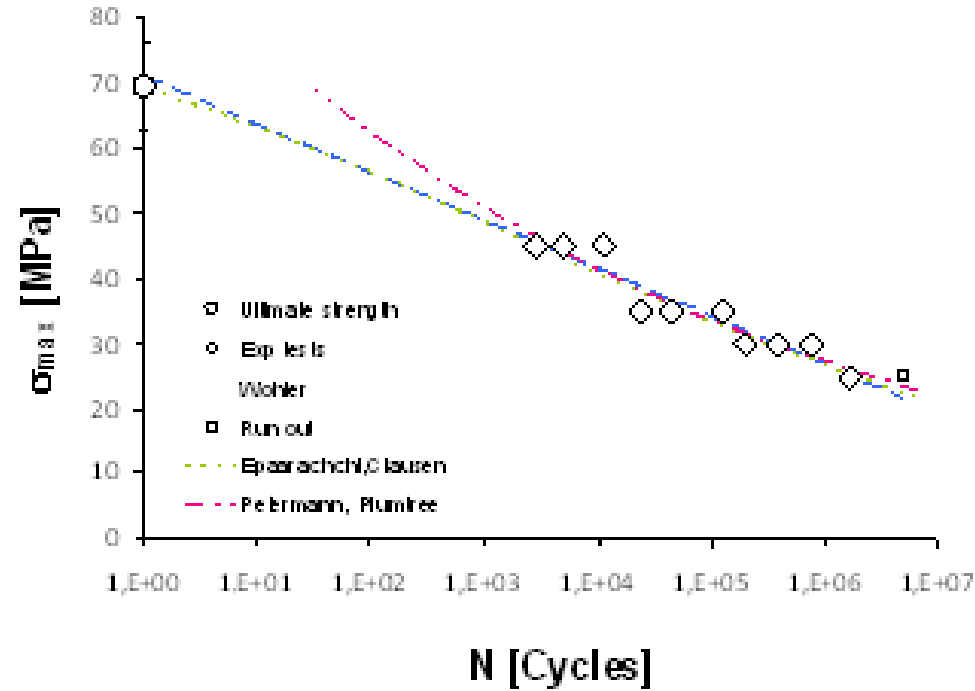
Ci sono due tipi di fatica multi-assiale: una dovuta ai carichi esterni e una allo stato di sforzo locale: anche se il carico è mono-assiale lo stato di sforzo locale è multi-assiale, a causa dell'orientamento delle fibre.

LITEBUS





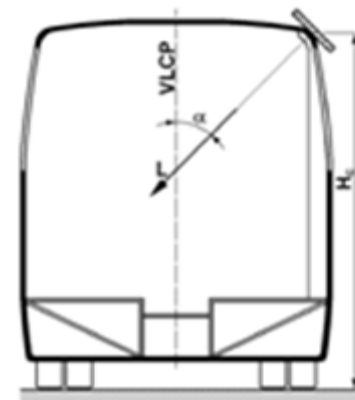
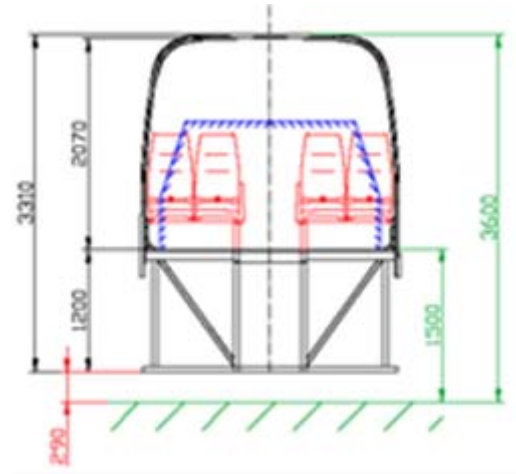
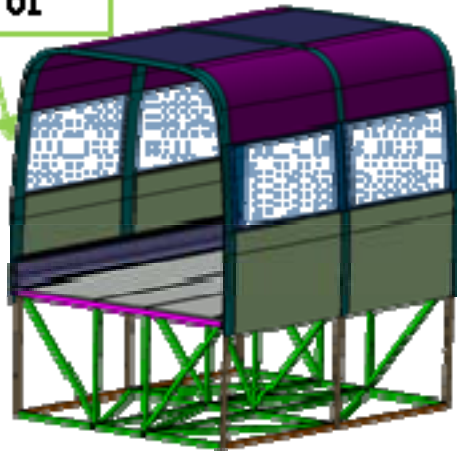
COMPORTAMENTO A FATICA DEI MATERIALI COMPOSITI

