

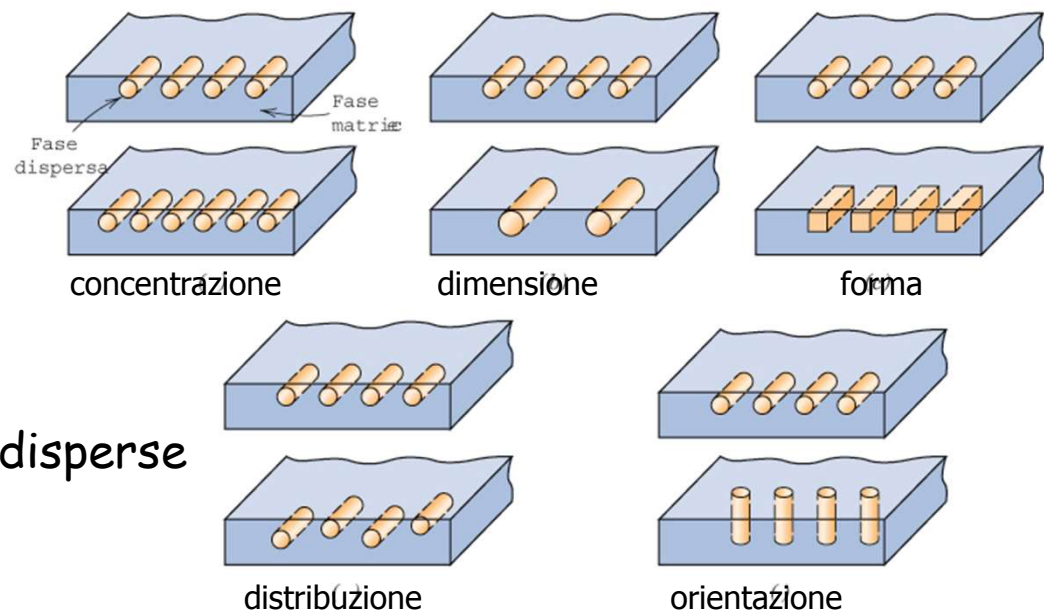
Materiali compositi

Materiali compositi

Un composito è un materiale multifasico creato artificialmente, che presenta un conveniente equilibrio delle fasi costituenti, in modo da realizzare proprietà migliori di quelle dei singoli costituenti

Le fasi costituenti sono chimicamente diverse e separate da un'interfaccia ben distinta

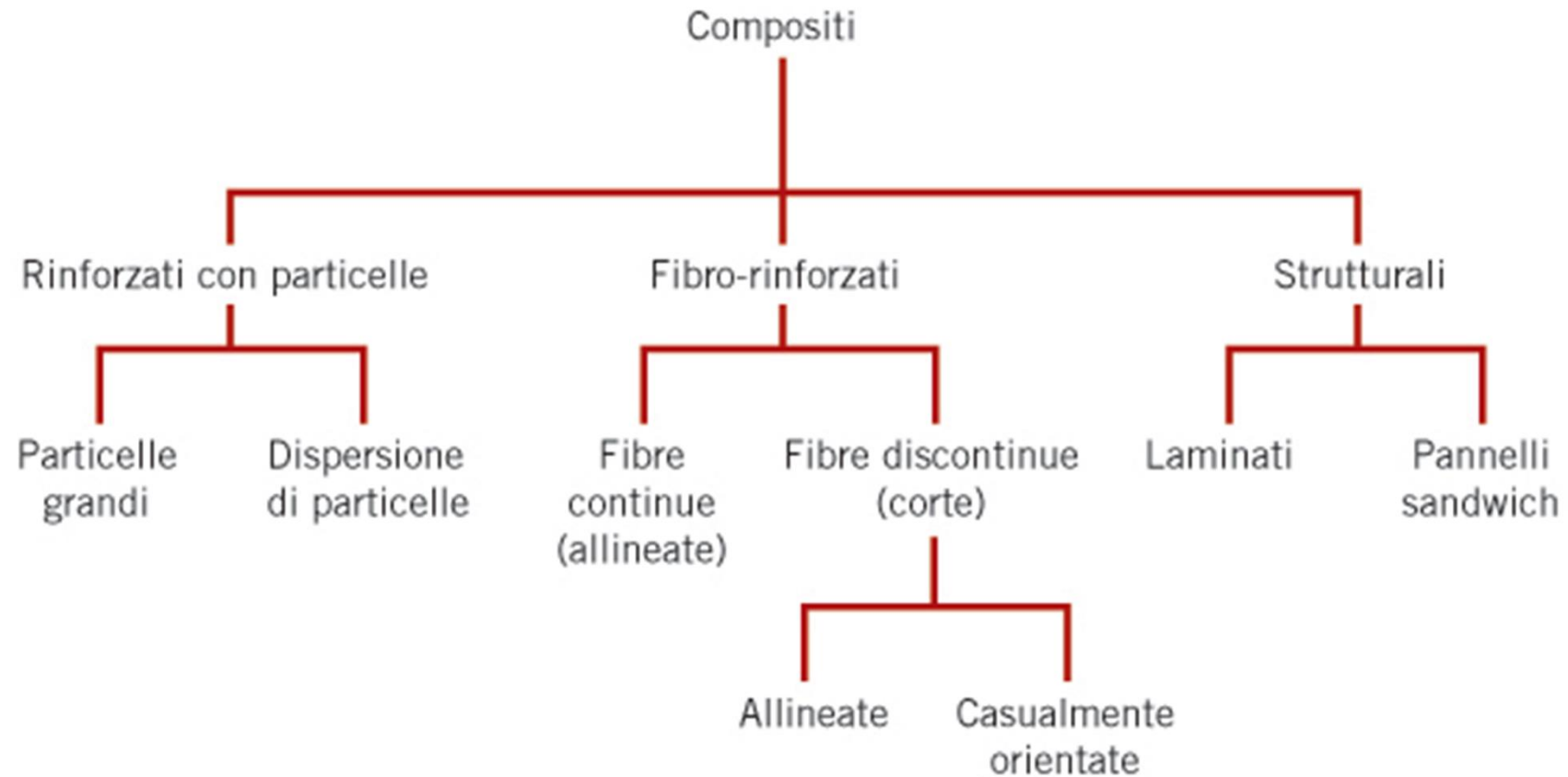
Molti compositi sono formati da sole due fasi: una detta *matrice* fase continua che avvolge l'altra fase detta *fase dispersa*



