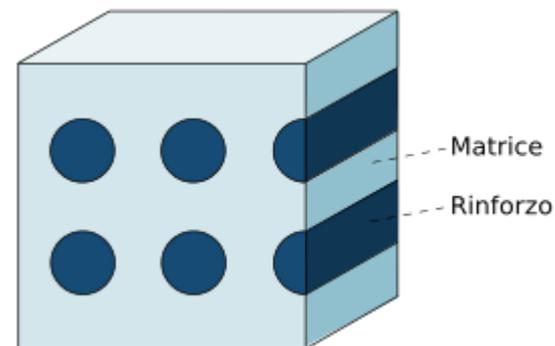




# Materiali compositi



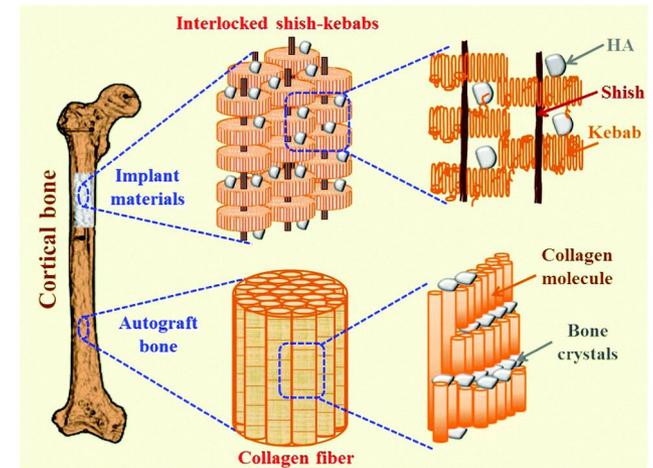
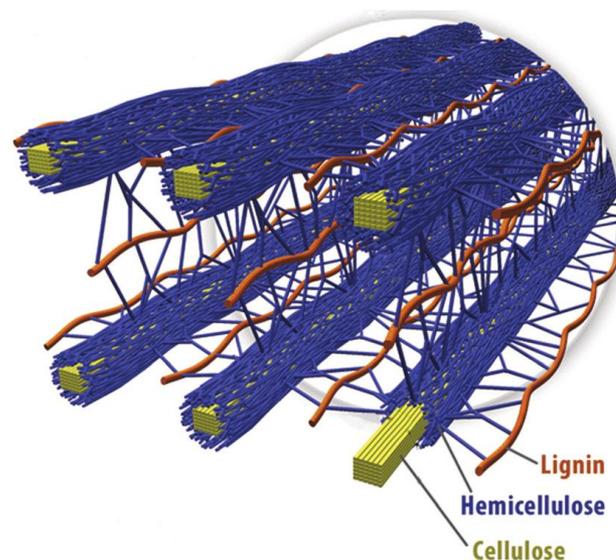
# Introduzione

Progressi tecnologici



Materiali disponibili

L'idea di materiale composito non è nuova, né è propria dell'attività inventiva umana.





# Introduzione

I materiali compositi artificiali non sono una novità:

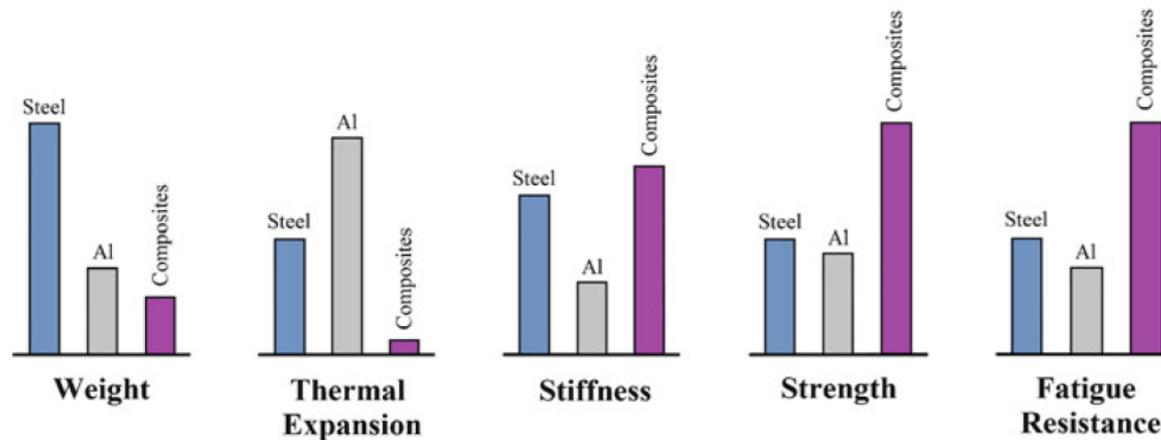


# Introduzione

Lo studio dei materiali compositi come disciplina a sé stante nasce intorno al 1960, per far fronte alle richieste del settore aeronautico, delle costruzioni civili e del settore energetico.

Materiali compositi:

- proprietà non ottenibili mediante l'uso dei singoli costituenti.
- Flessibilità nella progettazione.
- Adattabili a ciascuna specifica applicazione e specifica di progetto.





# Introduzione

Dal 1975 in poi è stata sviluppata la tecnologia per la produzione di rinforzi (ad es. fibre, whiskers, ecc.) ad alto modulo (carbonio, boro, carburo di silicio, allumina, ecc.).

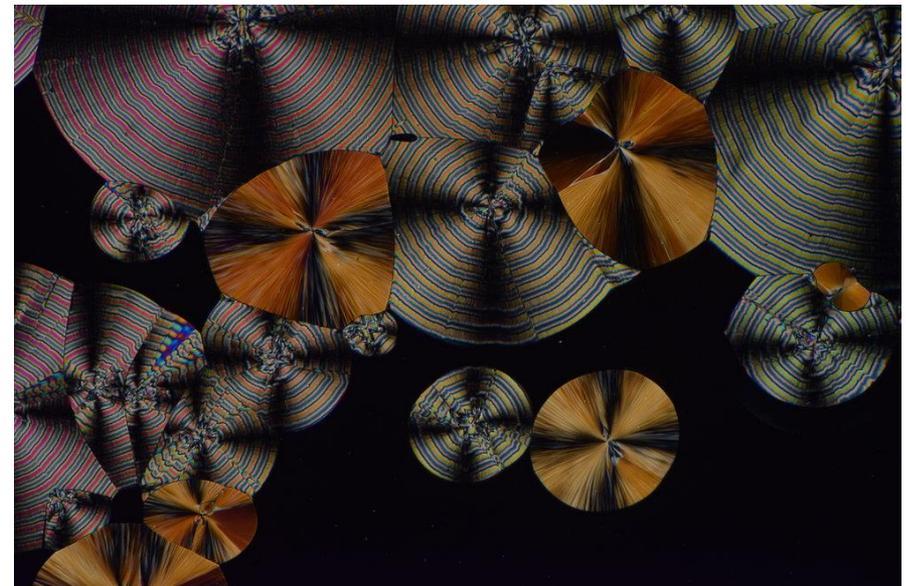
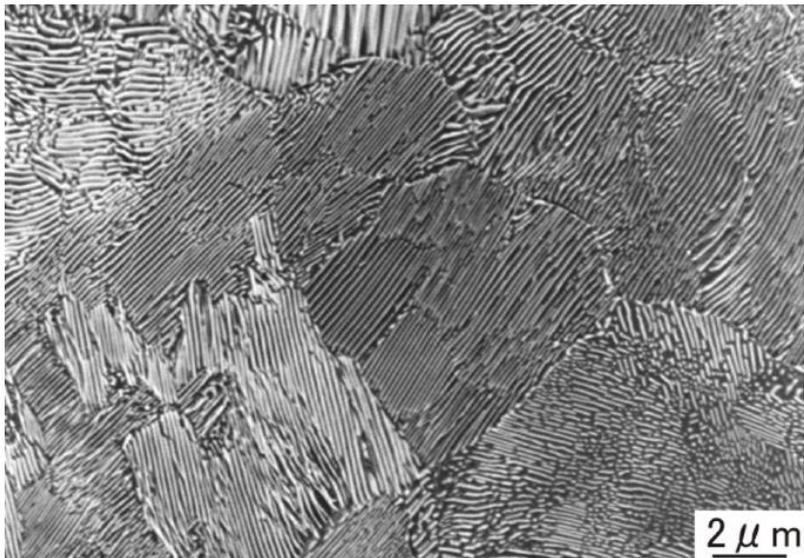
I compositi rinforzati da fibre hanno preso il sopravvento perché i materiali in forma di fibre esibiscono le migliori proprietà meccaniche: parleremo principalmente di questi.