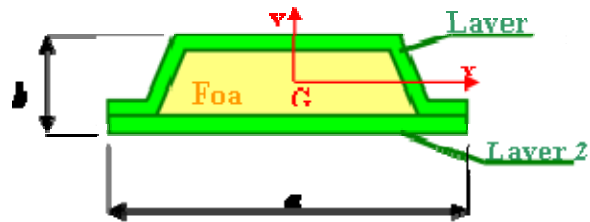


$$\sigma_{max}/R_m = \alpha_0 + \beta_0 \cdot \log N_f$$

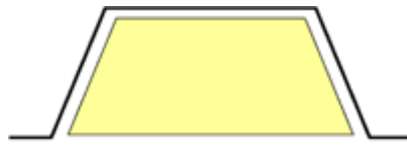
LITEBUS

Pillar
object of

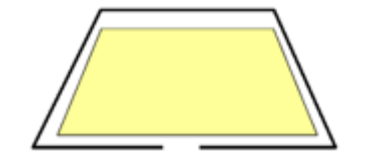




Configurazione base dei pilastri

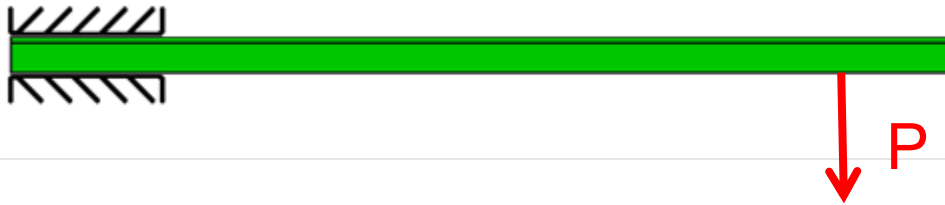


Modifiche al rinforzo come materiale e disposizione

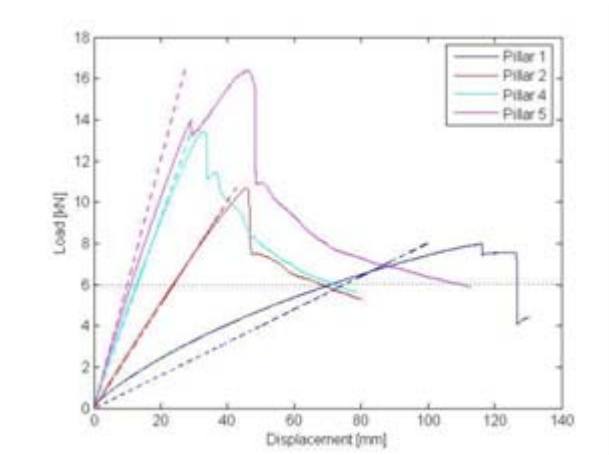
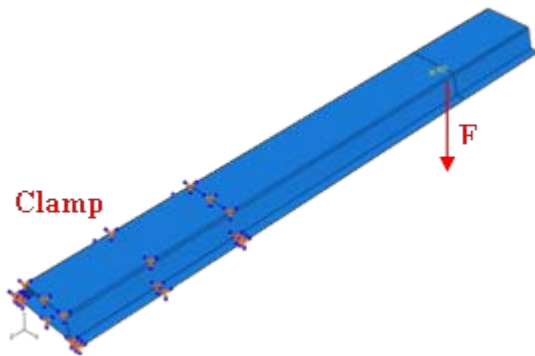
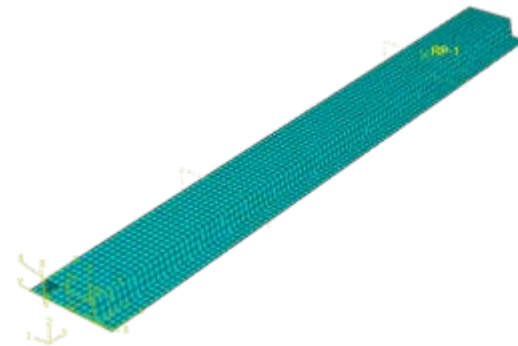
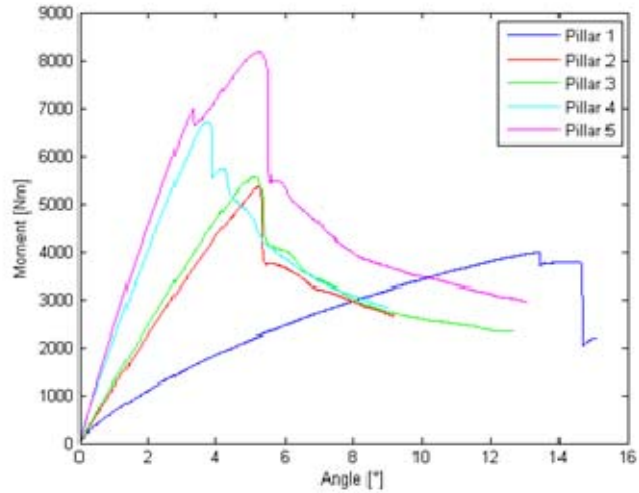


Modifiche alla geometria

ELEMENTI "SU MISURA"



ELEMENTI "SU MISURA"



DANNEGGIAMENTO

- Vi sono molti difetti di tipo diverso.
- E' difficile anche in casi semplici di sollecitazione prevedere l'evoluzione dei difetti