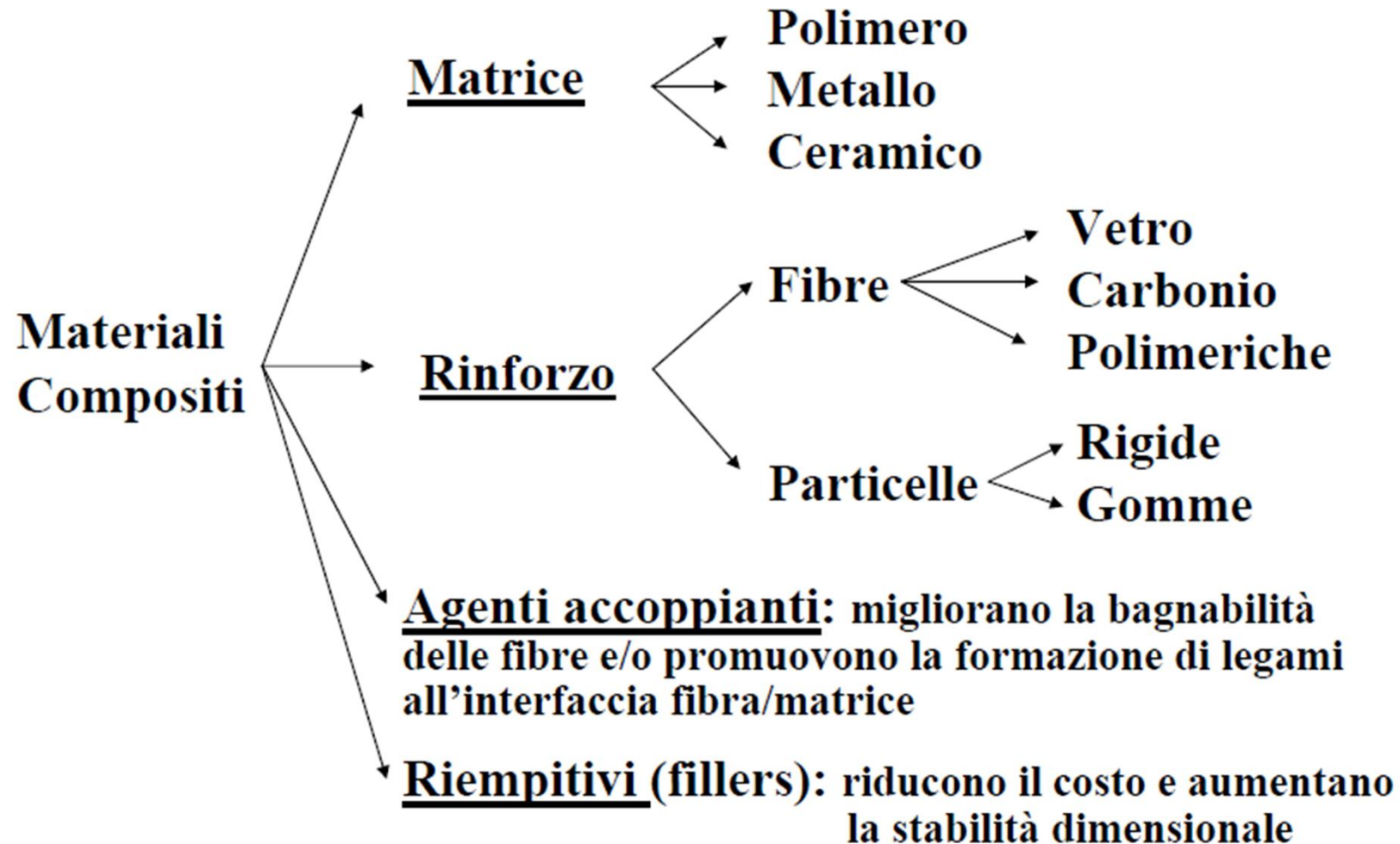
Le proprietà finali dipendono da:

- proprietà delle fasi costituenti
- quantità e geometria delle fasi disperse

Classificazione schematica dei materiali compositi



Elementi costitutivi di un composito



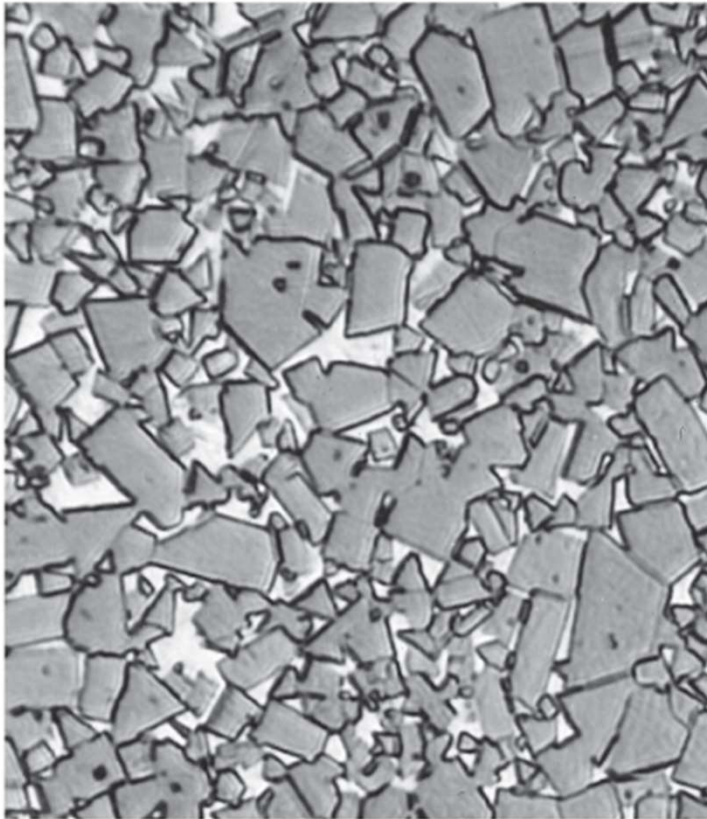
Compositi rinforzati con particelle

- 1) **Compositi rinforzati con particelle di grandi dimensioni:** le particelle limitano i movimenti della matrice che trasmette loro una parte dello sforzo a cui è soggetta.

Il grado di rinforzo dipende dalla forza del legame presente all'interfaccia tra matrice e rinforzo

Lo scopo è anche quello di migliorare le caratteristiche elettriche, termiche, magnetiche, di resistenza all'abrasione, all'usura, all'urto.

