

Introduzione ai materiali COMPOSITI

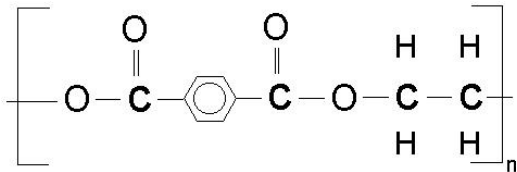
Dr. Ing. Ramona Sola
Ramona.sola@gmail.com

Definizione di materiale COMPOSITO

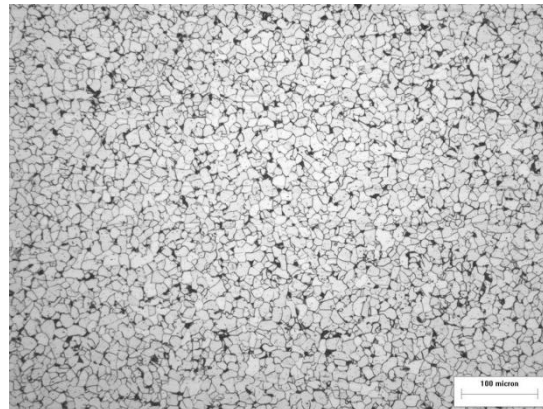
Non esiste ancora una definizione universalmente riconosciuta

MATERIALE COSTITUITO DA DIVERSE PARTI (O COSTITUENTI)

Scala ATOMICA

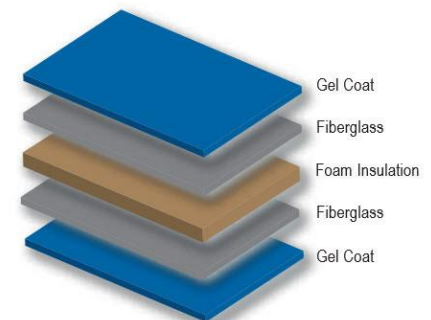


Scala MICROSCOPICA
1 – 100 μm



Scala MACROSCOPICA
Da 0.1 mm

Layers of a Standard Composite Construction Wall

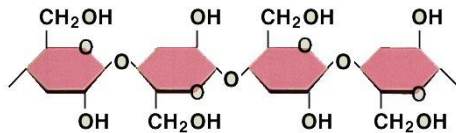
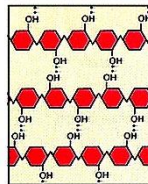


... altri esempi di materiale COMPOSITO

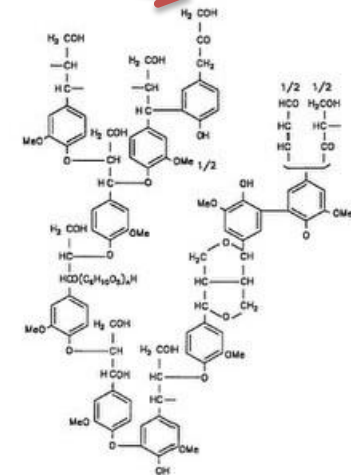


legno

Cellulosa

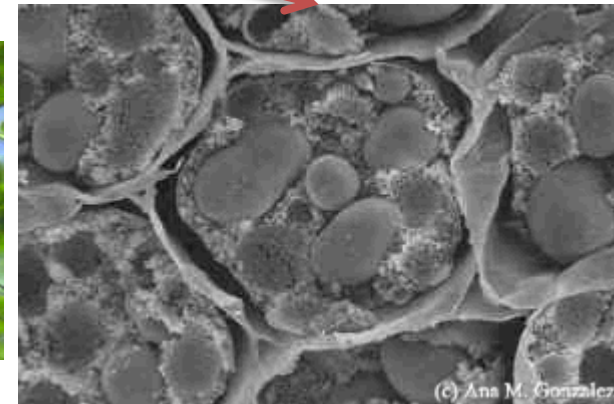
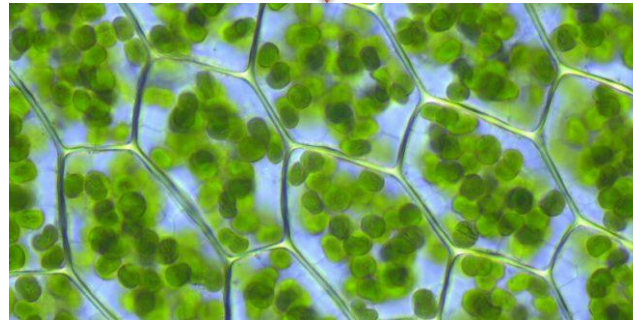
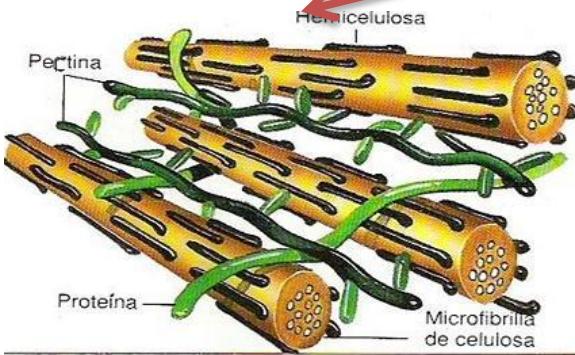


Fibre di cellulosa

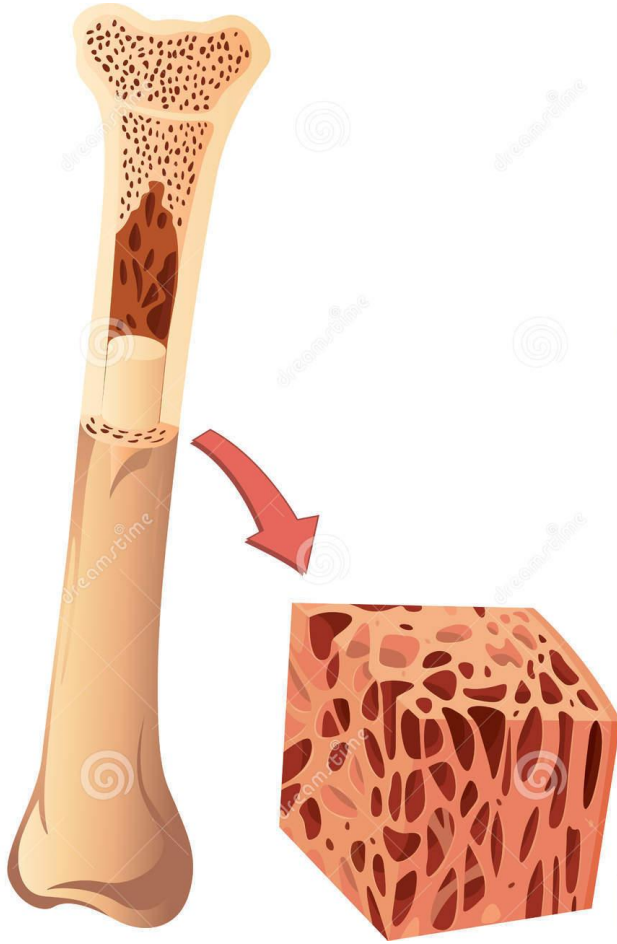


Matrice di lignina

... altri esempi di materiale COMPOSITO



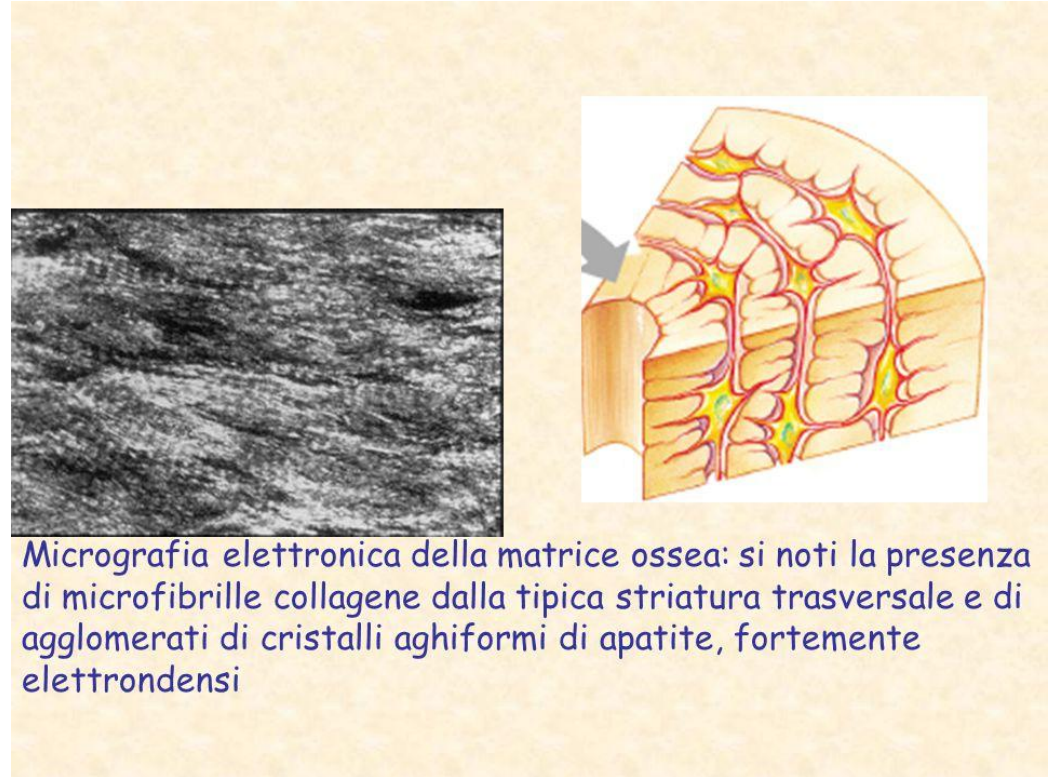
... altri esempi di materiale COMPOSITO



19282185
Alhar | Dreamstime.com



Download from
Dreamstime.com
This watermark-free image is for previewing purposes only.



Micrografia elettronica della matrice ossea: si noti la presenza di microfibrille collagene dalla tipica striatura trasversale e di agglomerati di cristalli aghiformi di apatite, fortemente elettrondensi

Fibre di collagene (proteine soffici) + matrice di apatite (minerale duro e fragile)

Definizione di materiale COMPOSITO

In progettazione per materiale composito si intende:
Un materiale costituito da differenti macr-micro costituenti

Si definisce MATERIALE COMPOSITO un sistema composto da due (o più) materiali differenti combinati insieme per formare un materiale composito con proprietà superiori rispetto alle proprietà dei singoli costituenti



PRINCIPIO DELLE AZIONI COMBinate

Ottimizzazione di una proprietà mediante una attenta e studiata combinazione di due o più materiali differenti

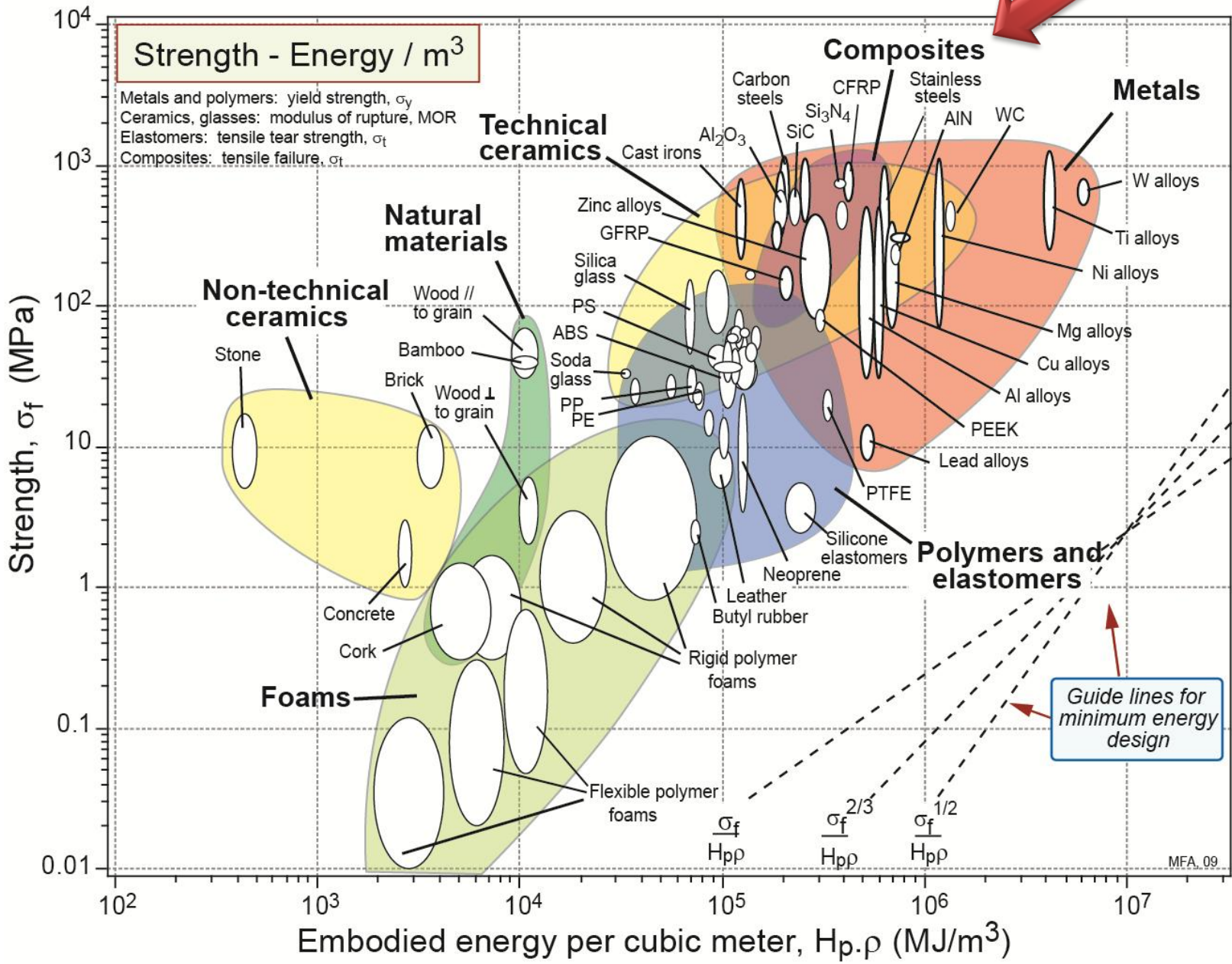
definizione

Materiale multifase, creato artificialmente, diverso da quelli che si trovano in natura. Le fasi presenti devono essere diverse chimicamente e separate da una interfaccia ben distinta



Strength - Energy / m³

Metals and polymers: yield strength, σ_y
Ceramics, glasses: modulus of rupture, MOR
Elastomers: tensile tear strength, σ_t
Composites: tensile failure, σ_t