- Si definisce il danneggiamento:

$$D = \frac{A_D}{A}$$

- Dove A_D è la superficie danneggiata e A è la superficie non danneggiata

$$0 \leq D \leq 1$$

Non c'è
danneggiamento

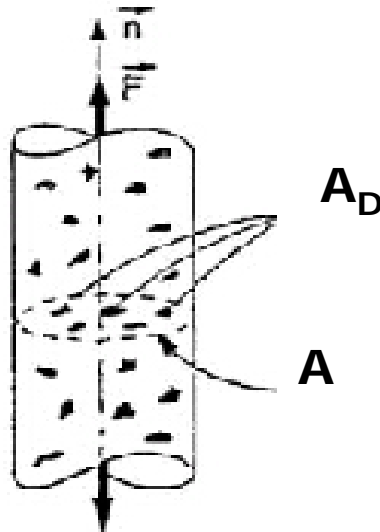
rottura



DANNEGGIAMENTO

Si definisce uno sforzo effettivo:

$$\sigma_{eff} = \frac{F}{(A - A_D)} = \frac{F}{A \left(1 - \frac{A_D}{A}\right)} = \frac{\sigma}{(1 - D)}$$



DANNEGGIAMENTO

- principio di equivalenza (Lemaitre, 1971) “l'equazione costitutiva di un materiale danneggiato è uguale a quella di un materiale non danneggiato se lo sforzo nominale è sostituito da quello effettivo”

Se si considera un comportamento lineare:

$$\varepsilon_{eff} = \frac{\sigma_{eff}}{E} = \frac{\sigma}{E(1-D)} = \frac{\sigma}{E_R}$$

Dove:

E è il modulo di elasticità longitudinale del materiale

E_R è il modulo reale del materiale danneggiato

$$E_R = E(1-D)$$

D è una quantità
scalare
sempre positiva

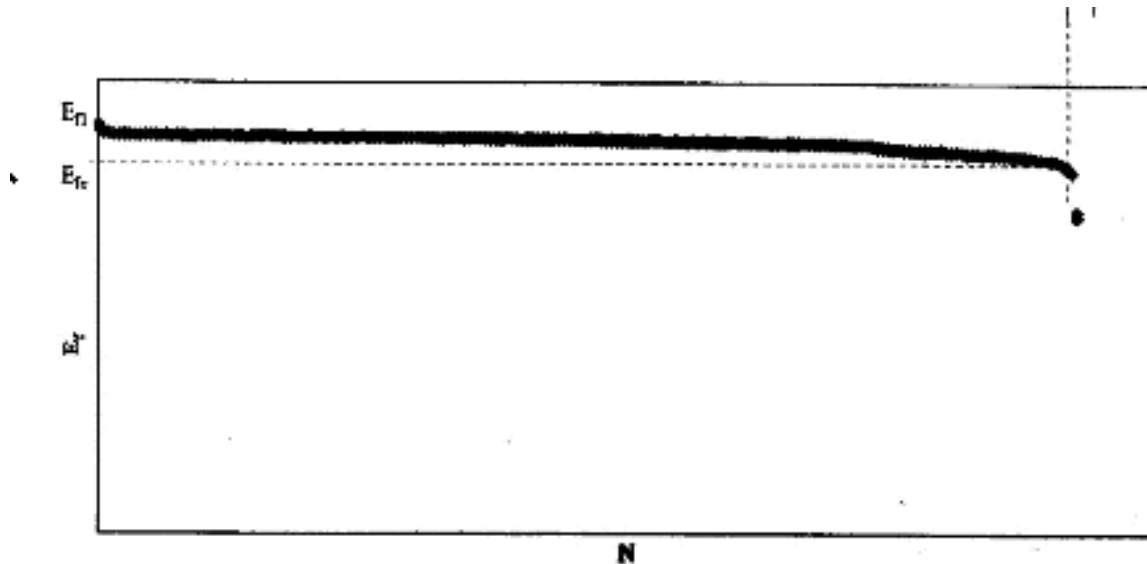


E_r è inferiore a E
La differenza è maggiore al
crescere del danno



DANNEGGIAMENTO

Si può utilizzare il decadimento del modulo elastico come parametro di danneggiamento dei materiali compositi



Andamento del modulo elastico durante la vita a fatica di un provino di materiale composito a matrice polimerica