Cermet



100X

Carburo cementato: WC in Co

$V_p=90\%$

Compositi rinforzati con particelle

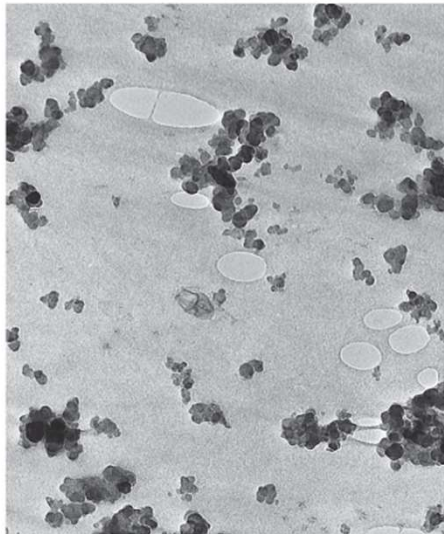
2) Compositi rinforzati con particelle di piccole dimensioni (10-100 nm):
l'interazione rinforzo/matrice avviene a livello atomico o molecolare;
le particelle disperse sono in grado di limitare il movimento delle
dislocazioni

< deformabilità plastica

> σ_y e σ_R

> durezza

L'effetto si mantiene per molto tempo, anche ad alte T



Particelle di nerofumo in gomma vulcanizzata

Diametro C= 20-50 nm

80000X

Compositi rinforzati con fibre

I compositi fibro-rinforzati rappresentano materiali con elevate resistenze e/o rigidzze insieme ad un basso peso (RESISTENZA SPECIFICA e MODULO SPECIFICO)

La matrice conferisce la forma al materiale, unisce le fibre e trasmette a loro il carico

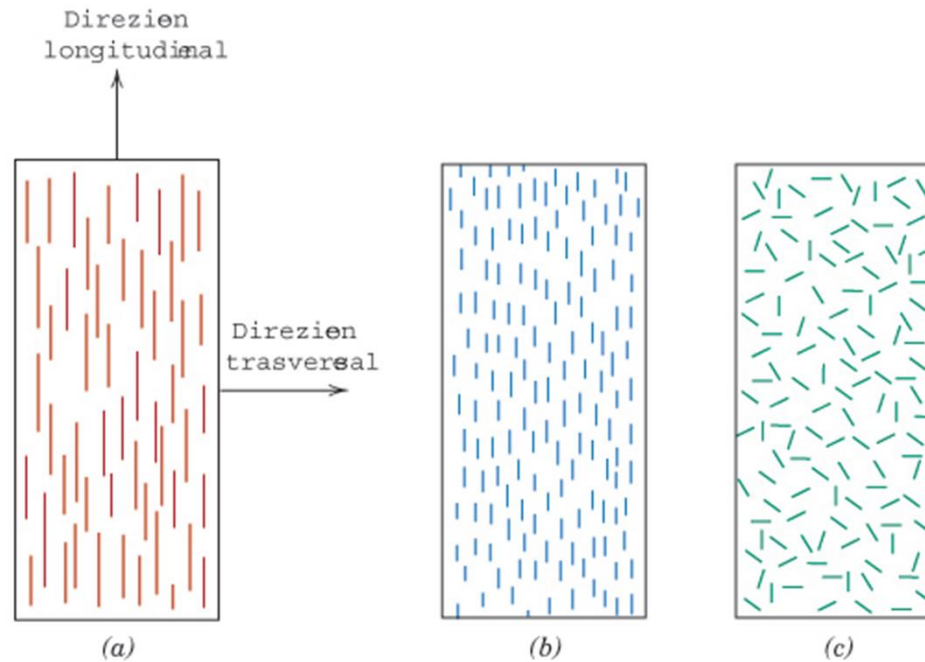
Le fibre hanno prevalentemente la funzione di "sostenere" il carico

Le fibre influenzano:

- ☐ Modulo e resistenza a trazione e compressione
- ☐ Densità
- ☐ Resistenza a fatica
- ☐ Conducibilità elettrica e termica
- ☐ Coefficiente di espansione termica
- ☐ Costo

La matrice influenza:

- ☐ Densità
- ☐ Resistenza a taglio e interlaminare
- ☐ Trasferimento del carico sulle fibre (efficacia del rinforzo)
- ☐ Resistenza ambientale



Fibre continue allineate

Fibre discontinue allineate
e orientate casualmente

Il massimo miglioramento delle proprietà si ottiene con una distribuzione delle fibre **uniforme**

La risposta meccanica di un composito dipende principalmente da:

- 1) Comportamento sforzo-deformazione di fibra e matrice
- 2) Frazione volumetrica delle due fasi
- 3) Direzione di applicazione del carico

Le proprietà di un composito con le fibre allineate sono marcatamente anisotrope, ovvero dipendono dalla direzione lungo la quale sono misurate

Le fibre

In base alla natura e al diametro, le fibre si suddividono in tre gruppi principali

Whiskers (costosi)

Sono monocristalli molto sottili che presentano un elevatissimo l/d e la > resistenza meccanica

Grafite
SiC
Si₃N₄
Al₂O₃

Fibre

Sono sia policristalline che amorfe

Il diametro è piccolo

Polimeriche/ceramiche

Vetro
Carbonio
Poliaramidi
Boro
SiC
Al₂O₃

Fili

Hanno diametri maggiori

Acciaio
Molibdeno
W

Fibre di vetro

- La fibre di vetro conferiscono al materiale composito buona resistenza, alto modulo E, stabilità dimensionale, resistenza al caldo, freddo, umidità, corrosione, facilità di fabbricazione
- Il vetro utilizzato è essenzialmente di due tipi:
 - Vetro E (elettrico) è un vetro calcio-allumino-borosilicato (resistenza 3,40 GPa, modulo 72GPa)
 - Vetro S (ad alta resistenza) a maggiore contenuto di SiO_2 (resistenza 4,30 GPa, modulo 86GPa), sono più costose
- Vengono utilizzate, pur avendo caratteristiche specifiche sfavorevoli rispetto alla fibre di carbonio o aramidiche, per il loro basso costo
- Le fibre vengono prodotte per stiratura ed assemblaggio di monofilamenti di vetro fuso

Fibre di carbonio

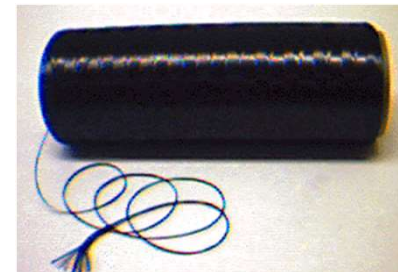
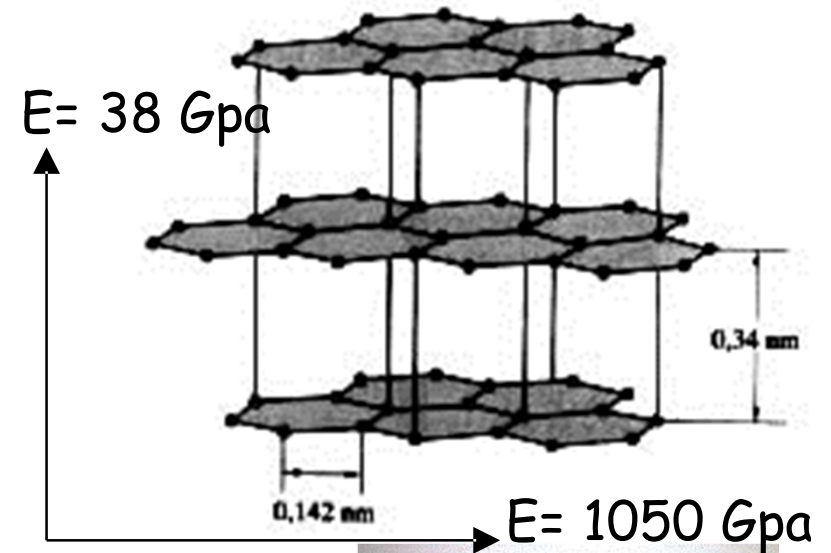
- Le fibre di carbonio hanno migliori proprietà di modulo (190-240 GPa), resistenza (3.1-4.5 GPa), densità (1500 kg/m^3), ma sono più costose
- Le fibre sono prodotte a partire da precursori, PAN o pece