Technical ceramics

Composites

Metals

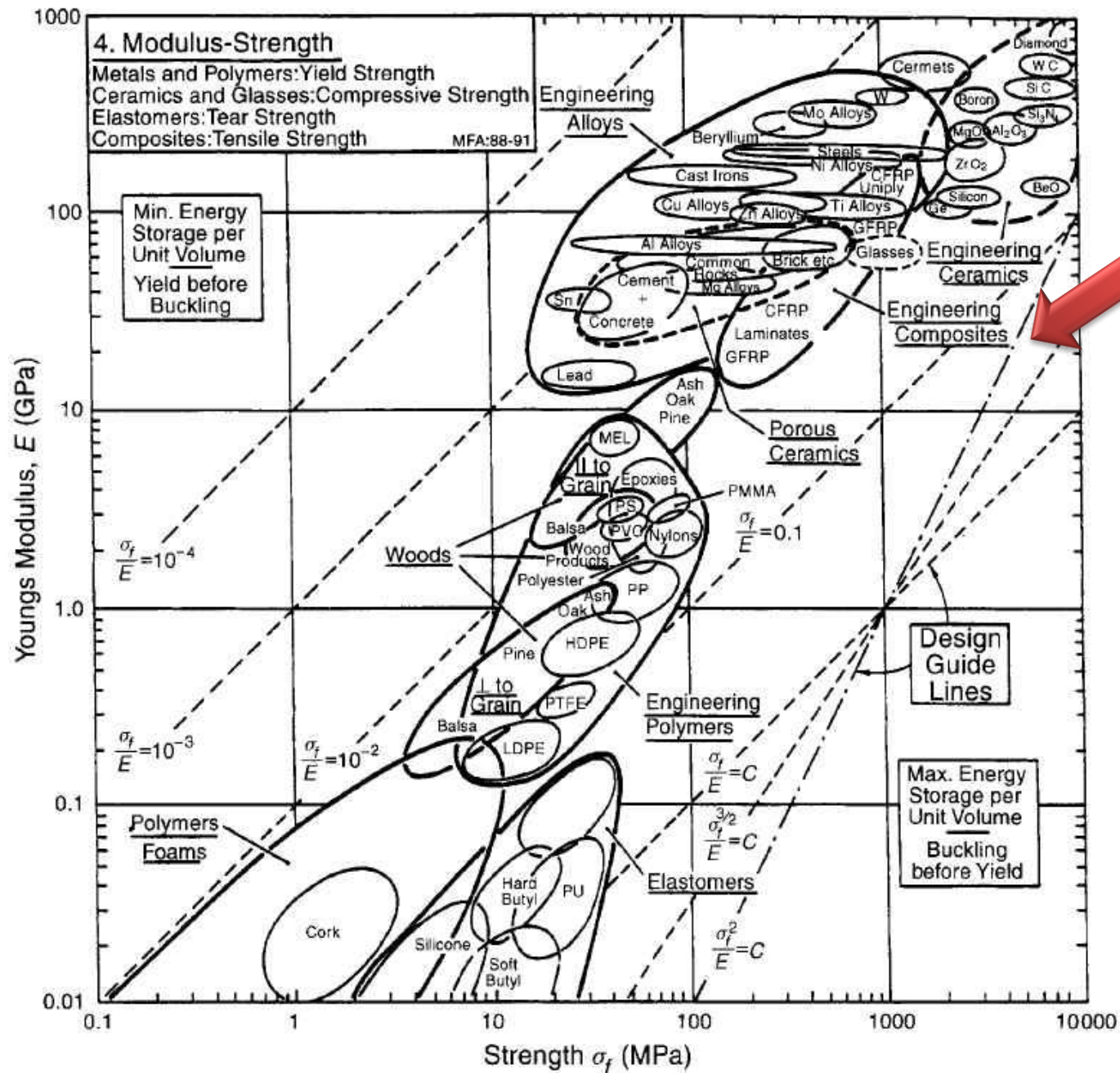
Non-technical ceramics

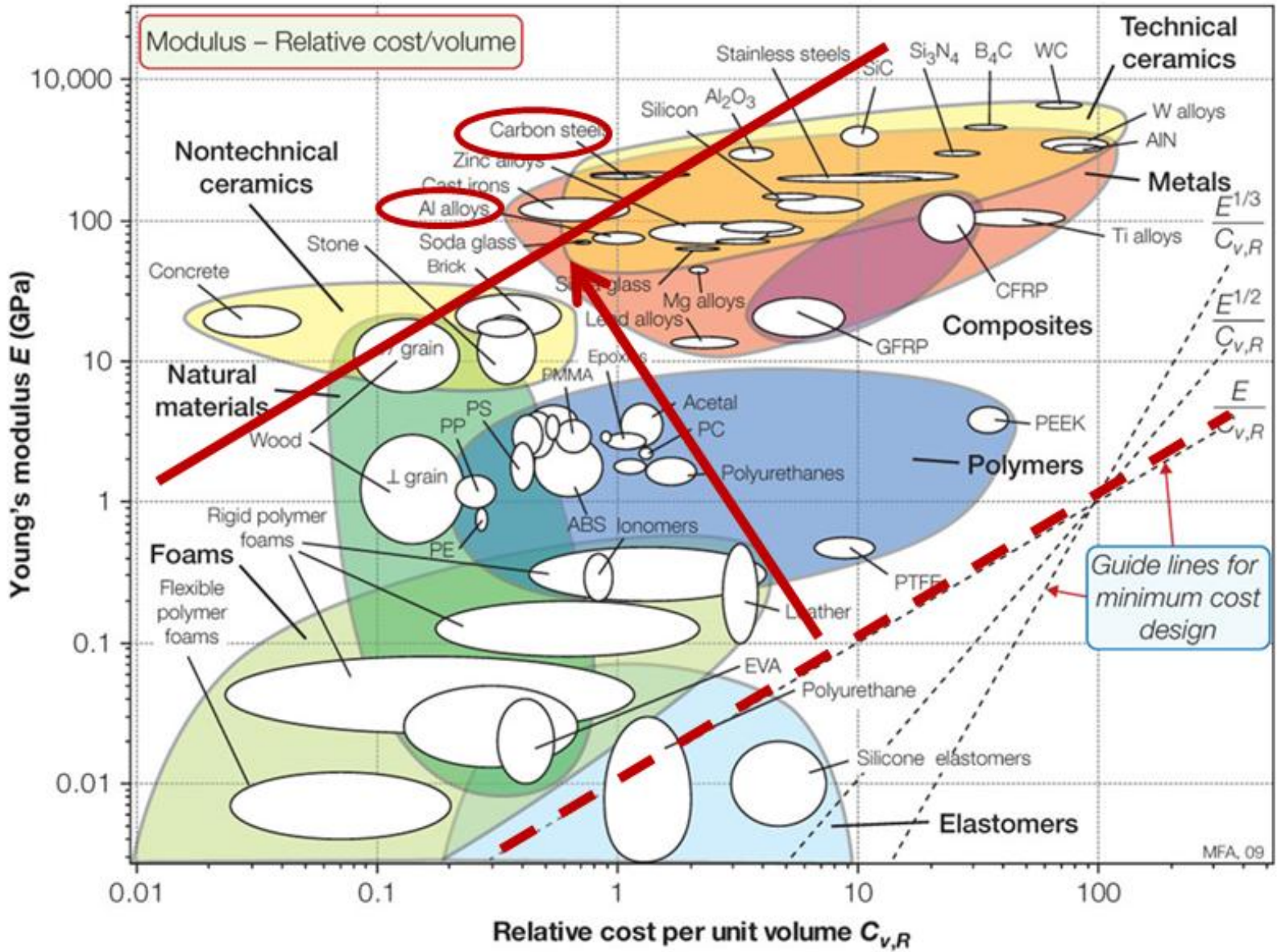
Natural materials

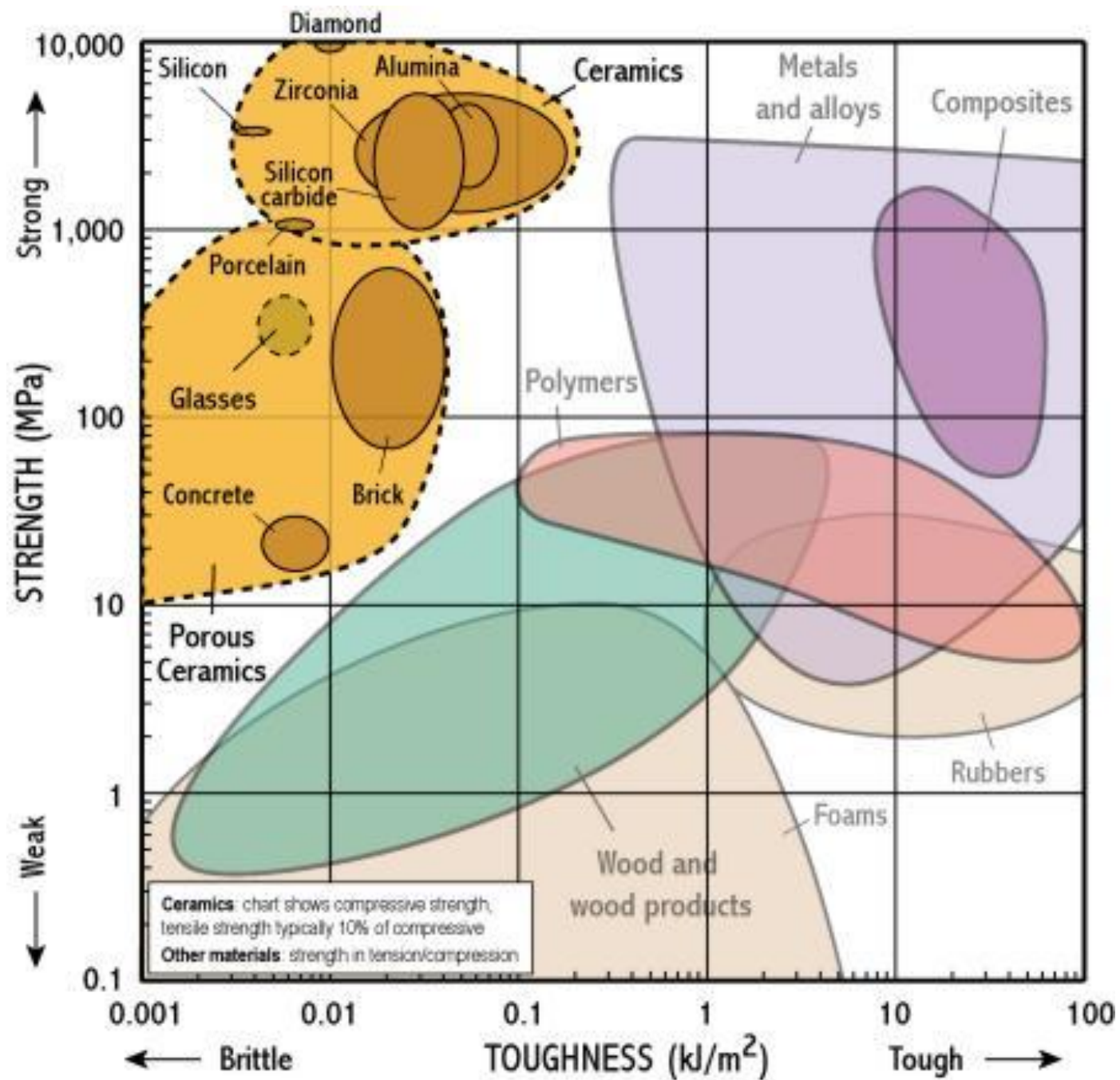
Polymers and elastomers

Foams

Guide lines for minimum energy design



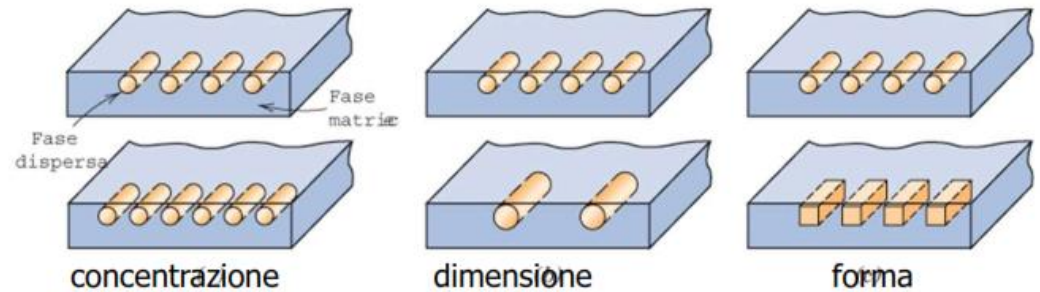




Materiali compositi

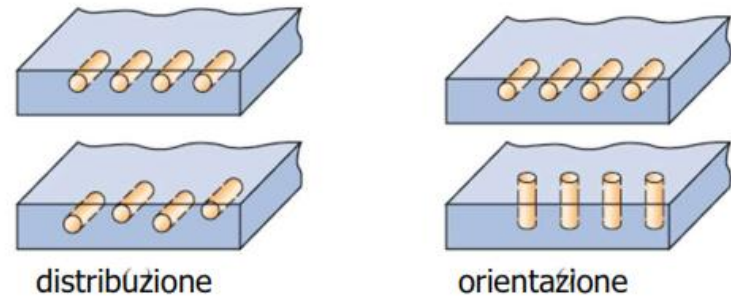
Un composito è un materiale multifasico creato artificialmente, che presenta un conveniente equilibrio delle fasi costituenti, in modo da realizzare proprietà migliori di quelle dei singoli costituenti

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



la matrice che, bloccando le fibre, trasferisce loro il carico esterno e le protegge dai fattori ambientali, dall'usura e da eventuali azioni meccaniche di taglio;

il materiale di rinforzo (o carica) che viene aggiunto sotto forma di fibre lunghe, fibre corte o particelle (Figura 1.1);

l'interfaccia tra il materiale di rinforzo e la matrice (Figura 1.2).

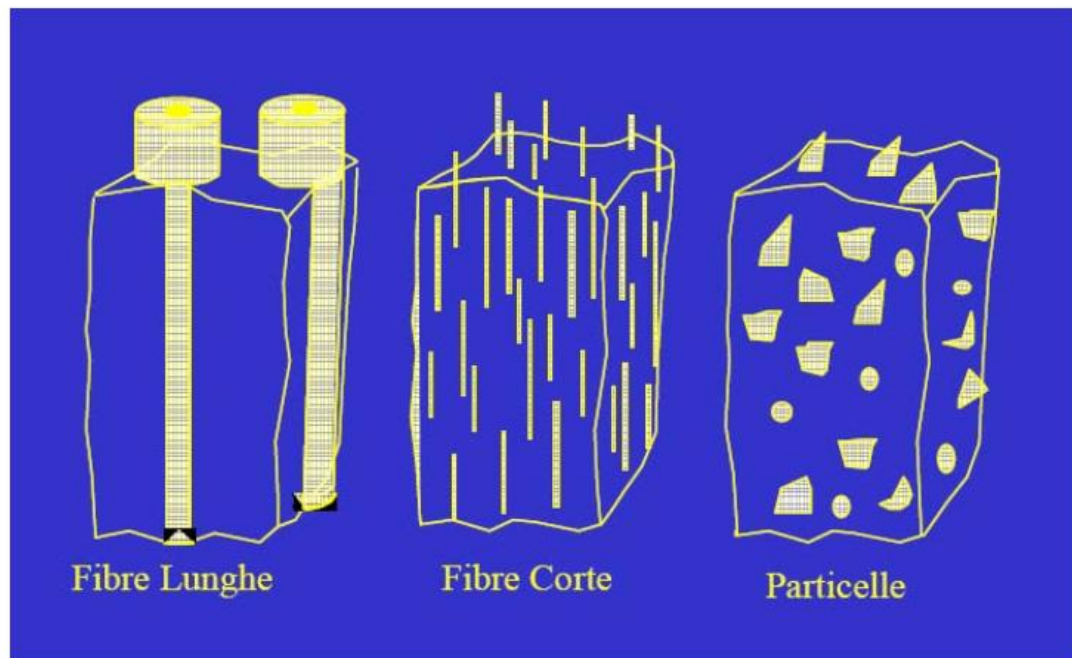


Figura 1.1 - diverse tipologie di rinforzo per materiali compositi.

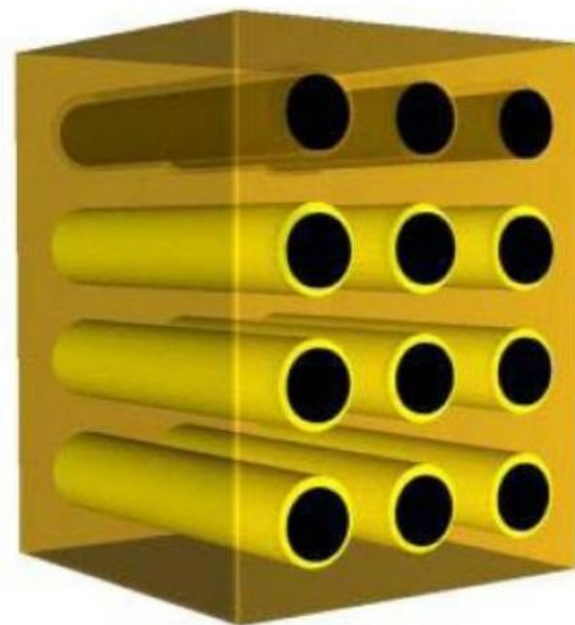


Figura 1.2 - schema dell'interfaccia tra fibra e matrice.

Proprietà dei compositi

Le proprietà dei materiali compositi sono strettamente legate alle proprietà dei singoli materiali componenti, dalla loro forma, dimensione, concentrazione, distribuzione, orientamento, nonché dalla loro mutua interazione.

La resistenza e la rigidità del materiale composito dipendono in gran parte dal materiale di rinforzo e, in particolare nel caso di fibre lunghe o corte, dall'orientazione delle fibre rispetto ai carichi applicati. Tuttavia si ribadisce che il comportamento meccanico non dipende esclusivamente dal materiale di rinforzo, ma anche dalla sinergia tra il rinforzo e la matrice. Ad esempio, quando un fascio di fibre senza matrice è sottoposto a sollecitazione, la rottura di una di esse comporta che lo sforzo venga trasferito alle fibre rimanenti, con conseguente diminuzione della resistenza globale del fascio. Se, invece, le fibre sono immerse in una matrice, la rottura di una fibra non compromette la sua resistenza meccanica in virtù della presenza dell'interfaccia e della deformabilità della matrice che assicurano il fenomeno del trasferimento di carico. Quando, infatti, le estremità della fibra nel punto di frattura si allontanano, la deformazione elastica o lo scorrimento plastico della matrice esercitano, tramite l'interfaccia, delle forze di taglio che ripartiscono gradualmente la sollecitazione anche sulla fibra fratturata.

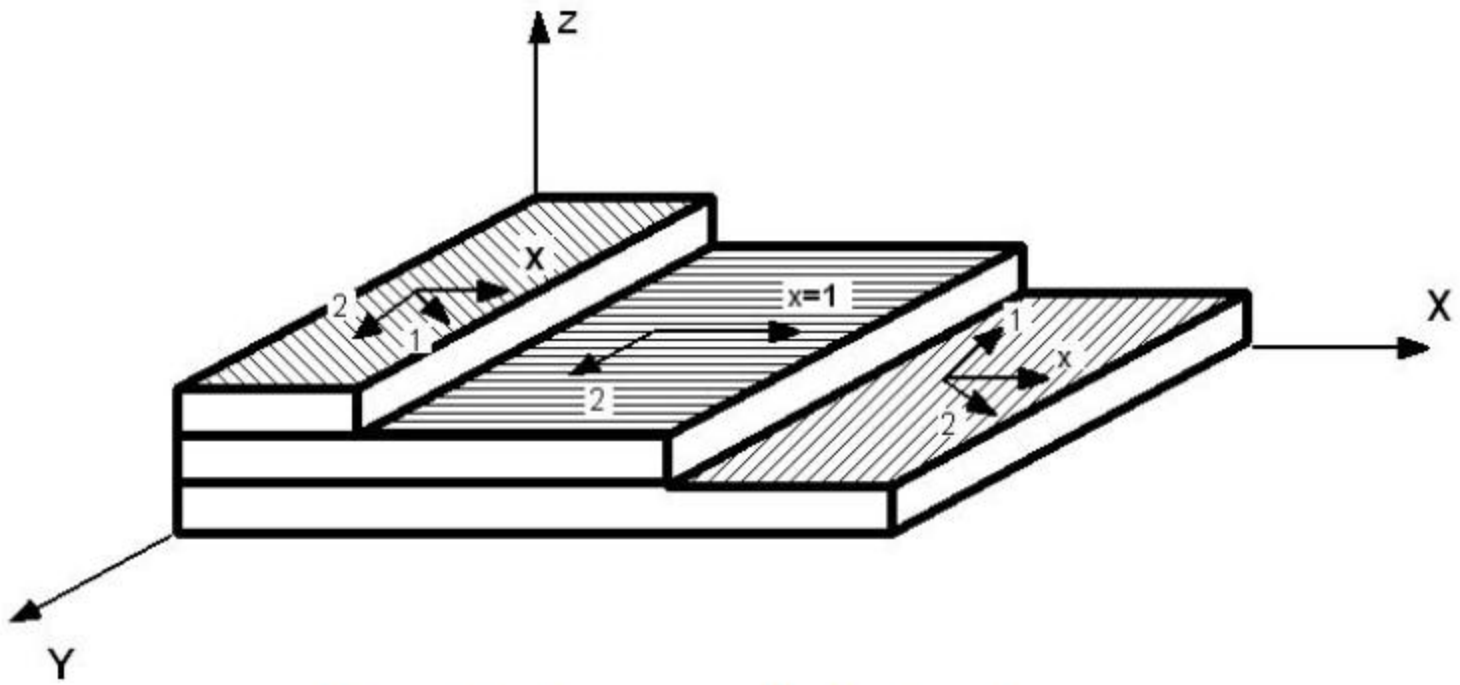
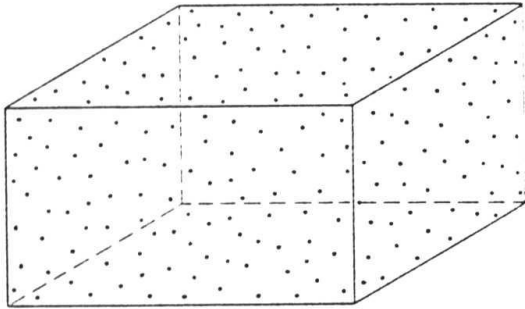