Durante la prova tramite un estensometro si misura la deformazione del provino

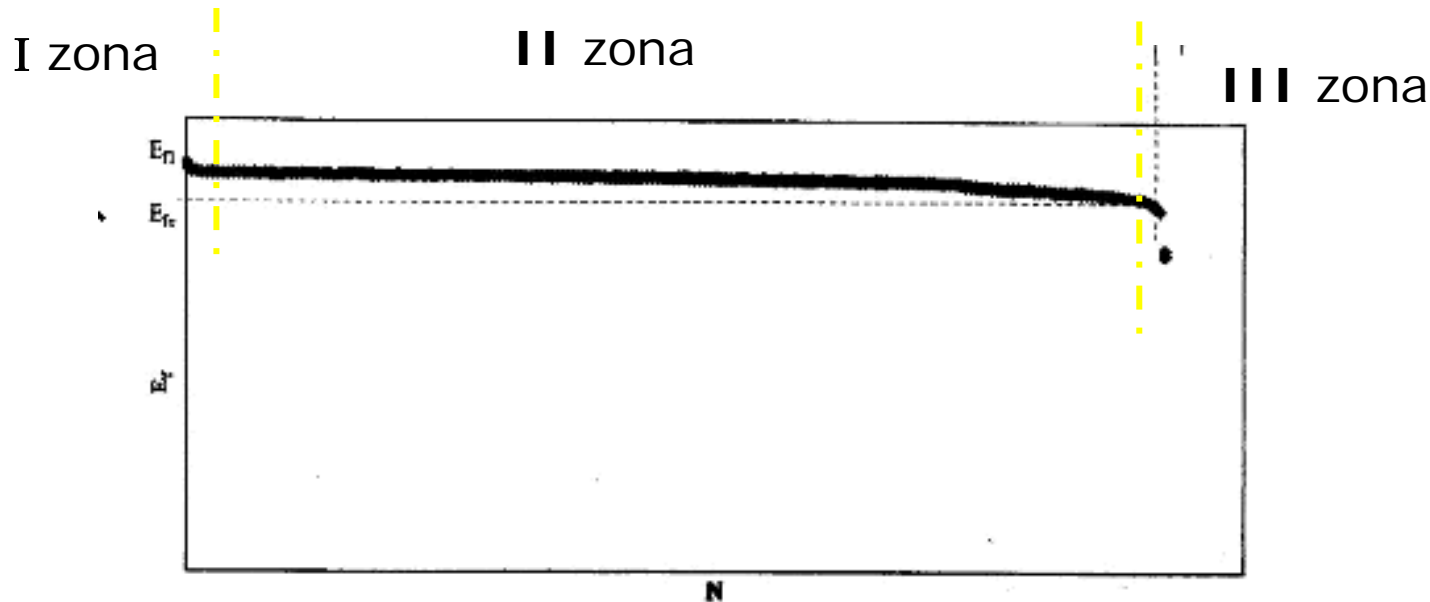


$$\frac{\sigma}{\varepsilon} = E$$



DANNEGGIAMENTO

Si distinguono tre zone:



I zona: più breve, non sempre è presente formazione di nuovi difetti

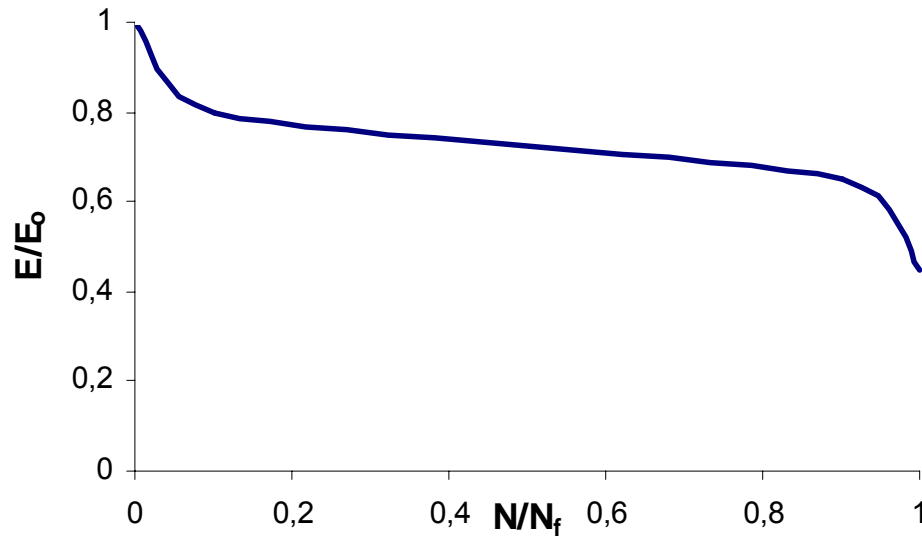
II zona: durata maggiore, andamento quasi lineare di E_R , propagazione di difetti già esistenti

III zona: netto decadimento del modulo elastico e rottura del composito.



DANNEGGIAMENTO

Per avere informazioni più generali si considera un valore non dimensionale: E/E_0 dove E_0 è il valore del modulo misurato durante il primo ciclo di carico