Partendo dal PAN, ci sono tre fasi per la produzione:

- **Stabilizzazione.** Le fibre di PAN vengono allungate nella direzione della fibra e mantenute a ca. $200-220^\circ\text{C}$
- **Carbonizzazione.** Le fibre di PAN vengono pirolizzate in atmosfera inerte a $1000-1500^\circ\text{C}$ fino a che non resta solo carbonio (eliminando O, H, N)
- **Grafitizzazione.** Per aumentare il modulo di elasticità si porta il materiale a 1800°C per massimizzare l'orientamento dei cristalliti grafitici.

Fibre di Carbonio: struttura cristallina della grafite

- La grafite è la forma cristallina del carbonio
- L'atomo di carbonio si trova nella ibridazione sp^2
- La grafite ha struttura stratificata: in ogni strato legami covalenti creano delle celle esagonali
- I diversi strati sono tenuti insieme da legami secondari.
- La distanza tra i piani è maggiore della distanza tra gli atomi adiacenti dentro ogni singolo esagono.
- Lo scorrimento dei piani conferisce alla grafite proprietà lubrificanti
- Esiste una forte anisotropia di proprietà meccaniche e fisiche (massime lungo i piani e scadenti in direzione ortogonale ad essi).



Fibre di Carbonio

Vantaggi:

- Elevato modulo specifico a trazione
- Elevata resistenza specifica a trazione
- Bassissimo coefficiente di espansione termica lineare
- Elevata resistenza a fatica

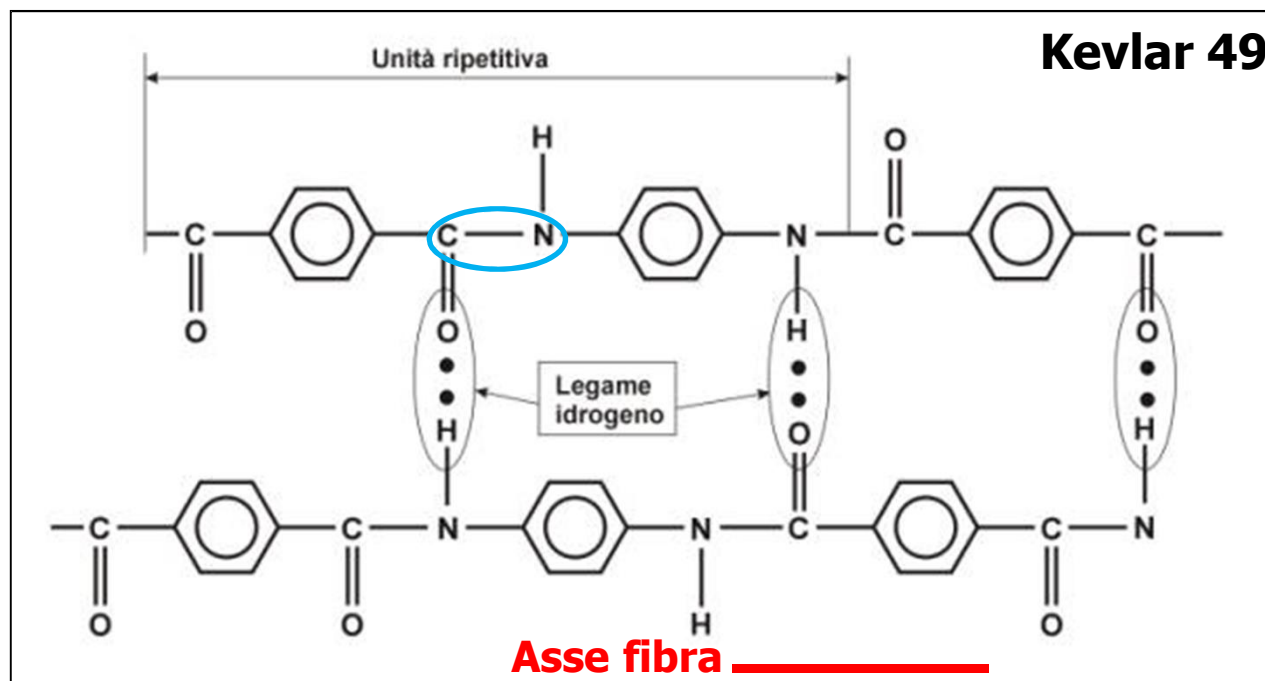
Svantaggi:

- Bassa resistenza ad impatto
- Elevata conducibilità elettrica
- Elevato costo (applicazioni aerospaziali)

Fibre aramidiche

- Le fibre aramidiche sono costituite da poliammidi aromatiche altamente cristalline, in cui almeno l'85% dei gruppi ammidici CN sono legati direttamente a due anelli aromatici in posizione para (atomo 1 e 4)
- Questo conferisce ottima resistenza nella direzione della fibre e bassa resistenza in direzione trasversale
- Hanno eccezionali proprietà specifiche
- Sono diffuse con il nome commerciale di **KEVLAR** (DuPont), **TWARON** (Akzo Nobel) o **NOMEX** (DuPont).