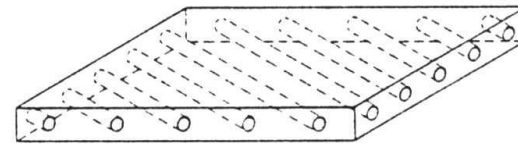
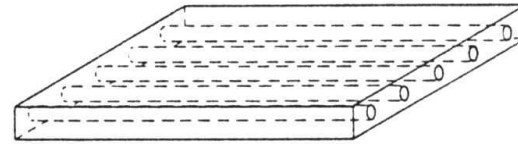
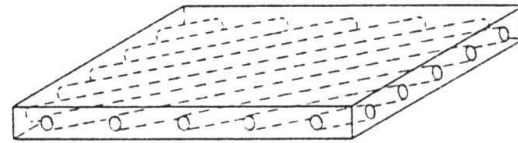
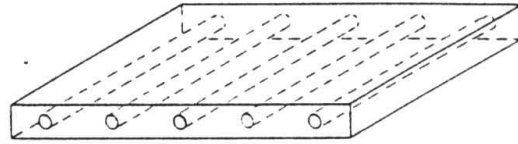
Figura 1.3 - laminato costituito da più lamine.

classificazione

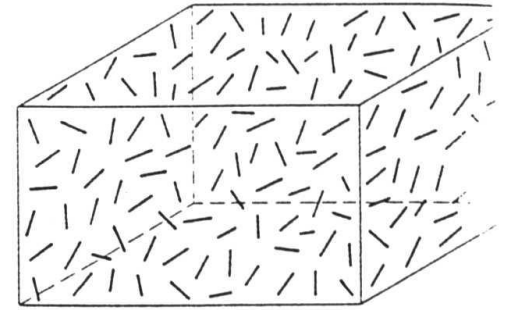
- Meccanismo di resistenza, strettamente legato alla forma ed all'orientamento del rinforzo. Si distingueranno così i “*compositi rinforzati con fibre*” dai “*compositi rinforzati con particelle*”.
- Tipo di matrice: si distingueranno, pertanto, compositi plastici, metallici o ceramici in relazione alla natura della matrice (plastica, metallica o ceramica) ed indipendentemente dal tipo delle fibre adoperate come rinforzo;



PARTICELLE



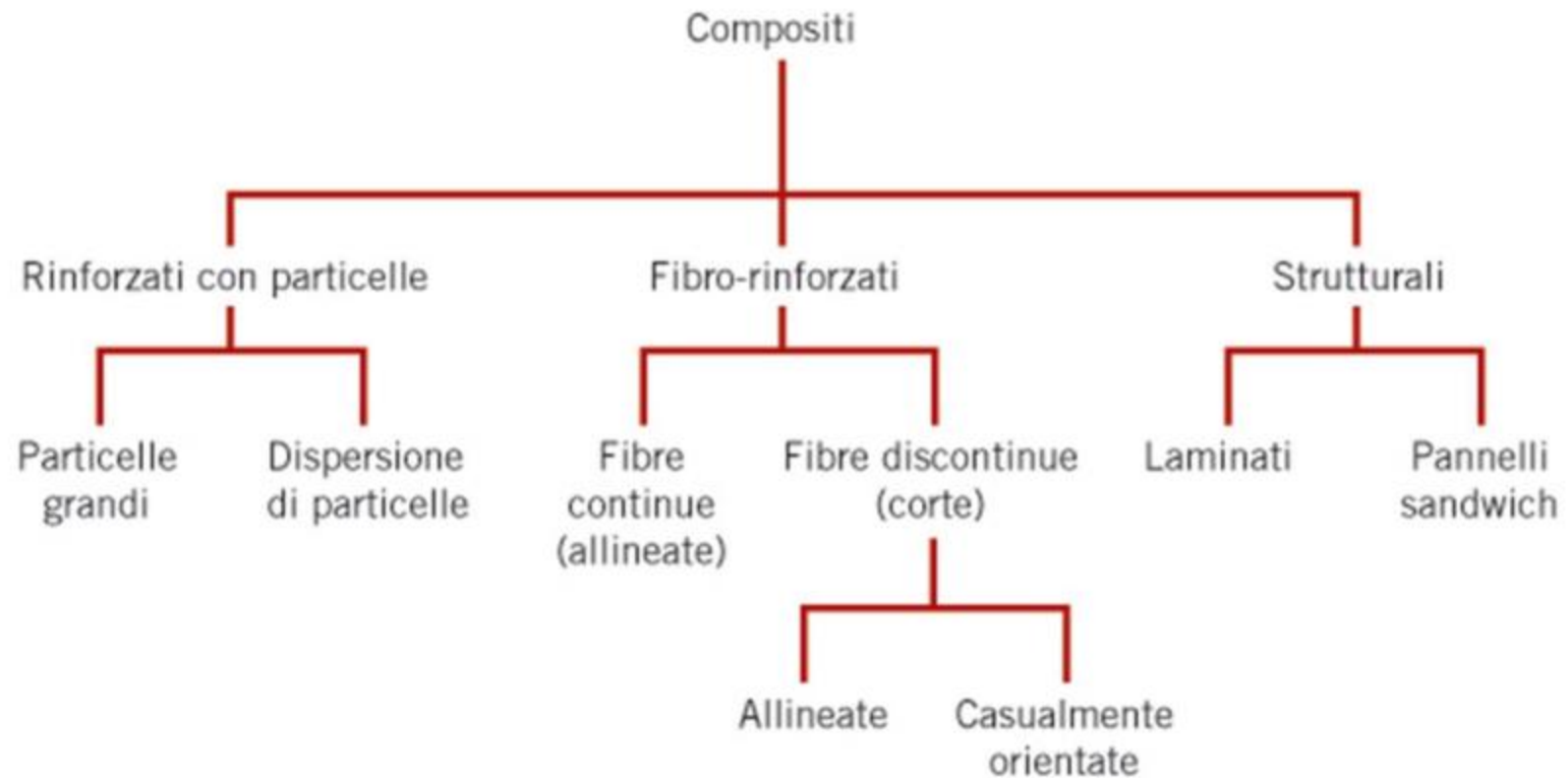
FIBRE CONTINUE



FIBRE CORTE

Classificazione: Meccanismo di resistenza

Classificazione schematica dei materiali compositi



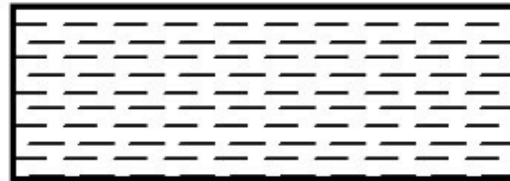
Classificazione: Meccanismo di resistenza

I rinforzi, sia nel caso di fibre che di particelle, potranno essere orientati in modo casuale oppure secondo una direzione preferenziale.

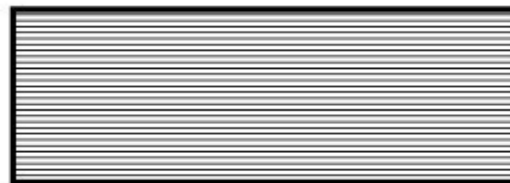
Le fibre, che possono essere lunghe o corte, potranno essere disposte in modo da costituire una *lamina singola* oppure un *laminato* (sovrapposizione di più lamine, Figura 1.3). In aggiunta se la fibra è lunga si parlerà di lamina a fibra continua, altrimenti di lamina a fibra discontinua (Figura 1.4).



a Orientazione casuale

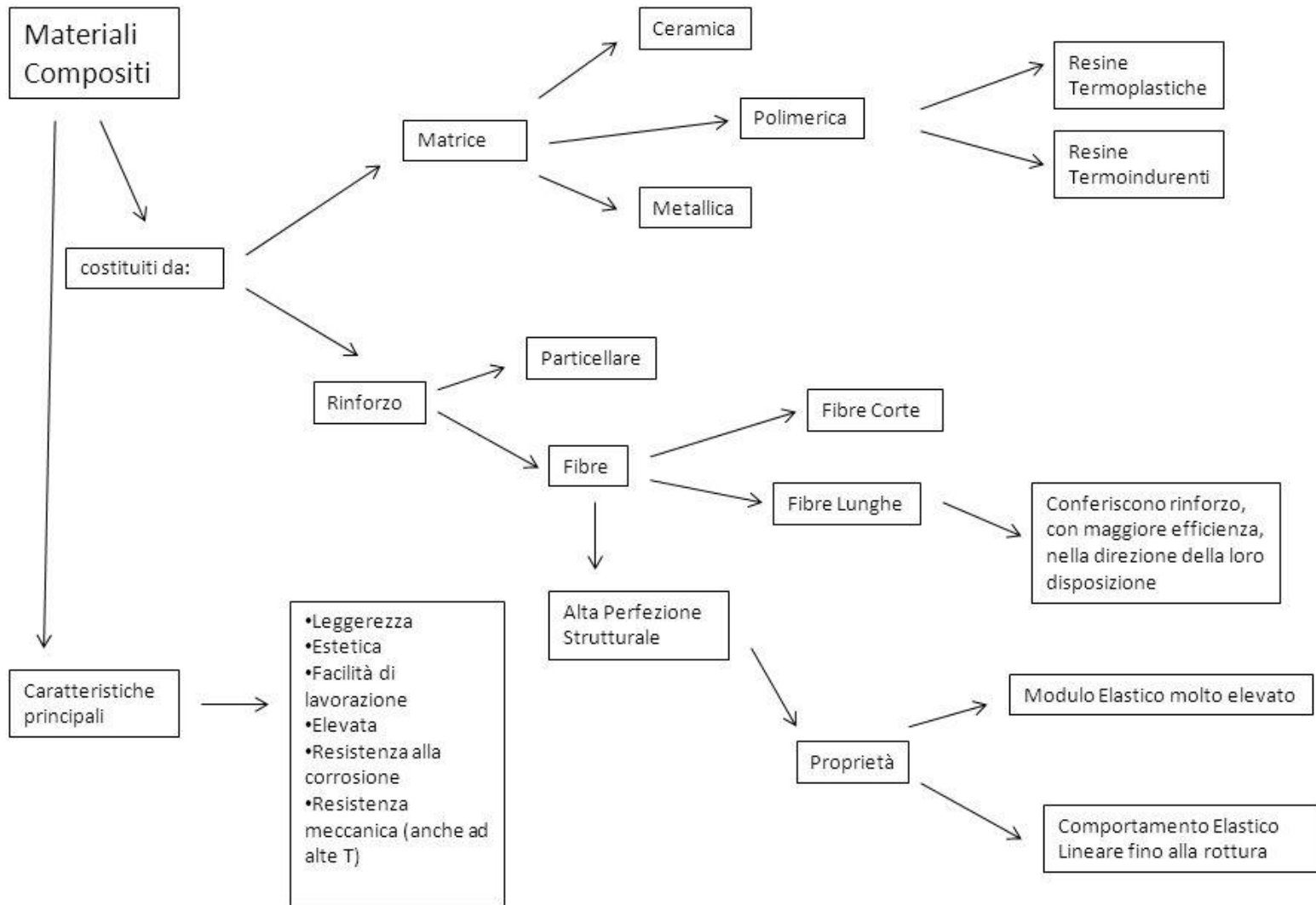


b Fibre corte (discontinue) e ordinate



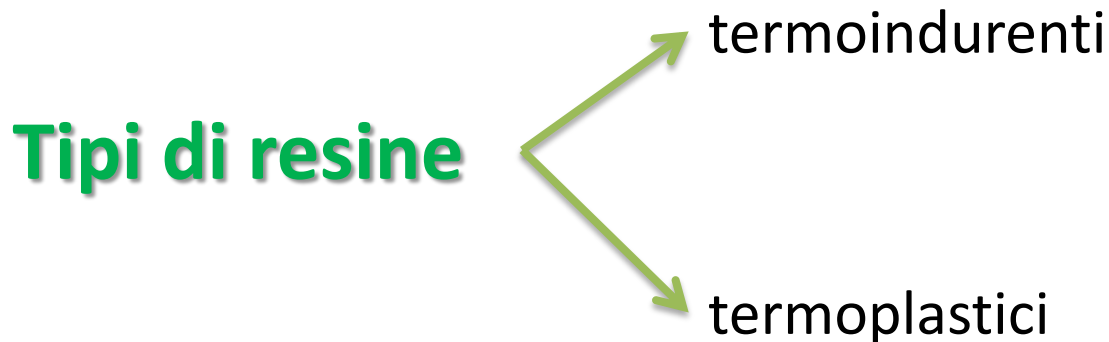
c Fibre lunghe

Figura 1.4 - a) fibre discontinue disposte casualmente, b) fibre discontinue ordinate, c) fibre continue.



Classificazione: tipo di matrice PLASTICA

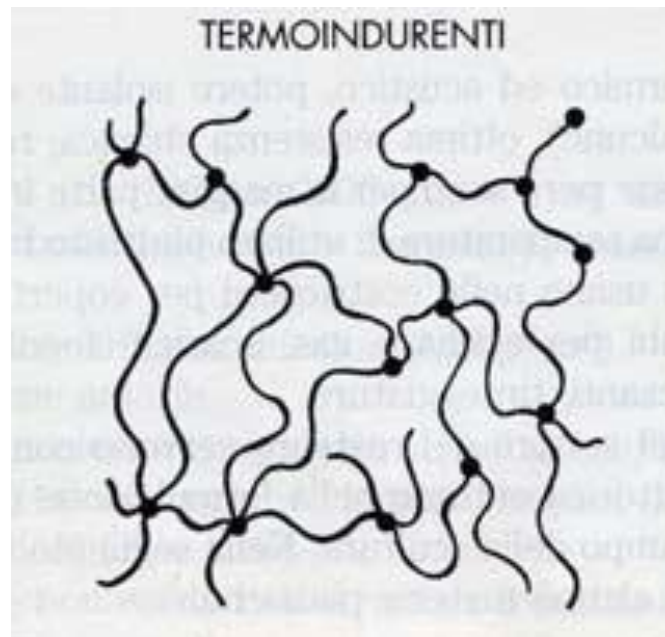
I compositi plastici, quelli la cui matrice è costituita da una materia plastica, sono senza dubbio i più noti e diffusi sia per le loro modalità di applicazione alla portata anche di coloro che non dispongono di tecnologie sofisticate che dei costi in continua diminuzione. Hanno oggi soppiantato altri materiali in una vasta gamma di applicazioni, anche se non sempre si tratta di utilizzazione in elementi strutturali veri e propri; spesso ne vengono quindi limitate le possibilità di impiego e non viene ottenuto il massimo rendimento delle loro proprietà meccaniche.



Classificazione: tipo di matrice

Resine TERMOINDURENTI

Con il nome di termoindurenti si indicano una vasta schiera di materiali plastici che hanno in comune la proprietà di divenire infusibili ed insolubili dopo essere stati portati a fusione e successivamente raffreddati. Tale caratteristica deriva dalla formazione a livello molecolare, dopo la prima fusione, di un reticolo tridimensionale tenuto insieme da forti legami covalenti i quali rendono irreversibile il processo.



Classificazione: tipo di matrice

Resine TERMOINDURENTI

**RESINE
TERMOINDURENTI
Più COMUNI**

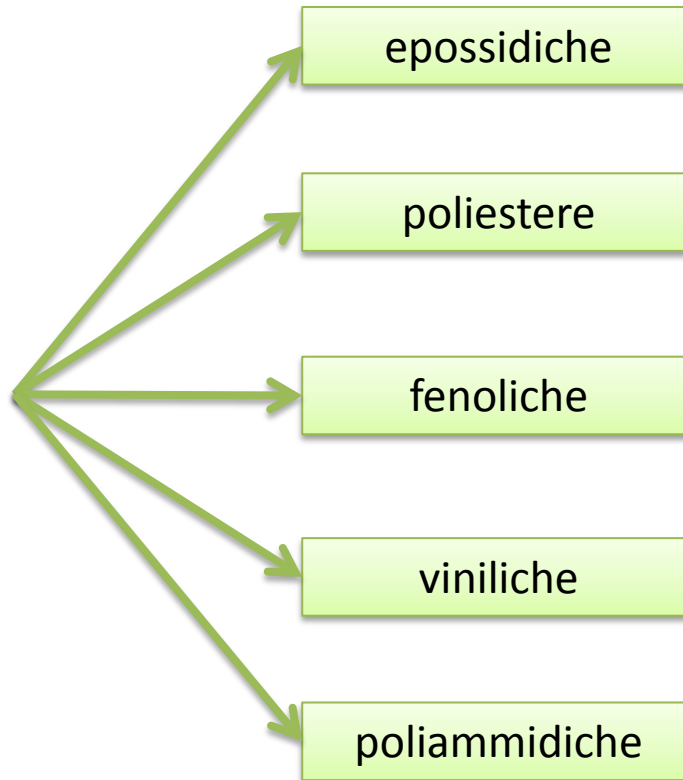
epossidiche

poliestere

fenoliche

viniliche

poliammidiche



RESINE EPOSSIDICHE

- tra le più usate perché hanno proprietà meccaniche migliori di altre
- ottima adesione delle fibre
- buona resistenza chimica
- basso ritiro
- stabilità termica
- utilizzabili fino a 250°C
- utilizzate in applicazioni aeronautiche e aereospaziali



RESINE POLIESTERE

- basso costo
- tempi di polimerizzazione bassi
- buone proprietà meccaniche
- applicazioni marine, ferroviarie, chimiche, elettriche
- spesso in unione alle fibre di vetro



RESINE FENOLICHE

- applicazioni a $T > 250^{\circ}\text{C}$, mantengono le proprietà delle resine epossidiche alle alte T
- occorre elevata pressione per la polimerizzazione (autoclave)
- applicazione nei mezzi di trasporto dove è richiesta resistenza al fuoco