L'entità della diminuzione di E dipende dal materiale



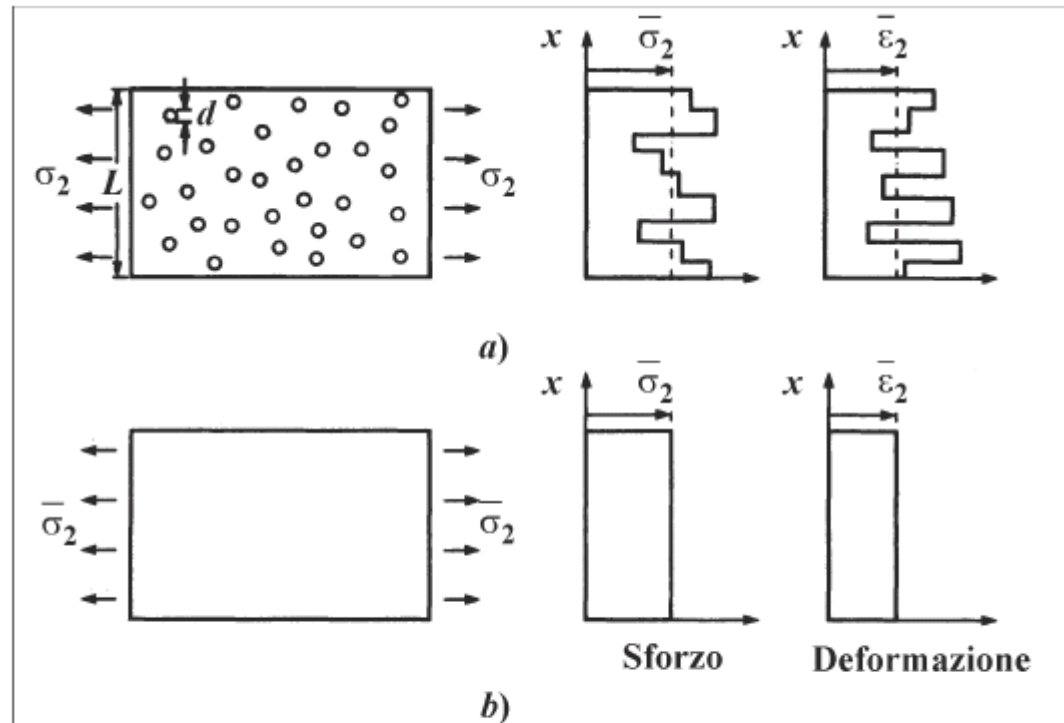
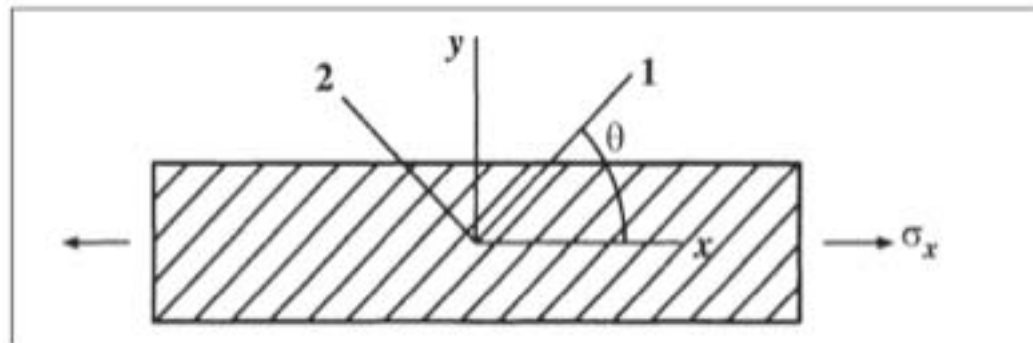
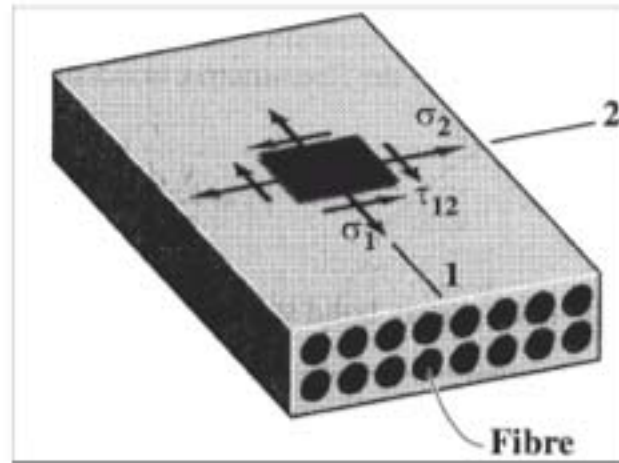


Figura 10.12 Elemento di composito a comportamento omogeneo: *a)* andamento effettivo degli sforzi e delle deformazioni; *b)* valori medi degli sforzi e delle deformazioni.