Il legame
idrogeno lega le
catene
polimeriche in
direzione
trasversale



Fibre Aramidiche

Vantaggi:

- **Elevatissima resistenza specifica a trazione**
- **Elevata resistenza all'impatto e assorbimento di vibrazioni**
- **Buona stabilità termica fino a 250-300°C**
- **Buona resistenza chimica**
- **Coefficiente di espansione termica lineare negativo**

Svantaggi:

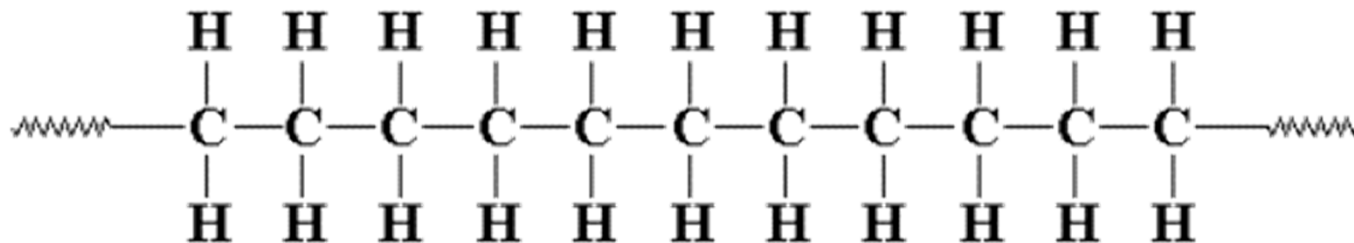
- **Bassa resistenza a compressione**
- **Difficoltà di taglio e lavorazione**
- **Sensibilità alla luce UV**

Fibre di Polietilene

Polietilene ad altissimo peso molecolare, UHMWPE (Ultra high molecular weight polyethylene) prodotto per gel spinning seguito da stiri elevati

Elevatissimo grado di cristallinità (95-99%).

Introdotte verso la metà degli anni '80, sono diffuse con il nome commerciale di **SPECTRA** (Honeywell), Dyneema (DSM), Snia (Tenfor) o Tekmilon (Mitsui).



Fibre di Polietilene

Vantaggi:

- Elevatissima resistenza specifica a trazione (superiore del 40% a quella del Kevlar)
- Elevata resistenza all'impatto e assorbimento di vibrazioni
- Inattaccabilità agli acidi e alle basi
- Bassa costante dielettrica
- Densità inferiore a 1 kg/dm^3
- Elevata resistenza all'abrasione
- Resistenza ai raggi UV

Svantaggi:

- Bassa temperatura di fusione (150°C)
- Alta infiammabilità
- Ritiro di qualche per cento per azione del calore.

La fase matrice

Può essere un **polimero**, un **metallo** o un **ceramico**

Protegge ciascuna fibra da danni superficiali e dalle interazioni con l'ambiente

Tiene separate le fibre ostacolando, in virtù della sua duttilità e plasticità, la propagazione di cricche fragili da fibra a fibra che potrebbero dare origine a rottura catastrofica

Se si rompono alcune fibre, il composito nel suo insieme resiste fino a che il numero totale di fibre rotte adiacenti è talmente elevato da formare una lacuna di dimensioni critiche

E' importante che il legame adesivo interfacciale matrice/fibra sia elevato per minimizzare il fenomeno del pull-out (sfilamento) delle fibre

Un buon legame è essenziale per massimizzare la trasmissione dello sforzo dalla matrice debole alle fibre forti

Matrici polimeriche

I materiali costituenti la matrice sono in genere più duttili dei materiali delle fibre

La matrice supporta le fibre, trasmette il carico alle fibre

Le T di fusione della matrice determina la temperatura massima di utilizzo del composito

Le resine poliestere e le epossidiche sono le più usate nel settore compositi

Le resine poliestere sono più economiche ma meno resistenti delle epossidiche

Anche polimeri termoplastici (PP, PET) vengono utilizzati come matrici di compositi

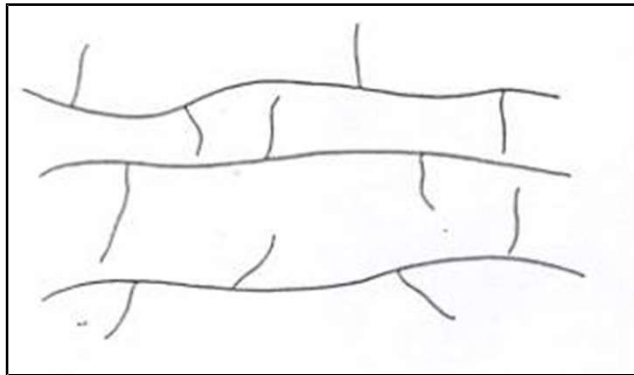
Matrici polimeriche

Matrici termoplastiche

Presentano una struttura tale che all'aumentare della T diventano più fluide ma, una volta raffreddate, riacquistano le loro proprietà

Molecole lineari tenute insieme da deboli legami secondari

Possono essere fuse e riformate un numero elevato di volte.

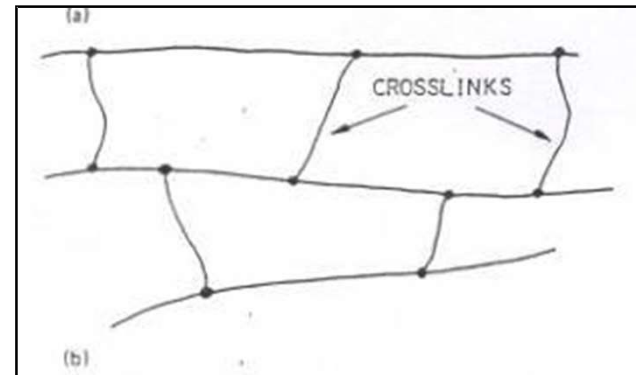


Matrici termoindurenti

Presentano una struttura tale che innalzando la T oltre un certo limite degradano in maniera irreversibile

Molecole legate da forti legami covalenti che formano un network tridimensionale.

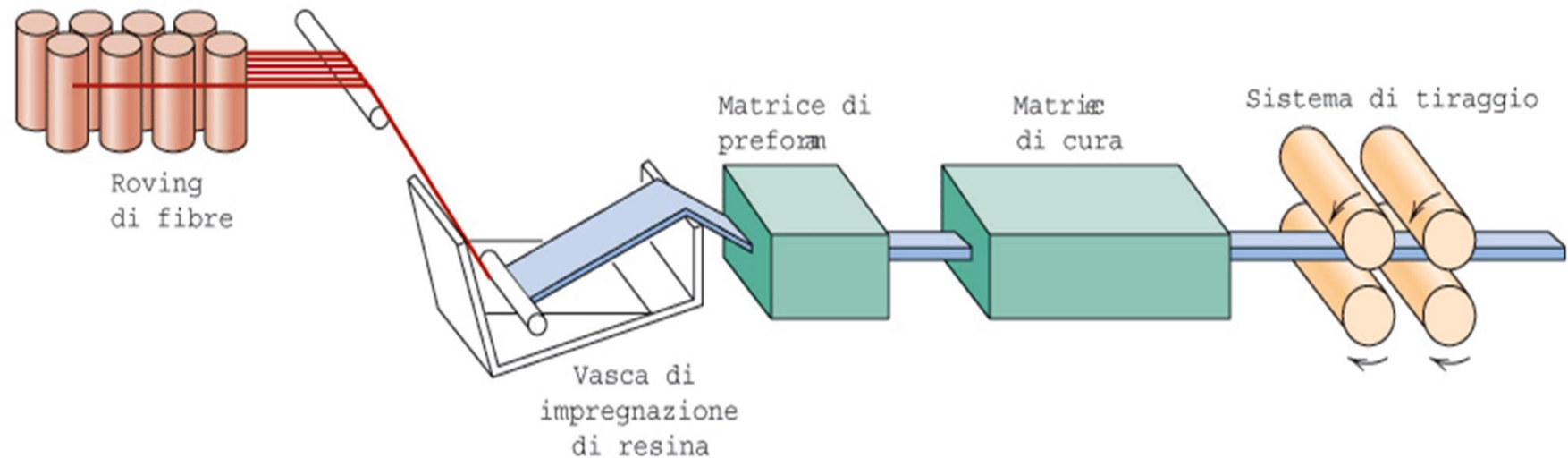
Non possono essere fuse e riformate per mezzo del calore ma solo rese gommosi per $T > T_g$