RESINE VINILICHE

- legame molto forte matriche-fibra



RESINE POLIAMMIDICHE

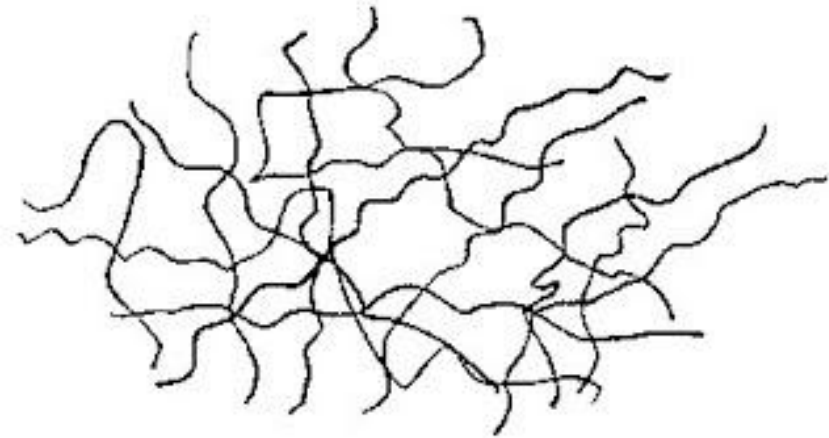
- mantengono elevate proprietà meccaniche alle alte T



Classificazione: tipo di matrice

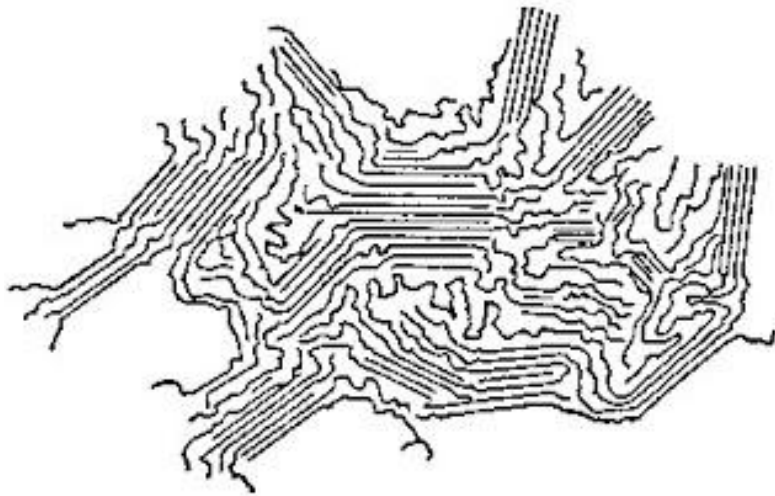
Resine TERMOPLASTICHE

Si definiscono termoplastiche le resine a struttura molecolare lineare che durante lo stampaggio a caldo non subiscono alcuna modificazione chimica. Il calore provoca la fusione e la solidificazione avviene durante il raffreddamento. È possibile ripetere il ciclo per un numero limitato di volte poiché troppi riscaldamenti possono degradare le resine. Ci sono due classi di polimeri: quelli totalmente amorfi ed i semicristallini. I polimeri amorfi sono composti da catene disposte casualmente e si caratterizzano per una transizione (temperature di transizione vetrose) durante la quale passano dallo stato fragile, tipico dei vetri a quello simile alle gomme. In tali polimeri la fusione del materiale non avviene ad una determinata temperatura; pertanto non esiste un preciso punto di fusione ma invece il materiale passa gradatamente dallo stato solido, attraverso quello viscoso, allo stato fluido. È durante questo intervallo che i materiali vengono lavorati e trasformati: il ritiro di stampaggio è contenuto fra lo 0,3% e 0,6%. I polimeri semicristallini sotto la temperatura di fusione T_m , sono formati da regioni amorfe e cristalline. L'intervallo utile per la lavorazione è limitato a pochi gradi centigradi poiché al di sotto del punto di fusione il materiale è ancora solido mentre non è prudente superare di molto la temperatura di fusione dato che si possono innescare fenomeni di degradazione termica. Questi polimeri presentano ritiri molto più alti di quelli relativi ai materiali amorfi e si aggirano intorno all' 1% ed il 5%. Inoltre, rispetto ai termoplastici amorfi, sono materiali più resistenti all'attacco chimico(sostanze acide, basiche, solventi ecc...).



Polímero de estructura amorfa

Polimero amorfo

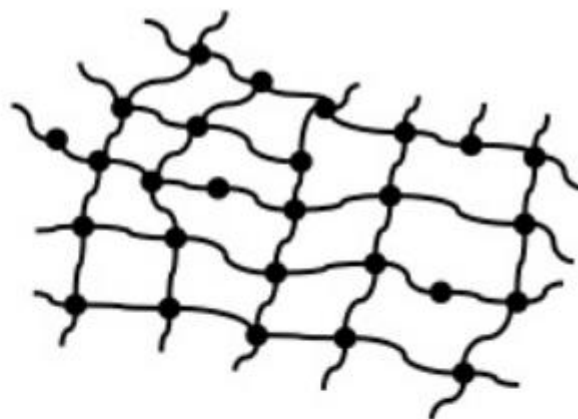


Polimero de estructura cristalina

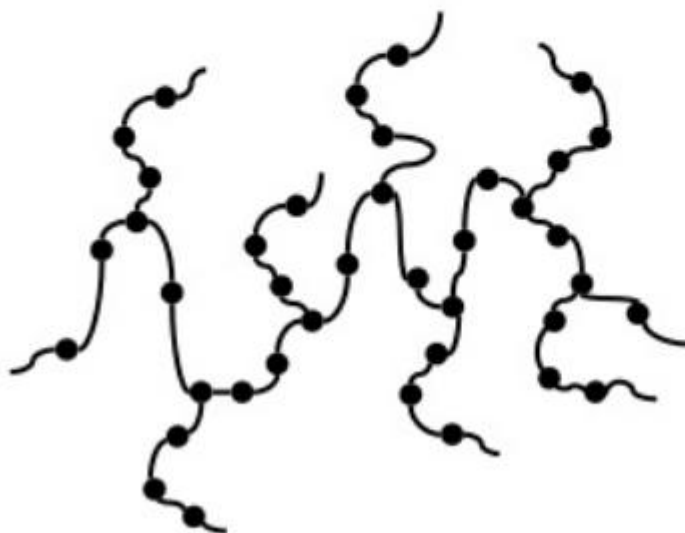
Polimero semicristallino



Polimero **lineare**

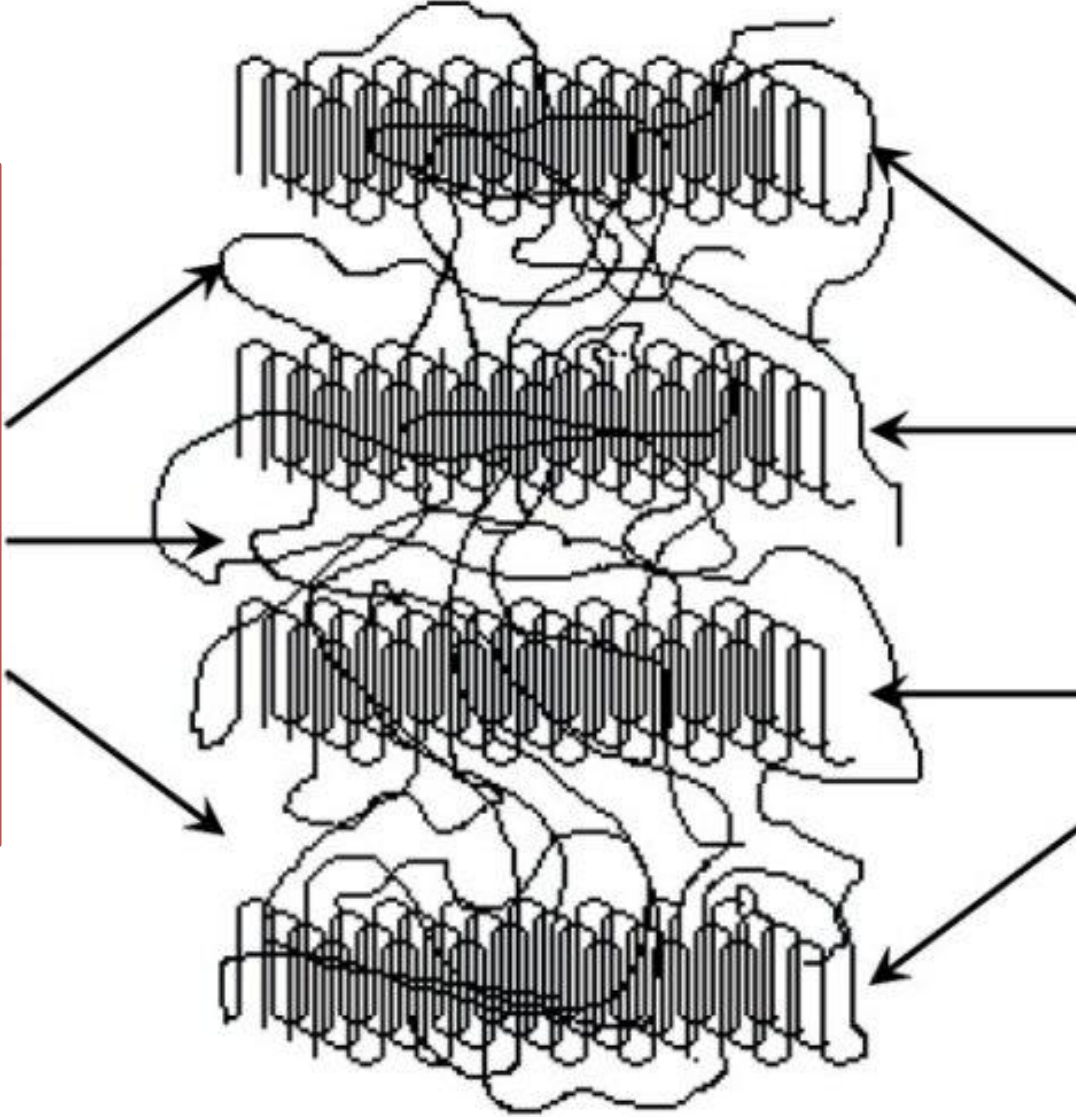


Polimero **reticolato**

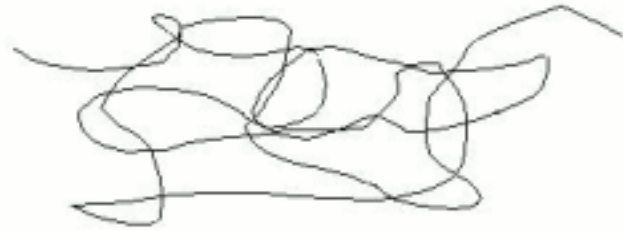


Polimero **ramificato**

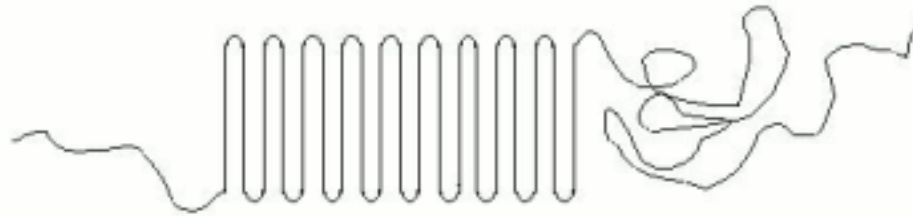
Regioni amorphe



Regioni semicristalline



Amorphous



Semi-Crystalline

Le regioni amorfe si compattano come i polimeri amorfi, mentre le regioni cristalline, sono aggregati di cristallite, catene piegate, usualmente sotto forma di sferuliti. Le dimensioni degli sferuliti influenzano le proprietà meccaniche e di diffusione dei polimeri. La percentuale di cristallinità, il numero e dimensione degli sferuliti ed il gradiente di cristallizzazione dipendono molto dalla temperatura di cristallizzazione e dalla orientazione macromolecolare durante la cristallizzazione. La Figura 1.6 mostra il volume specifico al variare della temperatura per polimeri amorfi e semicristallini.

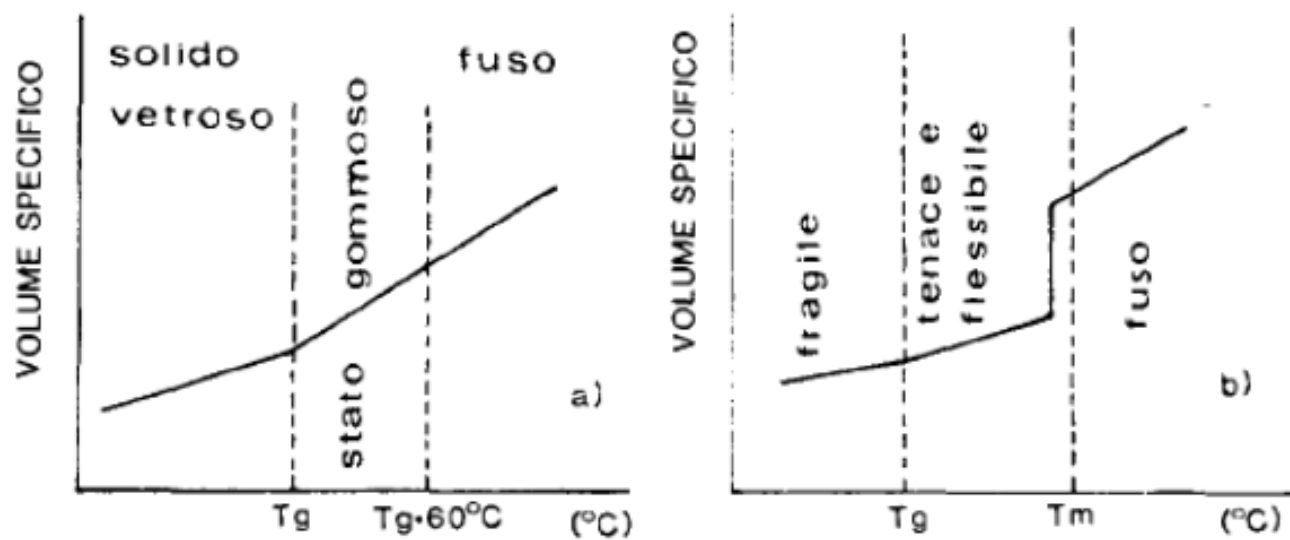
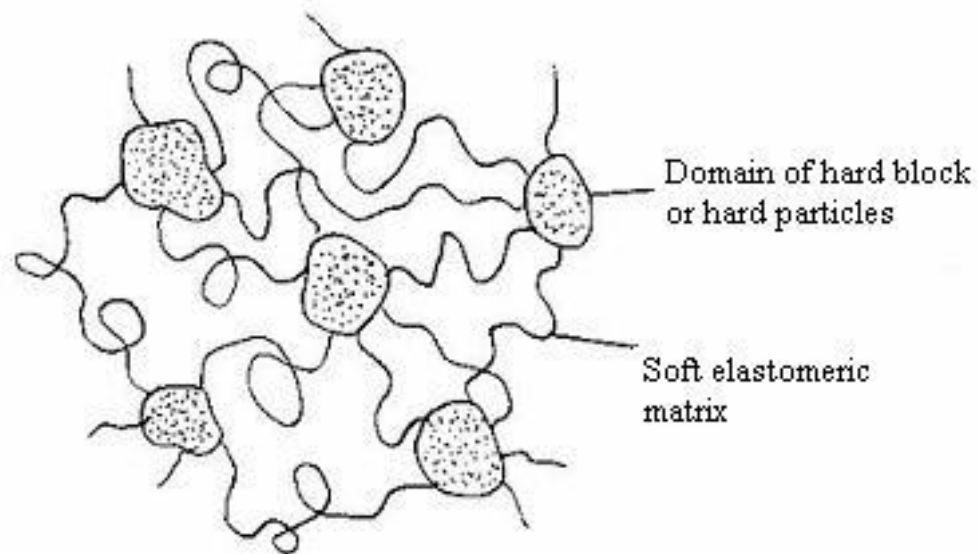


Figura 1.6 - Variazione del volume specifico in f(T) per amorfi e semicristallini

Comportamento reologico delle resine termoplastiche

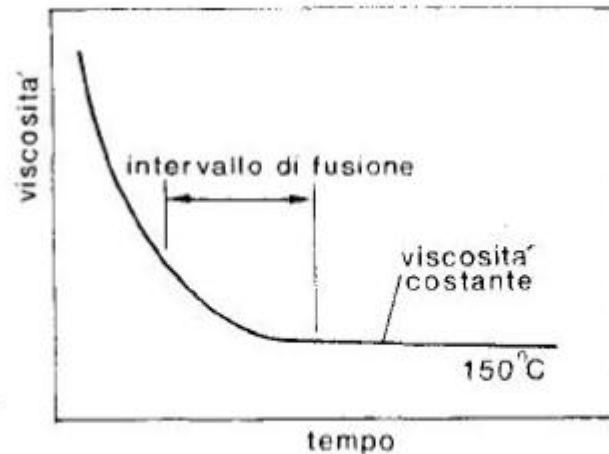


Figura 1.7 - Viscosità di un polimero termoplastico al variare del tempo

Importanti sono infine le proprietà reologiche dei polimeri termoplastici; la viscosità di un polimero termoplastico allo stato fuso è una caratteristica legata al suo peso molecolare; nella Figura 1.7 è riportata la variazione della viscosità con il tempo.