**Ma come viene definito un materiale composito?**



# Introduzione

Praticamente tutti i materiali sono dei compositi.



**E quindi?**



# Introduzione

Serve una **definizione operativa** di materiale composito.

Un materiale composito deve soddisfare i seguenti requisiti per essere definito tale:

1. Deve essere un materiale fabbricato dall'uomo (escludo il legno, ecc.).
2. Deve essere costituito da due o più fasi distinte fisicamente o chimicamente.
3. Deve avere caratteristiche diverse da ciascuno dei suoi componenti presi singolarmente.



# I rinforzi

I rinforzi possono essere in forma di fibre, ma anche in forma di particelle, flakes, whiskers, fibre corte, ecc.

Tuttavia, in pratica, molto spesso si usano le fibre in quanto in questa forma i materiali tendono ad esibire le migliori proprietà meccaniche (resistenza, rigidità).

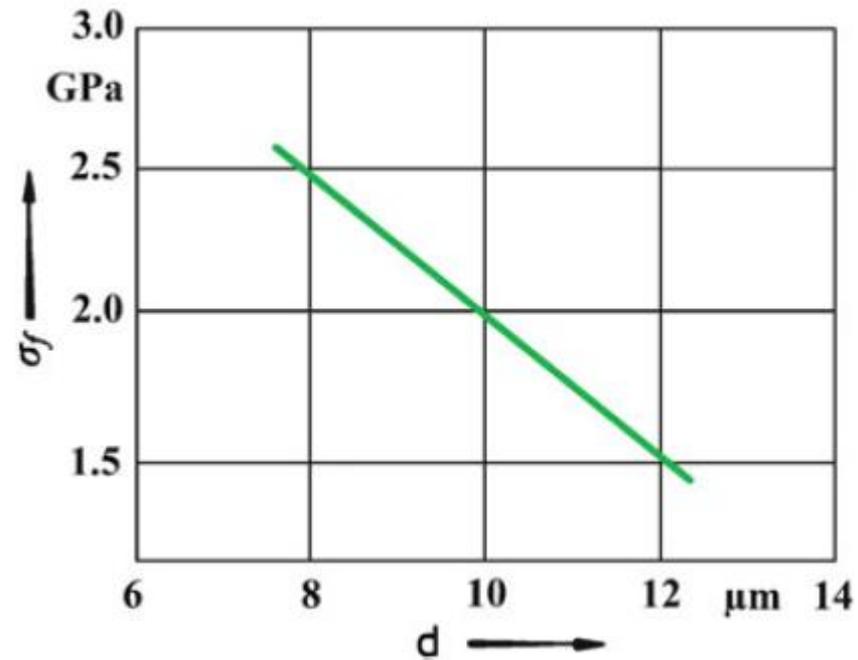
Le fibre usate come rinforzi possono essere:

- naturali (basso costo), ad es. cotone, juta, lino, sisal, seta, lana, ecc. Non ce ne occuperemo.
- Artificiali, ad es. vetro, carbonio, aramidiche, PE, ecc. Queste fibre sono caratterizzate da elevate proprietà meccaniche e bassa densità.

# I rinforzi

L'uso di fibre come materiali ingegneristici ad alte prestazioni è basato su tre principi:

1. Piccolo diametro (rispetto ad es. alla dimensione del grano o ad altre unità microstrutturali). Ciò consente di ottenere un materiale con prestazioni vicine ai valori teorici, cosa non possibile con in materiali in forma massiva. Ad esempio, la resistenza di una fibra di carbonio varia qualitativamente, in funzione del diametro, nel modo seguente:





## I rinforzi

2. Un elevato rapporto d'aspetto (es.  $l/d$ ), che consente di trasferire gran parte del carico dalla matrice alle fibre, più resistenti e rigide.
3. Un'elevata flessibilità, che per fibre di elevato modulo è funzione del diametro, la quale consente di produrre oggetti di forma complessa utilizzando tali fibre.

Una trave sottoposta a flessione tramite un momento  $M$  sviluppa una curvatura di raggio  $R$ . Vale la seguente espressione ( $E$ : modulo elastico,  $I$ : mom. Inerzia sezione):

$$M \cdot R = E \cdot I$$

$E \cdot I$  è la rigidezza della trave.