Processi di fabbricazione (compositi a matrice polimerica)

La pultrusione

Elementi di lunghezza continua e sezione trasversale costante (barre, tubi, travi)



I trefoli di fibre continue vengono impregnati in un bagno di resina e fatti passare attraverso una filiera in acciaio riscaldato che determina la forma del profilato

La pultrusione

- E' un processo facilmente automatizzabile
- Buona velocità di produzione (abbassamento costi)
- Non vi è alcuna limitazione alla lunghezza del pezzo in produzione
- Ampia varietà di forme ottenibili
- Fibre di vetro, carbonio e aramidiche (40-70%)
- Matrici di resine di poliestere, vinilestere ed epossidiche

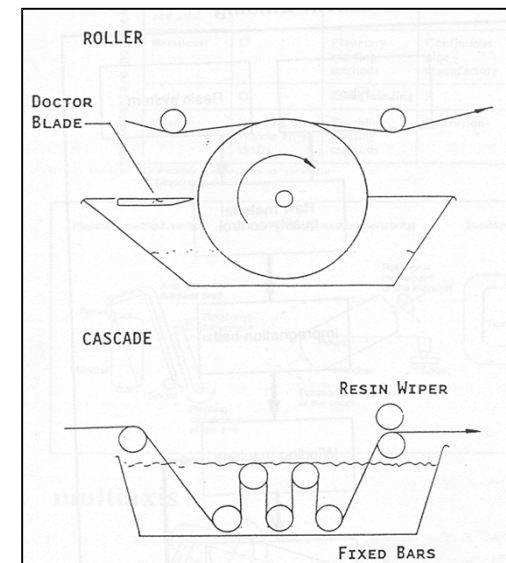
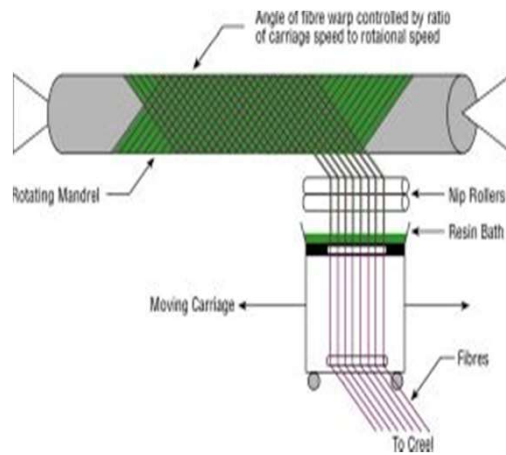
Filament winding («avvolgimento di fibra»)

Il processo di filament winding prevede che la fibra di rinforzo sia fatta passare in un bagno di resina e quindi avvolta su un mandrino

Quando sono stati avvolti un numero sufficiente di strati il composito viene curato (in forno o a T_{amb}) e successivamente staccato dal mandrino

Caratteristiche dei mandrini

- Devono resistere agli sforzi di compressione provocati dalle fibre durante l'avvolgimento e presentare una elevata rigidità assiale (ad es. per tubi)
- Devono mantenere sufficienti proprietà meccaniche ad alta temperatura
- Devono essere facilmente rimossi



Filament winding

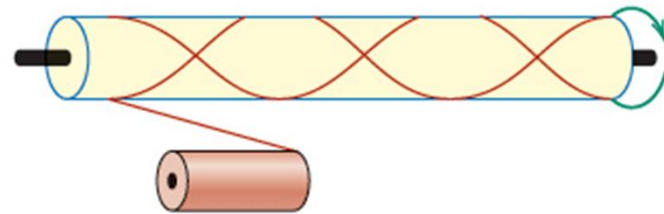
Materiali usati per i mandrini

Mandrini **non** collassabili

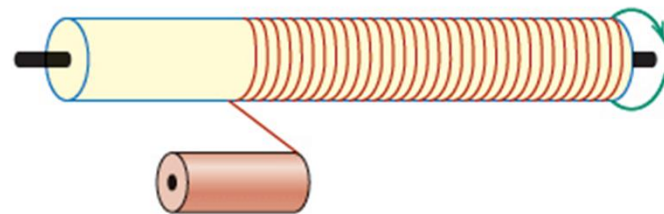
In genere in acciaio ed usati per geometrie che ne consentano l'estrazione

Mandrini **collassabili**

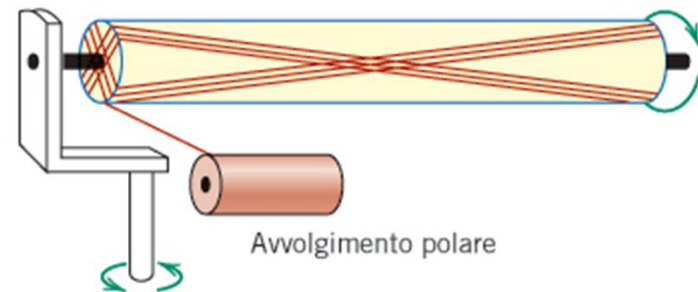
- smontabili in metallo o più raramente in composito
- Gonfiabili in gomma
- Solubili in acqua (ad es. impasti di sabbia e PVA)



Avvolgimento elicoidale



Avvolgimento circonferenziale



Avvolgimento polare

Produzione di componenti a struttura cava (generalmente cilindrica)