Nella stessa famiglia dei termoplastici, materiali a basso peso molecolare presentano bassa viscosità mentre quelli con alto peso molecolare mostrano un'alta viscosità. Inoltre la viscosità diminuisce all'aumentare della temperatura ma anche all'aumentare della velocità di scorrimento e dello sforzo di taglio (Figura 1.8).



termoindurente



termoplastico

| Proprietà | Poliestere | Epossidica | Fenolica | Siliconica | Termoplastica (Peek 45 G) |
|--|-------------|-------------|-------------|-------------|------------------------------|
| Densità (kg/m ³) | 1100 + 1460 | 1110 + 1400 | 1300 + 1320 | 1700 + 1900 | 1300 |
| Modulo a trazione E (GPa) | 2 + 4,5 | 2,3 + 3,9 | 3,1 | – | 3,8 |
| Resist. a trazione (MPa) | 42 + 68 | 28 + 91 | 41 + 62 | 20 + 48 | 100 |
| Resist. a compressione (MPa) | 90 + 186 | 100 + 175 | 86 + 103 | 62 + 124 | – |
| Resist. a flessione (MPa) | 58 + 117 | 106 + 129 | 75 + 117 | 67 | – |
| Calore specifico (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹) | | | | | |
| Conducib. termica (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹) | 0,21 | 0,21 | – | – | – |
| Coefficiente di dilatazione termica (10 ⁻⁶ °C ⁻¹) | 80 + 100 | 50 + 70 | 60 + 80 | 300 | – |
| Temperatura di transizione vetrosa (°C) | 100 | 120 | – | – | 143 |
| Coefficiente di Poisson | 0,34 | 0,20 + 0,34 | – | – | – |
| Resilienza J (prove Izod) | 0,27 + 0,54 | 0,2 + 2,3 | 0,3 + 0,5 | 5,5 | – |
| Durezza (Rockwell M) | 115 | 100 + 112 | 120 | 45 | – |
| Assorbimento H ₂ O (%) | 0,15 + 0,60 | 0,08 + 0,15 | 0,3 + 1,0 | 0,2 + 0,5 | – |

Tabella 1.2 - Caratteristiche di alcune matrici polimeriche a temperatura ambiente

Classificazione: tipo di matrice **METALLICA**



Classificazione: tipo di matrice

METALLICA

Questo tipo è poco utilizzato per motivi insiti nell'introduzione delle fibre nella matrice, che naturalmente, deve essere allo stato liquido, ma anche ad una temperatura tale da non danneggiare le fibre stesse. Altro problema è ottenere un'uniforme distribuzione delle fibre nella matrice, oltre ad un perfetto allineamento delle stesse. La bagnabilità è uno dei requisiti più difficili da rispettare; spesso la matrice metallica non bagna completamente le fibre per cui si ha l'impossibilità a formare un composito. Per migliorare la bagnabilità, ad esempio di fibre di carbonio, bisogna che i materiali metallici che formano la matrice, come il titanio, lo zirconio, il niobio, il tungsteno, ecc., concorrono alla formazione di carburi; tali carburi, in strato sottile, migliorano la bagnabilità ma possono danneggiare la superficie della fibra in modo notevole. Il pericolo principale, comunque, risiede nella temperatura con cui la matrice arriva a bagnare la fibra; temperatura che in questo caso è elevata, creando così la possibilità di formare depositi intermedi che possano danneggiare le fibre stesse. Nonostante queste difficoltà, l'industria aerospaziale ha interesse nello sviluppo di compositi a matrice metallica perché questi legano bene le caratteristiche di basso spessore specifico ed alta resistenza (matrici di alluminio, magnesio e titanio).



Proprio in alcune parti della fusoliera dello Space Shuttle si trovano applicazioni dei compositi a matrice metallica: nella fattispecie uno di particolare interesse storico risulta il composito Al-B. Questo materiale, uno dei primi MMC in assoluto, è costituito da una matrice in lega d'alluminio rinforzata con fibre di boro. In particolare, le fibre sono ottenute depositando vapori di boro su un filo di tungsteno; poi per pressatura a caldo si uniscono le fibre tra dei fogli di alluminio.

Classificazione: tipo di matrice CERAMICA

Lo scopo principale del rinforzo in questi materiali è quello di aumentare la tenacità e resistenza tipicamente ridotte della matrice ceramica. Come nei MMC, il rinforzo può essere sotto forma di fibre continue, fibre discontinue o particelle. In tutti i casi l'incremento di resistenza avviene grazie all'effetto di interruzione della propagazione delle cricche, arrivando a raddoppiare la resistenza del materiale a trazione.

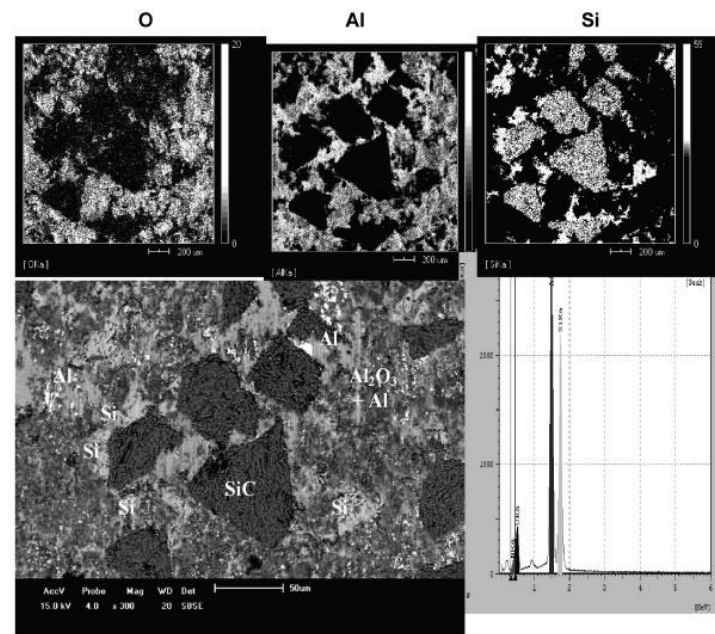


Figura 8: Mapeamento microestrutural por EDX dos elementos químicos do composto C10.
[Figure 8: Microstructural mapping by EDX of the chemical elements of C10 composite.]

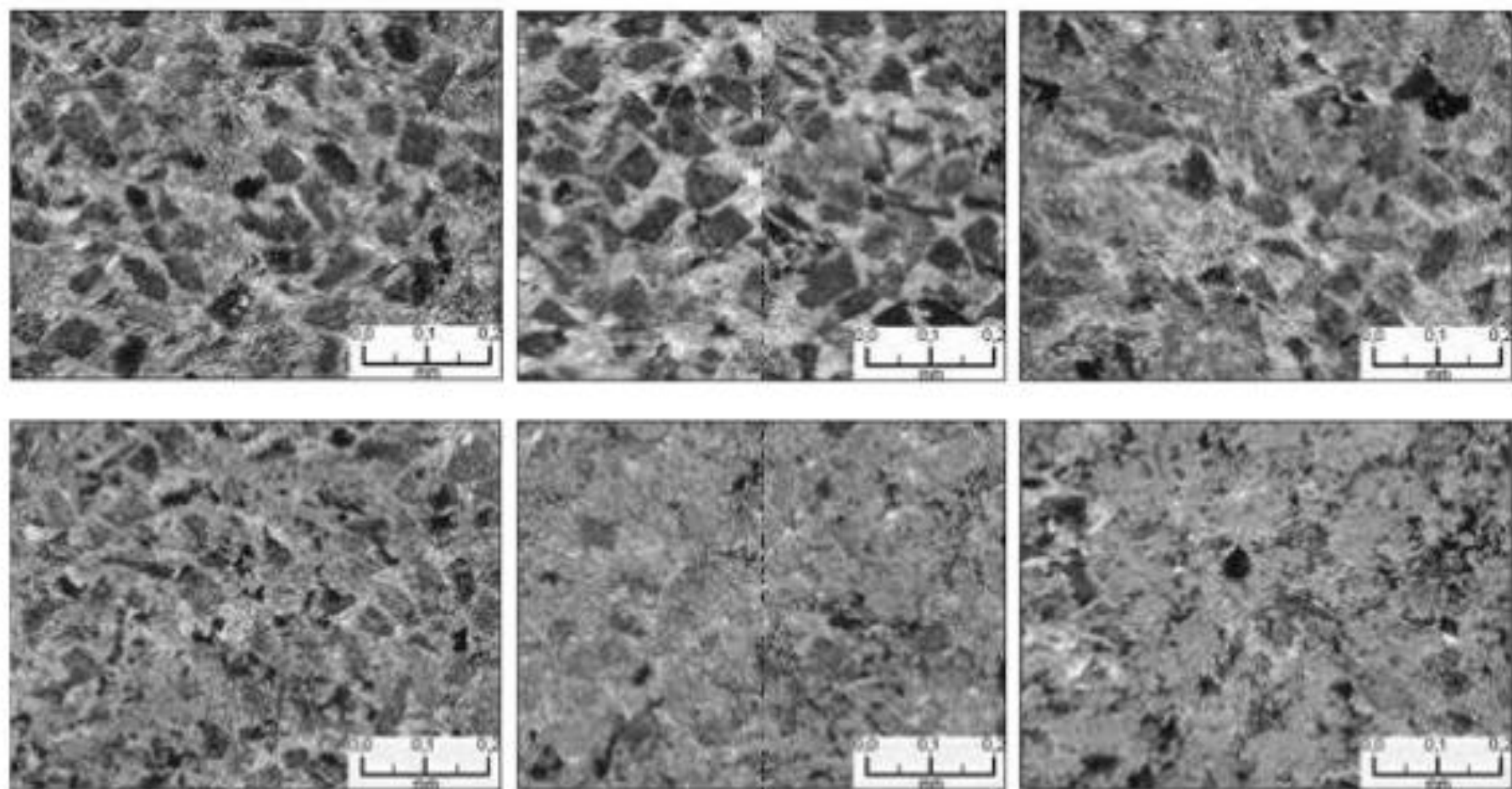


Figura 7: Microscopia ótica dos compósitos SiC – Al sem e com diferentes concentrações de caulim.
[Figure 7: Optical microscopy of SiC-Al composites without and with different concentrations of kaolin.]

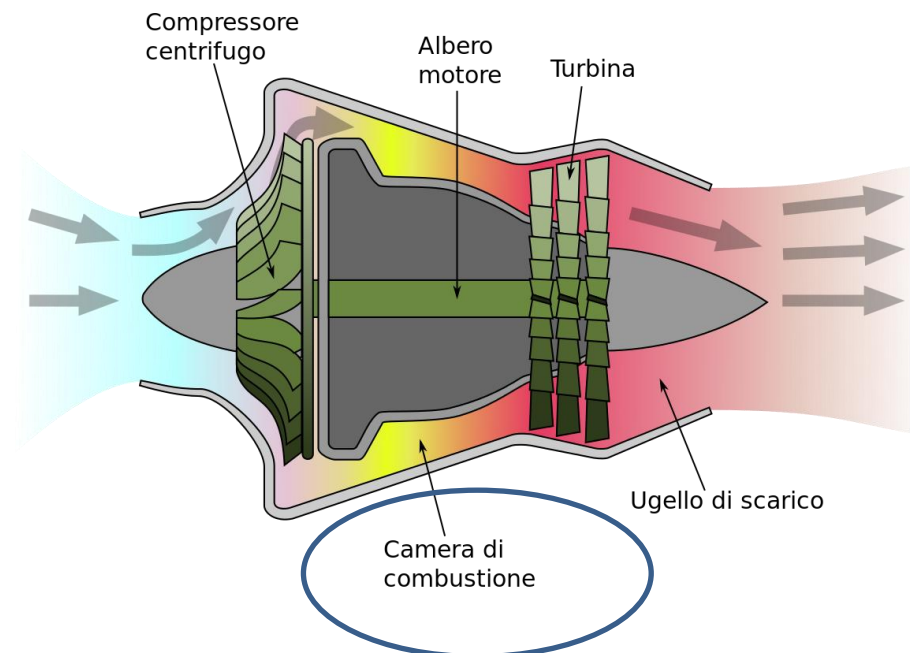
Classificazione: tipo di matrice

CERAMICA

Nel caso dei compositi a matrice polimerica si cerca di massimizzare i rapporti tra resistenza meccanica e densità e tra modulo elastico e densità. Nei compositi a matrice metallica si cerca di incrementare il modulo elastico. *Nel caso dei compositi ceramici si vuol ottenere essenzialmente un aumento della tenacità della matrice.* I ceramici, infatti, hanno delle caratteristiche molto interessanti. I legami covalenti o ionici parzialmente covalenti che legano assieme gli atomi di questi materiali sono estremamente forti, di conseguenza essi generalmente hanno un'alta refrattarietà ed inerzia chimica, un alto modulo elastico ed una notevole durezza, proprietà queste ultime che mantengono anche a temperature superiori ai 1000°C. Però gli stessi legami chimici che impartiscono le interessanti caratteristiche che abbiamo visto sono responsabili anche della loro fragilità. Essi non permettono ai piani cristallini di scorrere gli uni rispetto agli altri e dunque non permettono al materiale di deformarsi plasticamente. Di conseguenza i ceramici si rompono con un meccanismo tipico dei materiali fragili: improvvisamente, senza alcun preavviso, con la frattura che si

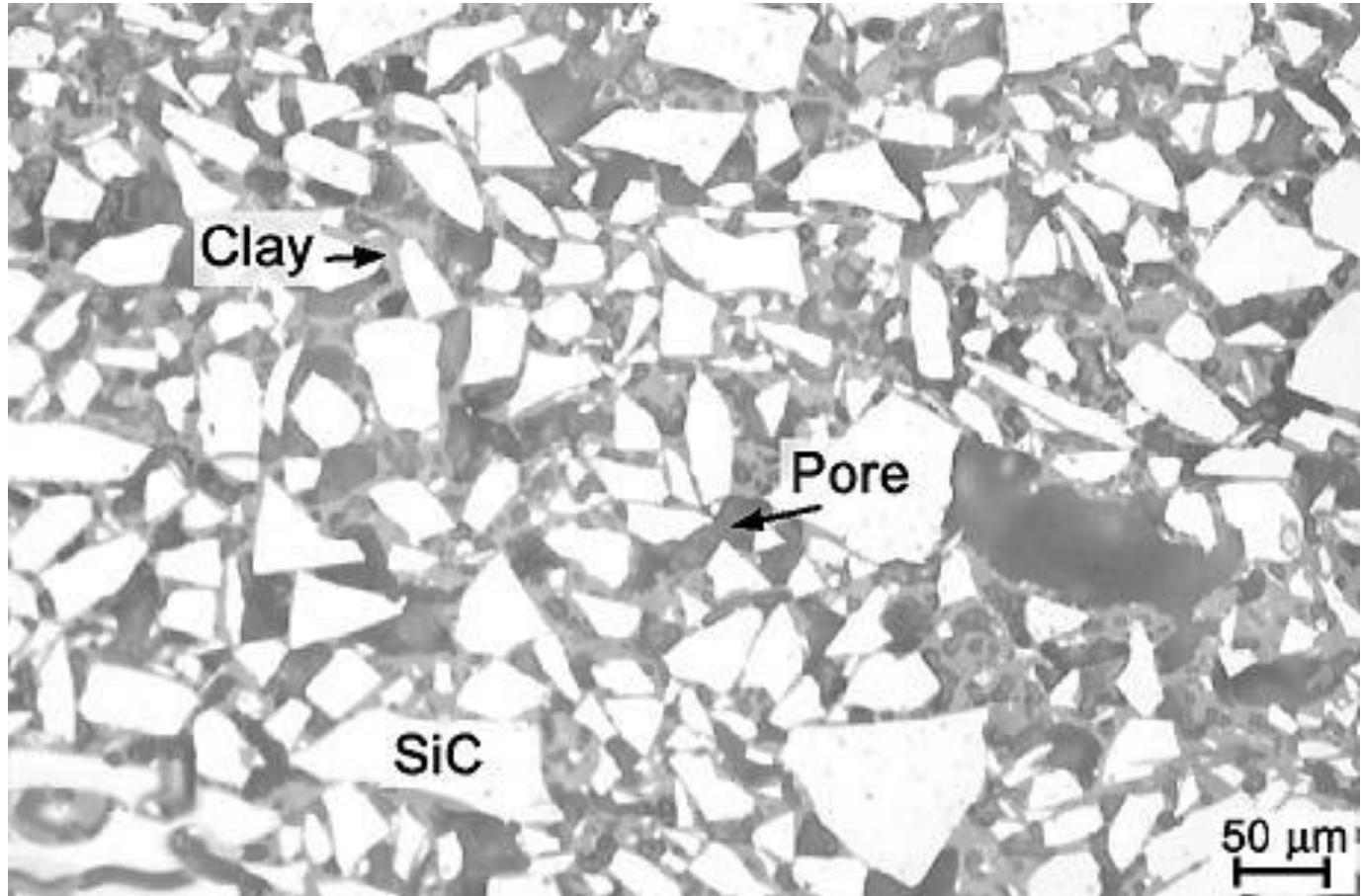
propaga ad alta velocità nel manufatto. Si desume quindi che per rendere un materiale ceramico affidabile bisogna o incrementare il valore del suo fattore critico di intensificazione dello sforzo o diminuire le dimensioni dei difetti in esso contenuti. Nella prima ipotesi bisognerà modificare la microstruttura mediante l'inserimento di nuove fasi nella matrice, nella seconda bisognerà ottimizzare il “processing” del composito e curare la finitura superficiale. Si ammetta di aver scelto una matrice ed una “fase” capace di tenacizzarla: mettere assieme questi componenti e costruire un composito con difetti di piccole dimensioni non è semplice. Per i compositi a matrice polimerica e metallica il problema non è banale ma affrontabile: la matrice può essere portata allo stato liquido o fluido, di conseguenza durante la reticolazione o il raffreddamento la quantità e le dimensioni dei vuoti sono piuttosto piccole. Differente è il caso dei compositi ceramici: la matrice non può essere portata allo stato fuso perché o si decompone prima o le sue temperature di fusione sono tanto alte da farla reagire con la fase tenacizzante (tralasciamo il discorso delle difficoltà tecnologiche legate alla manipolazioni di fasi liquide con temperature superiori ai 2000°C). L'unico mezzo per densificare la matrice è dunque il processo di sinterizzazione. Questo implica che si deve partire da delle polveri alle quali va aggiunta una seconda fase che molto spesso è costituita da particelle con dimensioni di diversi micron e con forme allungate. Il tutto poi deve essere portato ad alta temperatura per far partire il processo di sinterizzazione e la presenza di particelle di una fase estranea con dimensioni discrete circondata da particelle più piccole (matrice) che devono densificare dà luogo ad un sistema difficilmente sinterizzabile. Le particelle più grandi si oppongono al processo funzionando da “rigid inclusion”, di conseguenza il materiale che si ottiene dopo “cottura” è a bassa densità e con una grande quantità di pori, quindi possiede scadenti proprietà meccaniche.