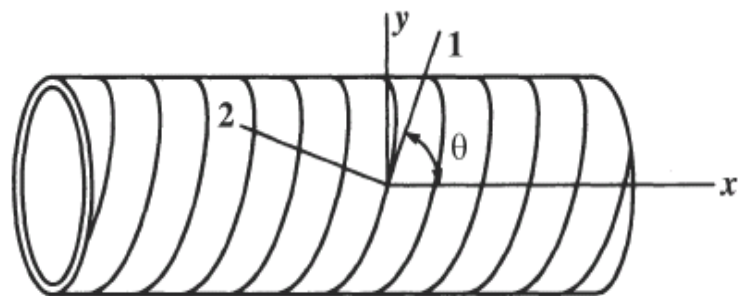


Figura 10.15 Recipiente avvolto dal filo di vetro.

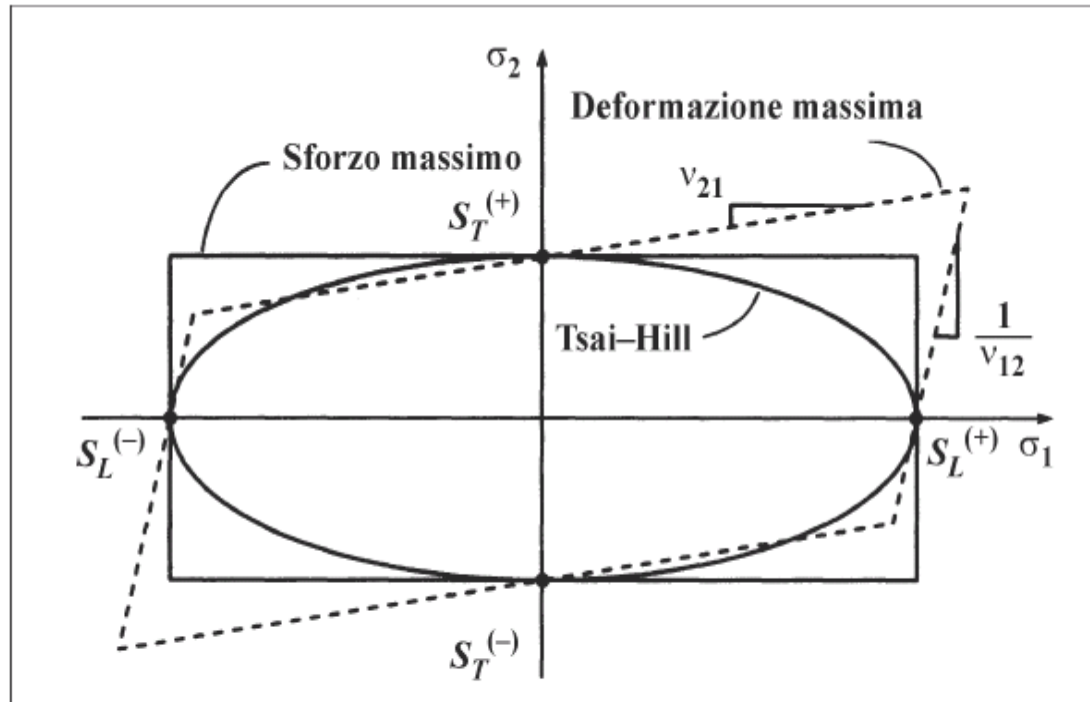


Figura 10.19 Rappresentazione grafica del criterio del massimo sforzo, della massima deformazione e di Tsai-Hill nel piano σ_1 - σ_2 .