Elevato resistenza/peso

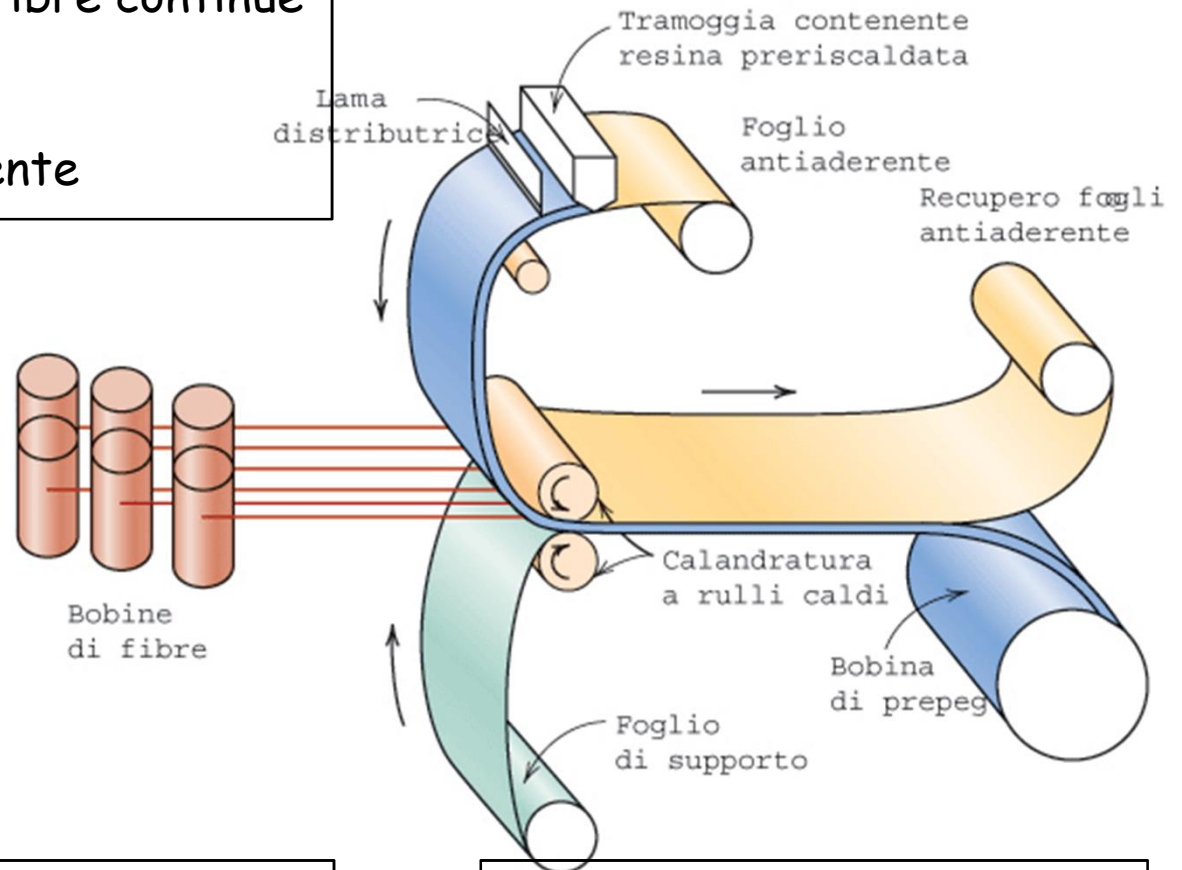
Tecnologia in crescita grazie ai costi di produzione contenuti

Produzione dei preimpregnati

Semilavorati (lamine) a base di fibre continue preimpregnate di una resina polimerica curata solo parzialmente

0,08-0,25 mm
25-2425 mm
35-45% vol. di resina
T conservazione: 0°C

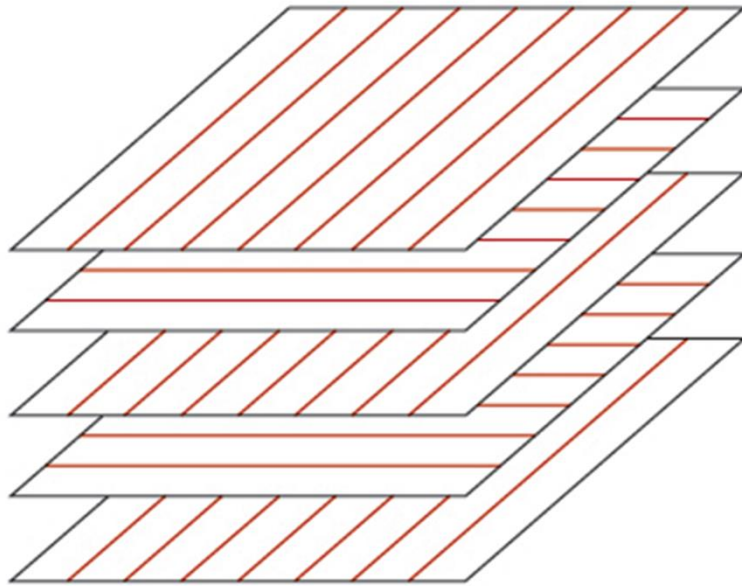
Matrice:
resina termoplastica/termoindurente
Fibre: unidirezionali (tape) o tessute (woven)
in C, vetro o aramidiche



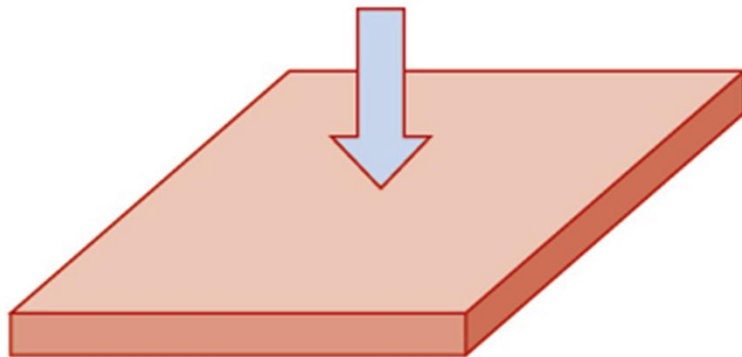
Preparazione del composito:

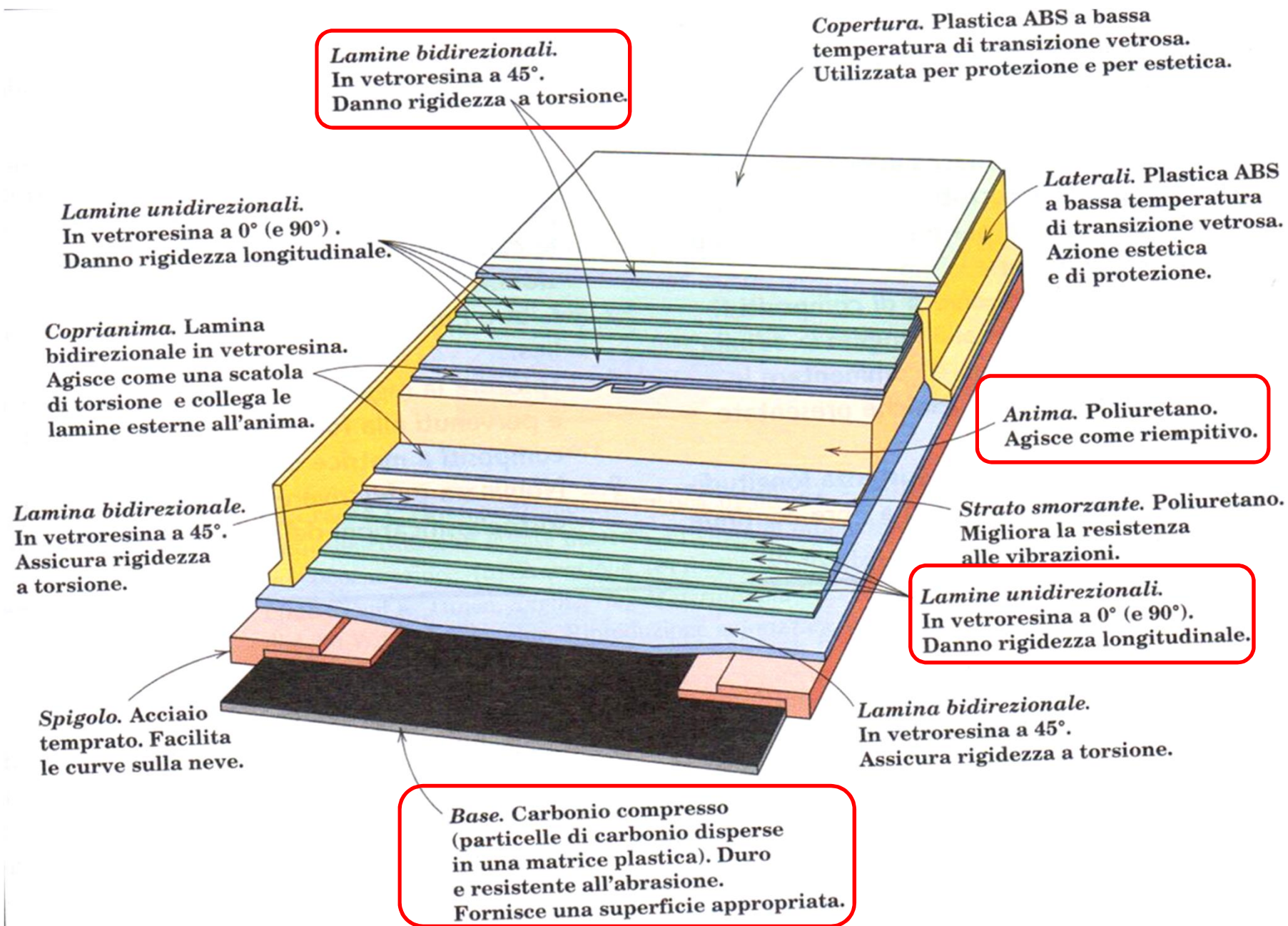
- lay-up dei diversi strati
- filament winding

Compositi strutturali - laminati

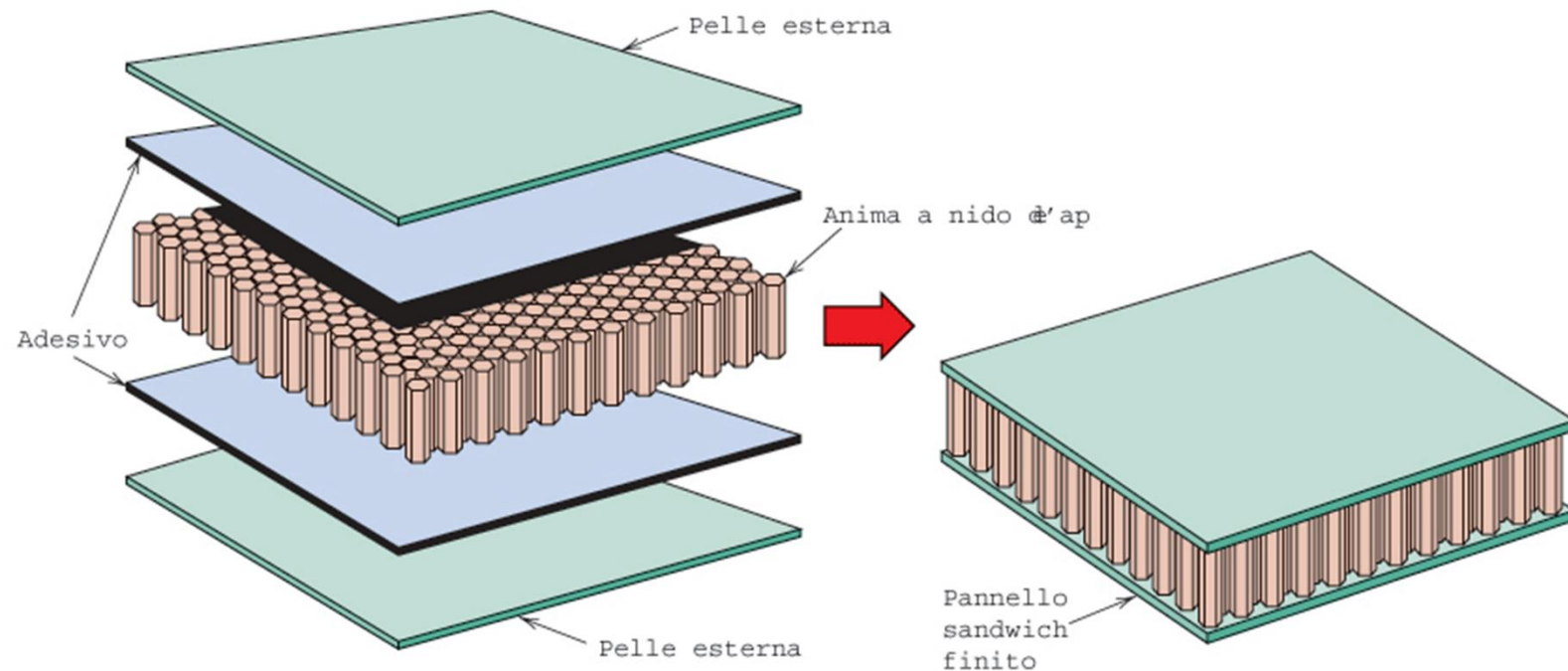


Valori di resistenza massima in una direzione inferiori rispetto a quelli ottenibili posizionando tutte le fibre nella stessa direzione





Compositi strutturali - pannelli sandwich



Applicazioni:

tetti, pavimenti, murature,
ali, fusoliera, stabilizzatori