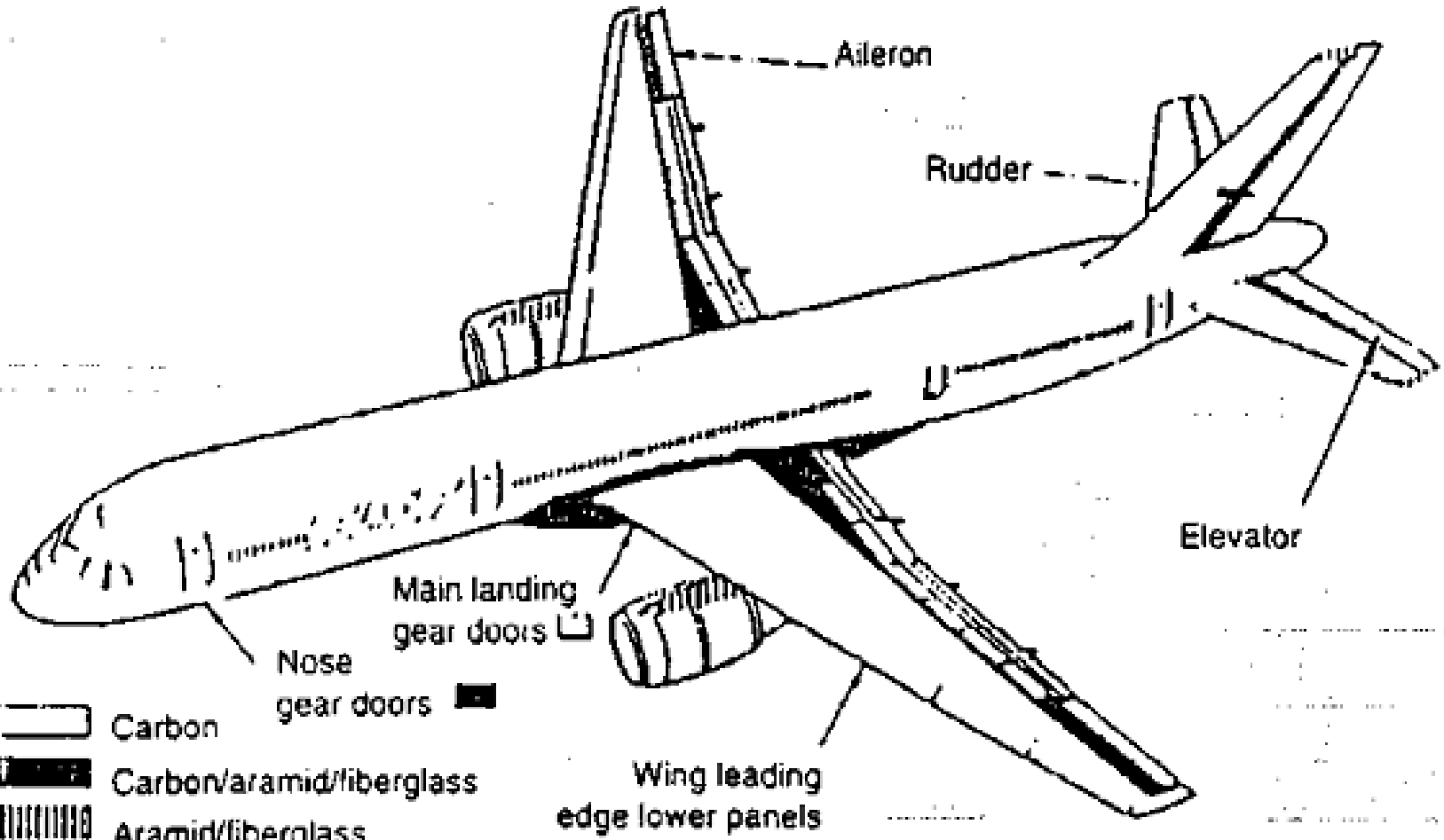
Concludendo, infine, si può asserire che, dal punto di vista scientifico, i compositi ceramici hanno stimolato gli studi della meccanica della frattura dei materiali fragili che ha fatto negli ultimi anni degli enormi passi in avanti; dal punto di vista tecnologico, invece, utilissime sono le applicazioni nel settore aerospaziale: dischi di freni, barriere termiche, camere di combustione di motori a razzo o parti di post-bruciatori. Non molto ben conosciute sono le applicazioni in campo militare, soprattutto nel settore delle corazze compositi e dei proiettili perforanti. Pur non avendo la stessa diffusione dei compositi a matrice polimerica, essi si sono ritagliati alcune importanti nicchie di mercato. È ragionevole pensare ad una loro ulteriore diffusione nel settore dei dispositivi di conversione dell'energia.



Classificazione: tipo di matrice

CERAMICA





-  Carbon
-  Carbon/aramid/fiberglass
-  Aramid/fiberglass

... con particelle di rinforzo

In questi compositi le particelle hanno in genere lo scopo di migliorare la resistenza all'usura, la durezza superficiale, la lavorabilità, la resistenza alle elevate temperature e le dilatazioni termiche.

Tuttavia la presenza di particelle, anche se molto resistenti, non contribuisce, in genere, a migliorare significativamente le caratteristiche meccaniche del composito, a differenza di quanto si verifica, invece, nei compositi fibrosi in cui la quasi totalità del carico esterno è sopportato dalle fibre. Infatti, la presenza di particelle dure in una matrice fragile può generare fenomeni locali di concentrazione delle tensioni, compromettendo la resistenza meccanica del composito. Si è anche rilevato che, nel caso di frattura, la presenza di particelle dure e resistenti non ostacola efficacemente la propagazione di eventuali cricche e difetti.

Esempi di compositi con particelle sono quelli ottenuti combinando diversi materiali metallici: per esempio particelle di piombo sono usate in una matrice di leghe di rame o acciaio al fine di migliorarne la lavorabilità o la lubrificazione in leghe antifrizione.

Nei materiali ottenuti rinforzando una matrice polimerica o con sostanze inorganiche, per esempio silice, o con metalli, per esempio argento, si sono registrati significativi miglioramenti nella resistenza termica e all'abrasione.

Compositi rinforzati con PARTICELLE

Con particelle di grandi dimensioni

Interazione meccanica matrice-rinforzo.
Di solito: matrice morbida + particelle dure di rinforzo.

La matrice trasferisce parte dello sforzo alle particelle di rinforzo che limitano i movimenti della matrice



Matrice di cemento
+
Ghiaia o sabbia

Con dispersione di particelle (10-100 nm)

Interazione matrice-rinforzo trattata su scala atomica o molecolare. Indurimento simile all'indurimento per precipitazione.

La matrice sopporta la maggior parte del carico. Le particelle fini disperse limitano il movimento delle dislocazioni, quindi la deformazione plastica

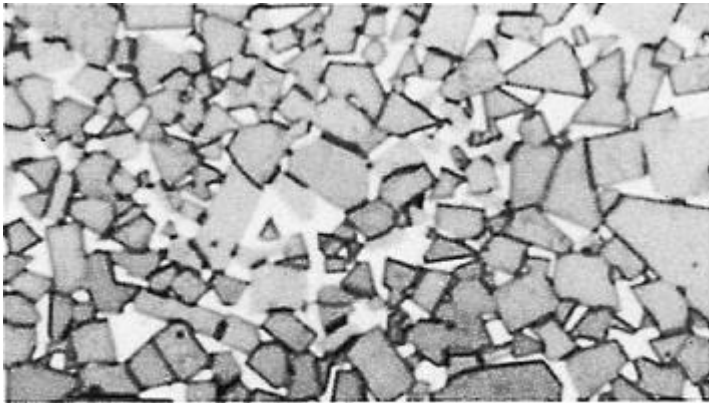
MMC (Metal matrix
composites)

60% lega metallica
40% dispersione
ossidi ceramici



Compositi rinforzati con PARTICELLE I CERMET

- Compositi ceramico-metallici: carburo ceramico refrattario (WC o TiC + matrice metallica di Co o Ni)
- per la realizzazione di utensili da taglio per acciai molto duri
- le particelle di WC forniscono un'ottima superficie di taglio (ma non sopporterebbero gli stress perché fragili), la tenacità è assicurata dalla matrice metallica duttile
- le particelle di rinforzo possono anche superare il 90% in volume



0 10 μm

Microstruttura WC-Co



Compositi rinforzati con PARTICELLE

II NEROFUMO

- Composito: gomma vulcanizzata (elastomero) + particelle di carbonio prodotte per combustione del gas naturale o del petrolio in assenza di aria
- migliore resistenza all'abrasione, al taglio, alla trazione e tenacità
- i pneumatici delle auto sono prodotti con 15-30% di nerofumo
- l'effettivo rinforzo si ha con particelle molto piccole (20-50 nm)

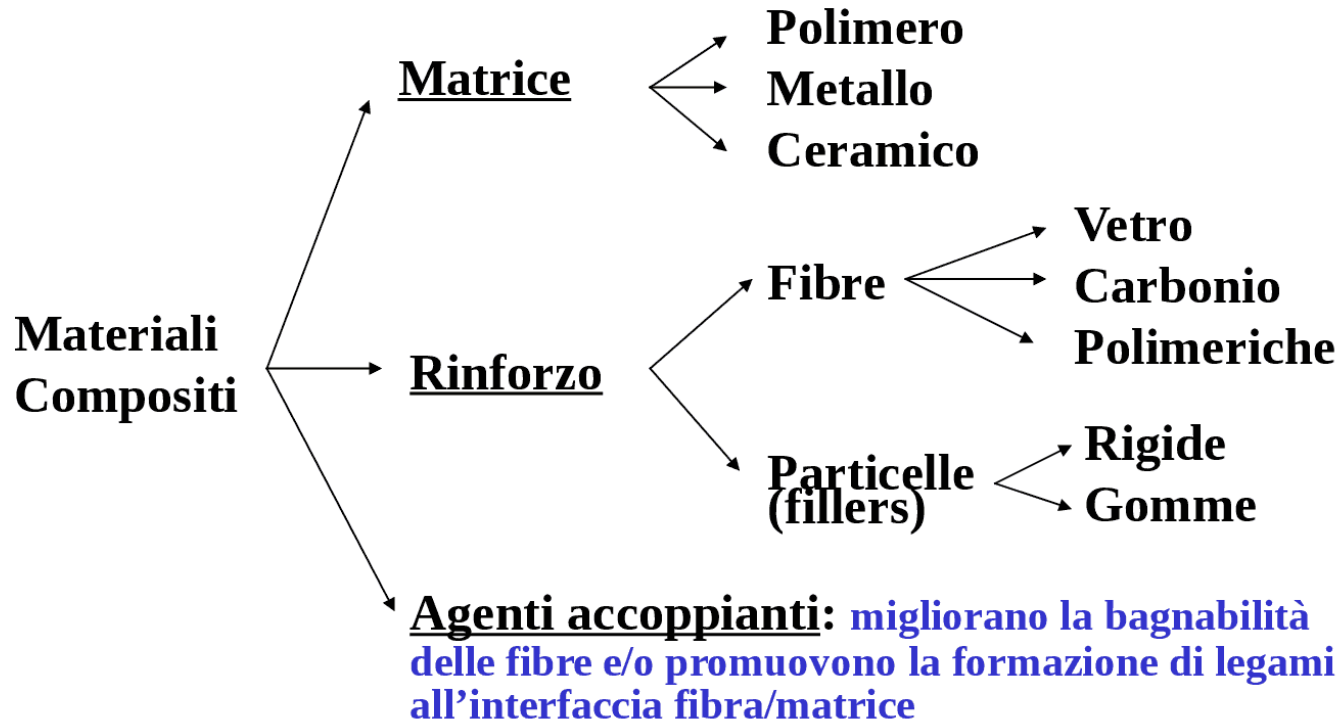


... con fibre di rinforzo

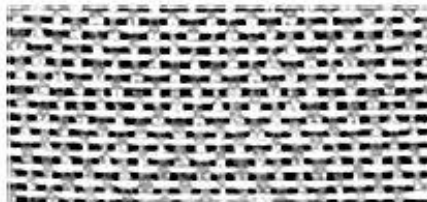
Questi compositi sono di gran lunga quelli più utilizzati nelle costruzioni meccaniche. Il loro successo è strettamente legato all'elevato rapporto resistenza/peso (resistenza specifica) ed all'elevato rapporto rigidezza/peso (modulo specifico) unito alla possibilità di variare a piacimento il grado di anisotropia intervenendo, per esempio, sulla concentrazione e sull'orientamento del rinforzo. L'elevata resistenza specifica dei compositi fibrosi è essenzialmente legata alla elevata resistenza delle fibre ed al basso peso di fibre e matrice. Sperimentalmente si osserva che la resistenza di un dato materiale aumenta significativamente se esso viene prodotto in fibre sottili. Inoltre, la resistenza della fibra aumenta al diminuire delle dimensioni della sezione trasversale.

A titolo di esempio sono riportate nella Tabella 1.1 le principali caratteristiche meccaniche, modulo di Young (rigidezza) e resistenza a trazione, delle principali fibre utilizzate nei compositi insieme a quelle di alcuni materiali convenzionali al fine di poter effettuare un rapido confronto.

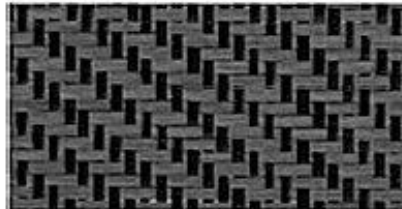
Materiali Compositi



FIBRE DI VETRO

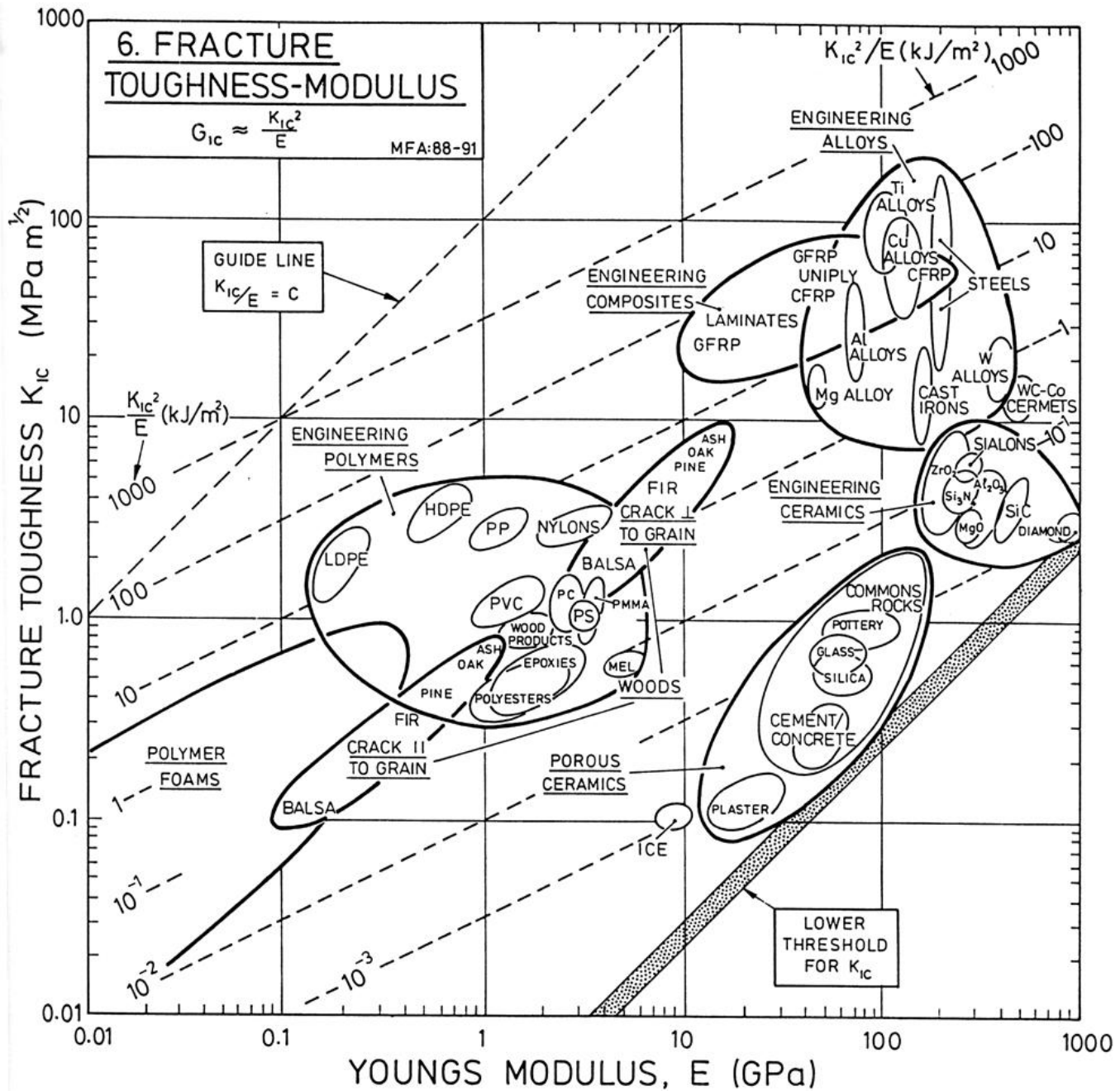


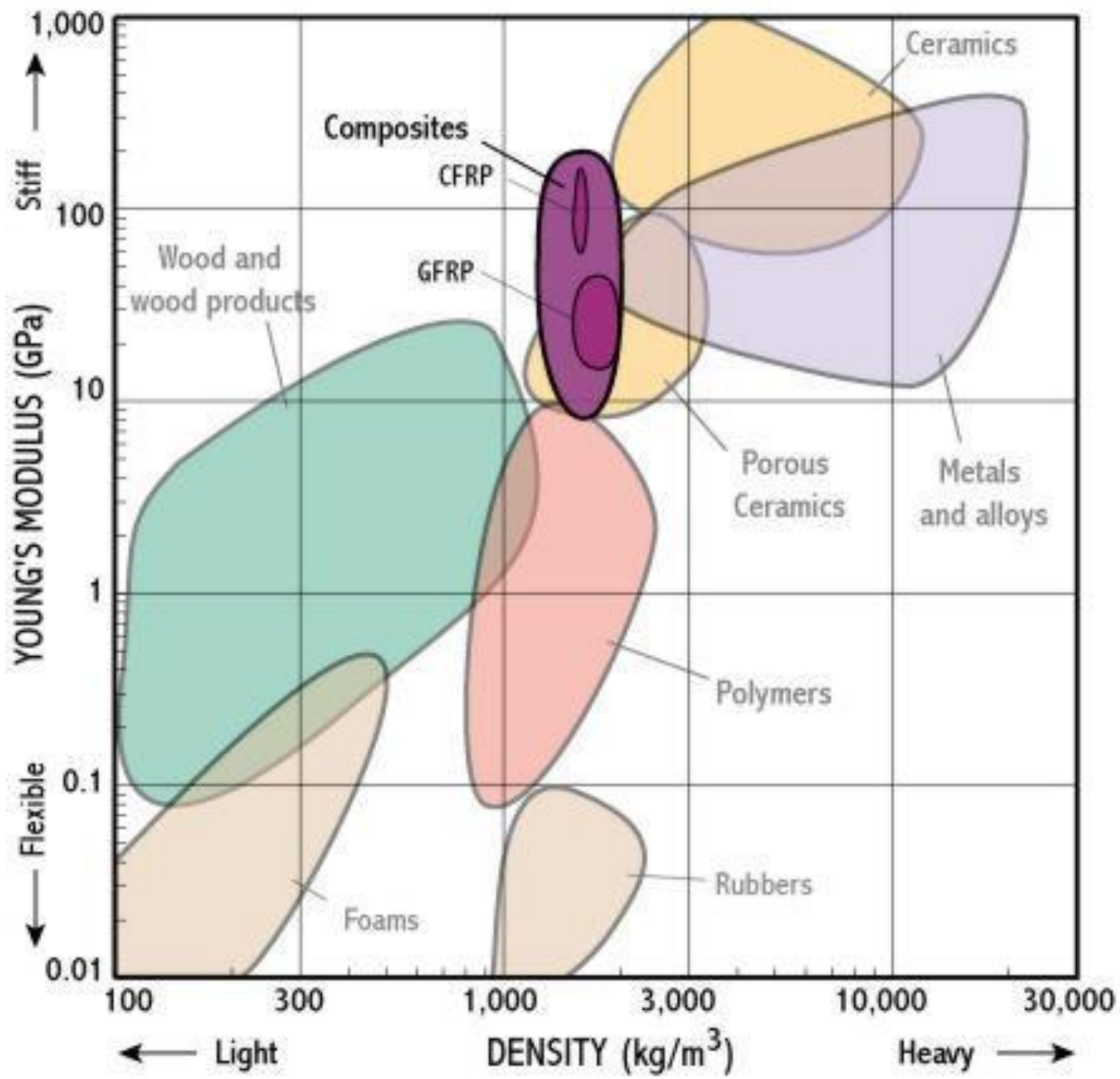
FIBRE DI CARBONIO



FIBRE DI ARAMIDE







| Material | Tensile modulus (E) (GN/m ²) | Tensile strength (σ_u) (GN/m ²) | Density (ρ) (g/cm ³) | Specific modulus (E/ρ) | Specific strength (σ_u/ρ) |
|----------------------------------|--|--|---|----------------------------------|--|
| Fibers | | | | | |
| E-Glass | 72.4 | 3.5 ^a | 2.54 | 28.5 | 1.38 |
| S-Glass | 85.5 | 4.6 ^a | 2.48 | 34.5 | 1.85 |
| Graphite (high modulus) | 390.0 | 2.1 | 1.90 | 205.0 | 1.1 |
| Graphite (high tensile strength) | 240.0 | 2.5 | 1.90 | 126.0 | 1.3 |
| Boron | 385.0 | 2.8 | 2.63 | 146.0 | 1.1 |
| Silica | 72.4 | 5.8 | 2.19 | 33.0 | 2.65 |
| Tungsten | 414.0 | 4.2 | 19.30 | 21.0 | 0.22 |
| Beryllium | 240.0 | 1.3 | 1.83 | 131.0 | 0.71 |
| Kevlar-49 (aramid polymer) | 130.0 | 2.8 | 1.50 | 87.0 | 1.87 |
| Conventional materials | | | | | |
| Steel | 210.0 | 0.34–2.1 | 7.8 | 26.9 | 0.043–0.27 |
| Aluminum alloys | 70.0 | 0.14–0.62 | 2.7 | 25.9 | 0.052–0.23 |
| Glass | 70.0 | 0.7–2.1 | 2.5 | 28.0 | 0.28–0.84 |
| Tungsten | 350.0 | 1.1–4.1 | 19.30 | 18.1 | 0.057–0.21 |
| Beryllium | 300.0 | 0.7 | 1.83 | 164.0 | 0.38 |

Tabella 1.1 - Caratteristiche meccaniche di compositi fibrosi e materiali convenzionali.

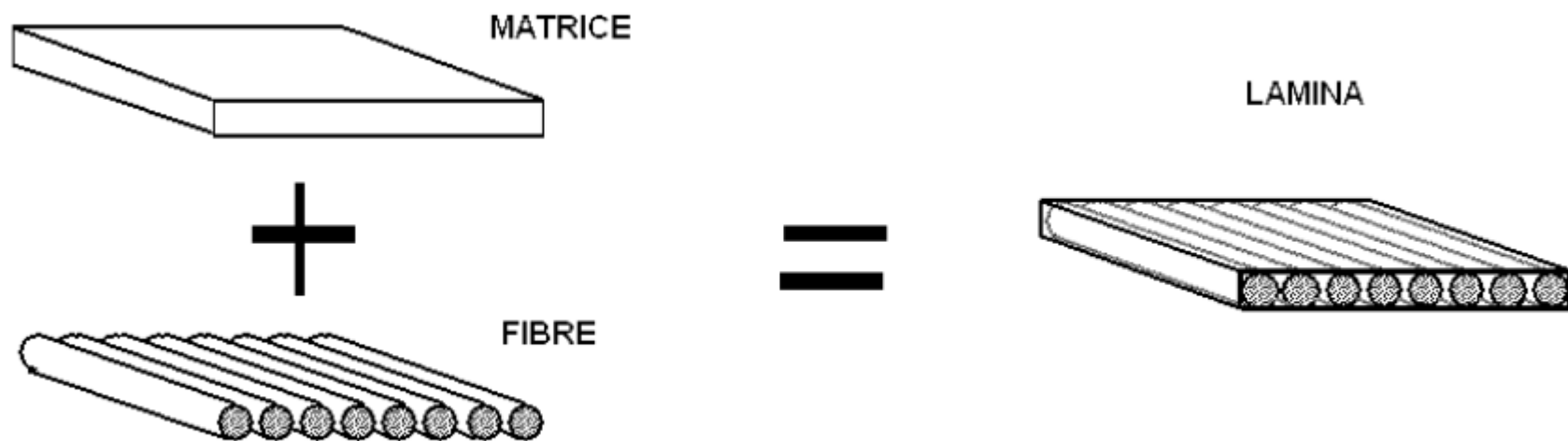


Figura 2.16 - Schema semplificato di una lamina

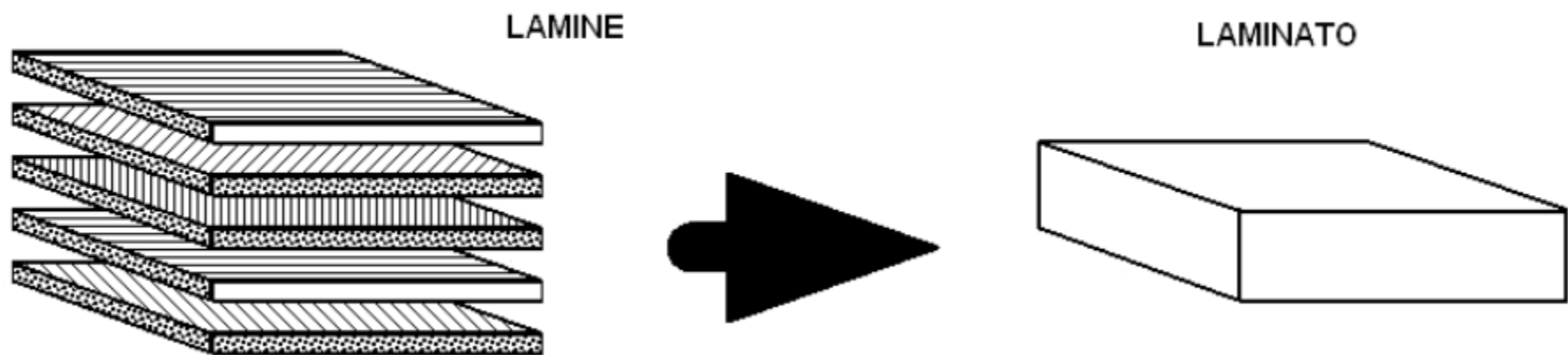


Figura 17.2 - Schema semplificato di un laminato

Le fibre di rinforzo

Le fibre, naturali ed artificiali, oltre ad essere prodotte per scopi essenzialmente tessili, sono anche prodotte per scopi di tipo ingegneristico come le fibre vetrose, metalliche, sintetiche (es. nylon). Alle fibre è affidato, nella maggior parte dei casi, il compito di fornire al composito le proprietà desiderate di resistenza e rigidità. Le fibre, invece di essere trattate singolarmente, vengono concentrate in un fascio (*roving*) che ne contiene varie centinaia arrotolate con o senza twist su un cilindro; oppure vengono attorcigliate a trefolo ed avvolte (*yarn*). Successivamente possono essere intessute o usate per altri procedimenti di lavorazione.

Le fibre sono utilizzate anche sotto forma di *wiskers* che sono singoli filamenti metallici con diametro di un micron e lunghezza di circa un millimetro, ognuno dei quali è realizzato da un singolo cristallo metallico; essi sono usati nei materiali compositi più leggeri ad alta resistenza e alta temperatura per scopi aerospaziali.



Yarn: gomitolo di fibre di C



Roving di fibre di C ritorte



Roving di fibre di C

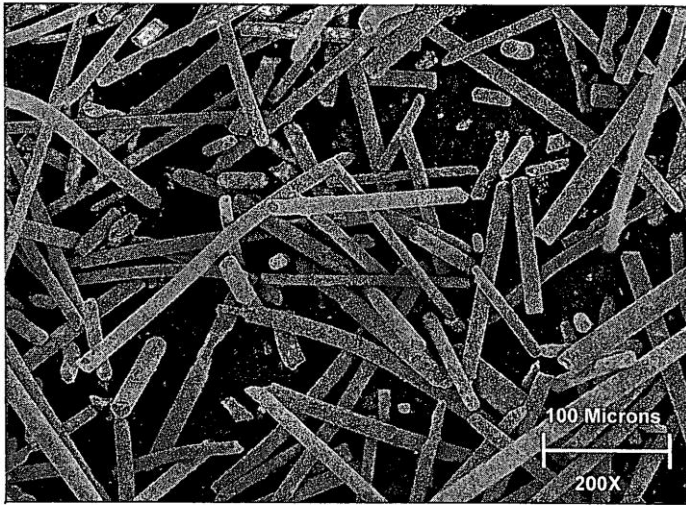


Fig. 6

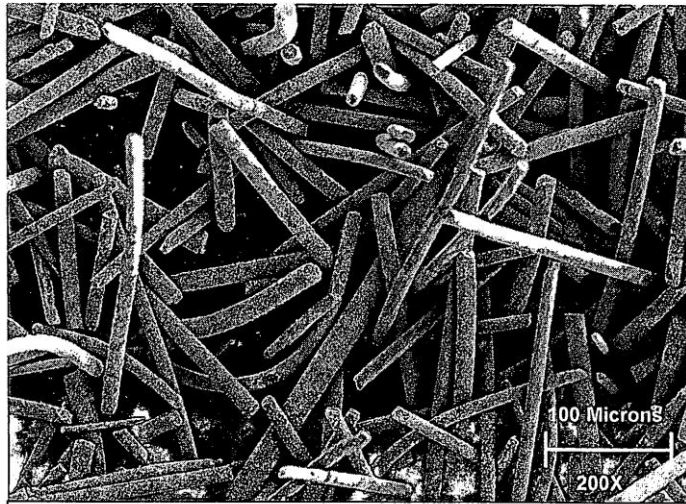


Fig. 7

Whiskers carbon fibers

Le fibre di rinforzo

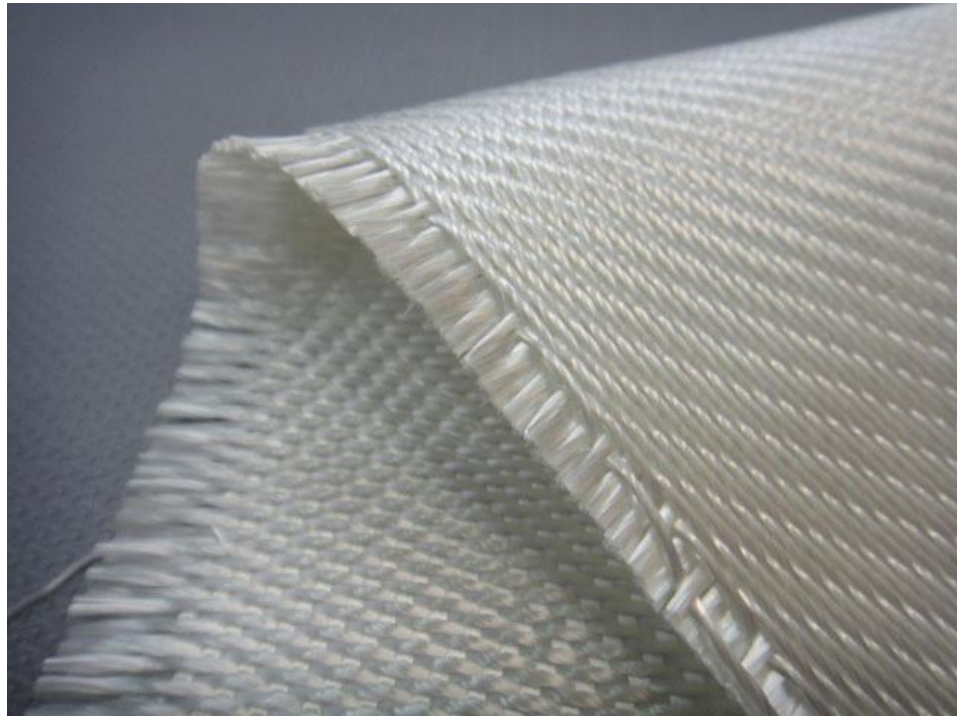
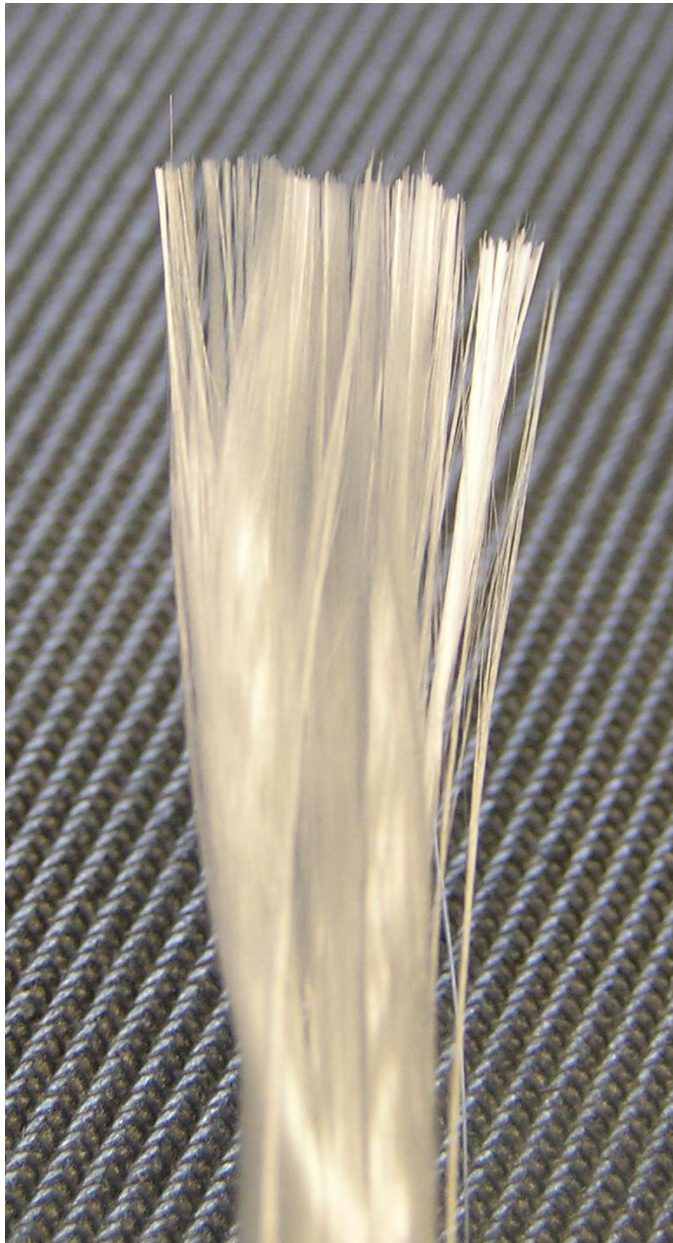
Fibre di vetro (vetroresine)

Il vetro è uno dei materiali rinforzanti più noti; è prodotto nella forma standard come vetro E. Una fibra più resistente è il vetro S, circa un terzo più forte del vetro E. Un altro tipo di fibra di vetro è ottenuta con vetro con alto contenuto di alcali e una buona resistenza chimica, ma presenta proprietà elettriche modeste. Altri tipi di vetro sono il vetro C resistente agli attacchi chimici, il vetro M ad alto modulo elastico, il vetro D con ottime caratteristiche elettriche e quello L che, per il suo contenuto di piombo, realizza una buona protezione alle radiazioni e può essere usato come traccia per il controllo ai raggi x dell'allineamento delle fibre. Tutti i vetri hanno un rapporto resistenza su peso molto alto sebbene le fibre di vetro siano, fra le fibre inorganiche sintetiche, a densità più alta. Il vetro mantiene le sue proprietà meccaniche fino al 50% della sua capacità di resistenza ad una temperatura di 375°C e fino al 25% a 538°C. È possibile trafilare molti tipi di vetro di varie composizioni in filamenti continui. Il filamento è una fibra individuale ed ha lunghezza indefinita; si producono anche fibre più corte con una lunghezza che va da 203 a 381 mm.

| Elementi | % |
|--------------------------------|----------|
| SiO ₂ | 52-56 |
| Al ₂ O ₃ | 12-16 |
| CaO | 0-6 |
| MgO | 8-13 |
| BaO | 0-3 |
| Na ₂ O e KrO | 0-0.4 |
| TiO ₂ | 0.05-0.4 |
| Fe ₂ O ₃ | 0-0.5 |

Tabella 1.3 - Composizione del vetro E

Il vetro S è un vetro ad alta resistenza a trazione. La sua resistenza è, infatti, circa 33% più grande di quella del vetro E ed il suo modulo risulta essere circa il 20% più alto di quello del vetro E. Questo vetro viene largamente usato per applicazioni aerospaziali dove sono richiesti alti rapporti resistenza su peso e buone caratteristiche a temperature elevate insieme ad un alto limite di fatica, tutte qualità, queste, presenti nel vetro di tipo S. La composizione di questo vetro è: 65% di SiO₂, 25% di Al₂O₃ e 10% di MgO. Un ultimo tipo è il vetro D particolarmente adatto per applicazioni elettroniche in virtù della sua più bassa costante dielettrica e la più bassa densità, sebbene le sue proprietà meccaniche siano inferiori a quelle dei tipi E e S.



Le fibre di rinforzo

Fibre di grafite

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

Le elevate proprietà meccaniche delle fibre di carbonio derivano dalla particolare struttura cristallina della grafite. Quanto più si riesce ad ottenere una valida struttura cristallina, tanto più si ottiene un materiale dalle caratteristiche notevoli. Un cristallo di grafite, Figura 1.9, ha una struttura composta da strati sovrapposti di piani costituiti da atomi di carbonio. I legami fra gli stessi atomi dello stesso piano sono forti (legami covalenti) mentre quelli fra atomi di piani differenti sono relativamente deboli (legami Van der Waals): è evidente come i cristalli siano strutture fortemente anisotrope e sarà compito del processo di fabbricazione disporre la struttura cristallina nella direzione voluta. Naturalmente ciò non è facile e praticamente non si riesce mai ad ottenere cristalli perfetti e precisione di orientamento per cui le caratteristiche meccaniche risultanti saranno più basse di quelle teoriche. Per la produzione sia delle fibre di carbonio che di grafite si parte da precursori e la scelta dell'uno o dell'altro dipende dal costo di produzione, dalla complessità del processo, dalla rapidità di lavorazione e così via.

Le fibre di rinforzo

Fibre di grafite

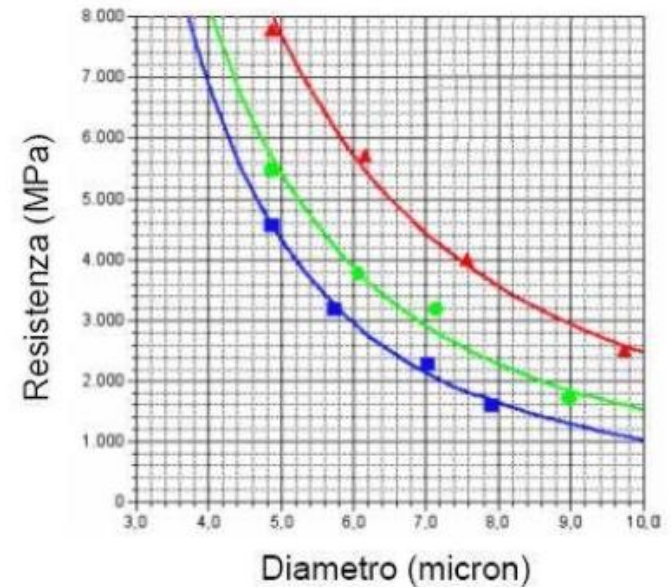
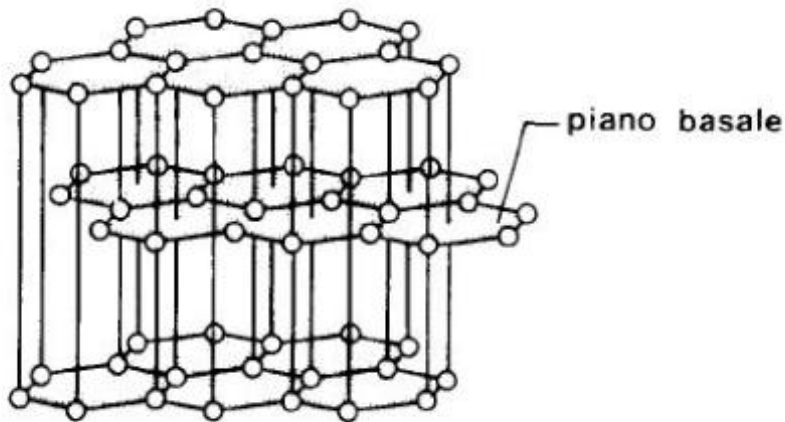
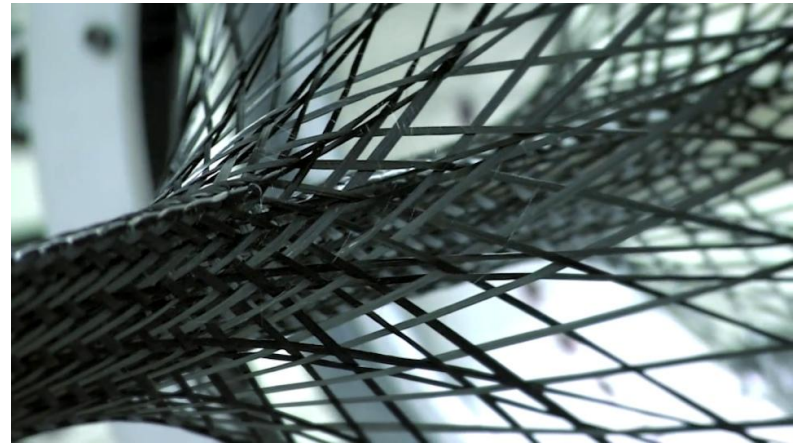
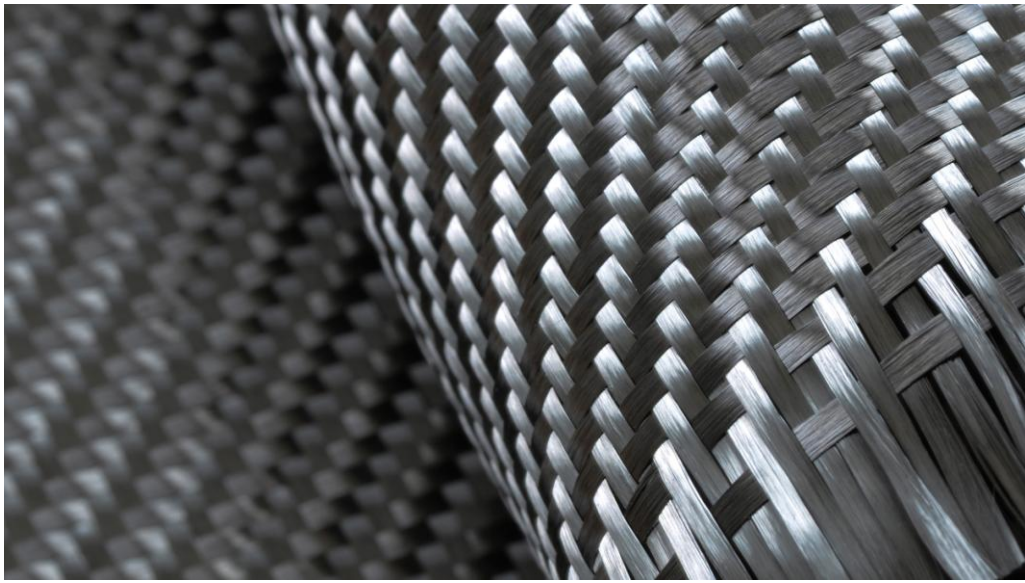


Figura 1.10 - Resistenza della fibra di carbonio al variare del diametro





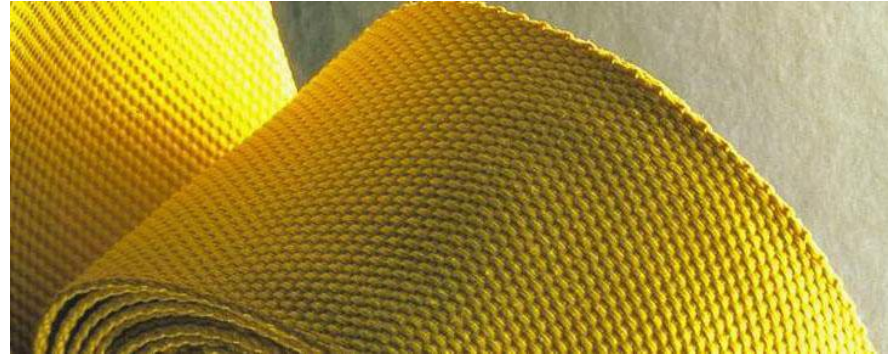
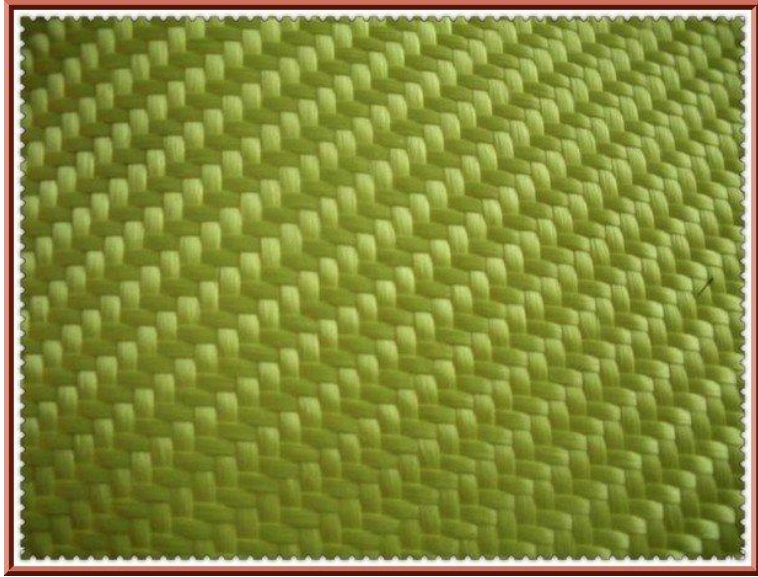
Le fibre di rinforzo

Fibre aramidiche

La fibra aramidica, grazie alla combinazione di ottimo peso specifico e di alta resistenza a trazione, ha la più alta resistenza specifica di tutte le altre fibre e dei materiali da costruzione omogenei. Inoltre, è superiore ad altre fibre sia dal punto di vista della resistenza all'impatto, quanto per quello che riguarda la propagazione delle cricche, nonché per lo smorzamento delle vibrazioni.

Le prime fibre aramidiche sono state prodotte negli anni '60 e sono quelle commercializzate dalla ditta Du Pont sotto il nome di Nomex, successivamente nel 1972, sempre la stessa ditta, ha commercializzato quella che diventerà la fibra aramidica più diffusa e adottata nei più svariati contesti applicativi.

Si ottengono da catene poliammidiche





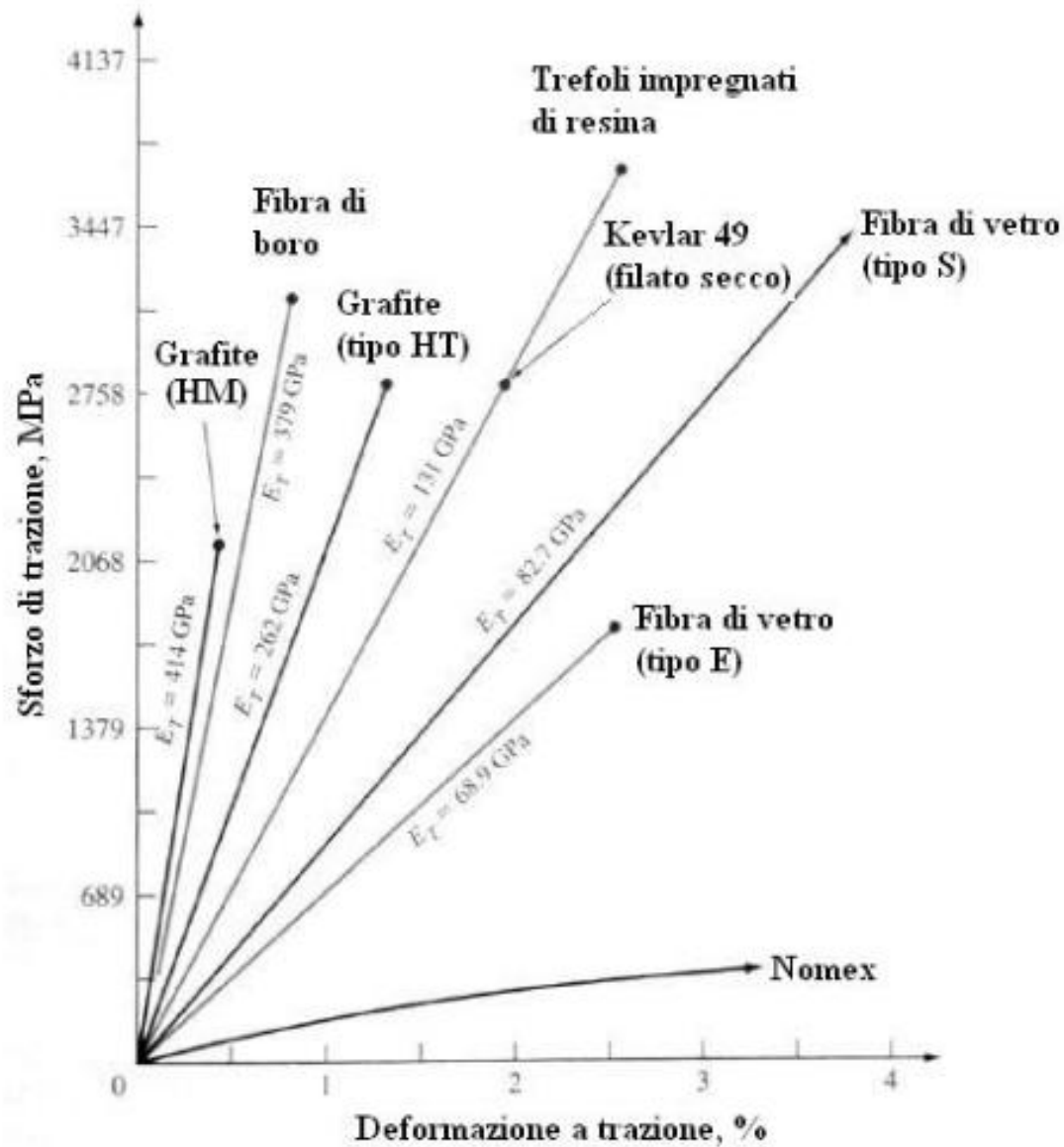
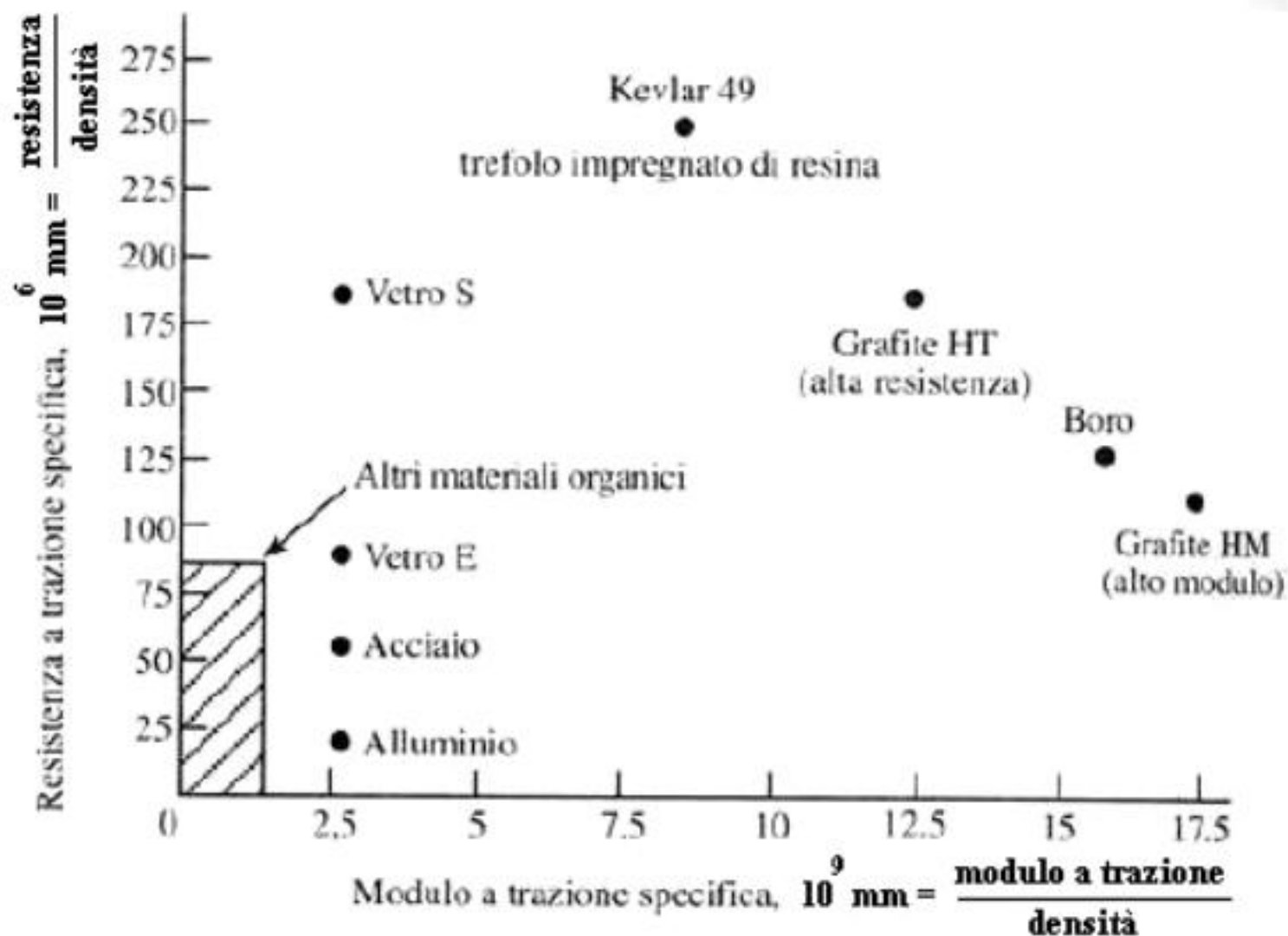


Figura 1.14 - Curva sforzo-deformazione dei vari tipi di fibre

La Figura 1.14 confronta i tipici grafici sforzo-deformazione per le fibre di carbonio, aramidiche e di vetro. Le fibre di carbonio forniscono la migliore combinazione tra elevata resistenza meccanica, elevata rigidità (elevato modulo) e bassa densità, ma presentano una bassa capacità di allungamento. La fibra aramidica Kevlar 49 ha una buona combinazione tra elevata resistenza a trazione, modulo elevato (ma minore di quello delle fibre di carbonio), bassa densità ed elevato allungamento (resistenza all'urto). Le fibre di vetro, che presentano valori di densità più elevati, hanno resistenza a trazione e modulo elastico più bassi delle altre fibre. In pratica, però, le fibre di vetro sono molto più economiche delle altre per cui risulta anche le più impiegate.



ura 1.15 - Resistenza a trazione specifica in funzione del modulo a trazione specifico