# I rinforzi

Per una fibra a sezione circolare di raggio  $d$ :

$$I = \pi d^4 / 64$$

Per quanto riguarda la flessibilità di una fibra, quindi:

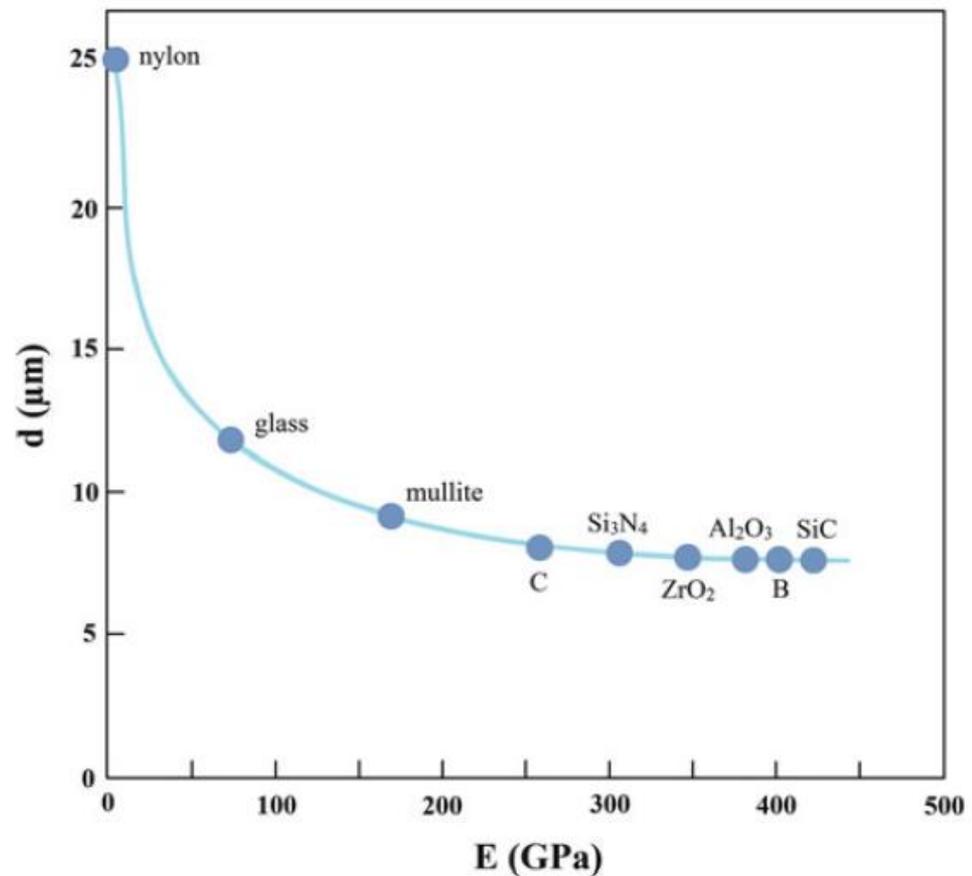
$$\text{Flessibilità} = \frac{1}{EI} = \frac{64}{E\pi d^4}$$

Quindi:

- La flessibilità dipende in modo molto forte da  $d$ .
- Fabbricando una fibra di un qualsiasi materiale con diametro  $d$  sufficientemente piccolo, essa può essere resa flessibile come una fibra di un polimero, ecc.

# I rinforzi

Ad esempio, volendo ottenere delle fibre con la stessa flessibilità di una fibra di nylon da 25  $\mu\text{m}$  (per uso tessile):





## Fibre di vetro

Esistono in commercio fibre di vetro con composizioni molto differenti. Le più comuni sono quelle a base di silice (50-60% SiO<sub>2</sub>), contenenti altri ossidi (Ca, Na, B, Al, Fe).

Composition	E glass	C glass	S glass
SiO <sub>2</sub>	55.2	65.0	65.0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8.0	4.0	25.0
CaO	18.7	14.0	–
MgO	4.6	3.0	10.0
Na <sub>2</sub> O	0.3	8.5	0.3
K <sub>2</sub> O	0.2	–	–
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.3	5.0	–

Le più usate



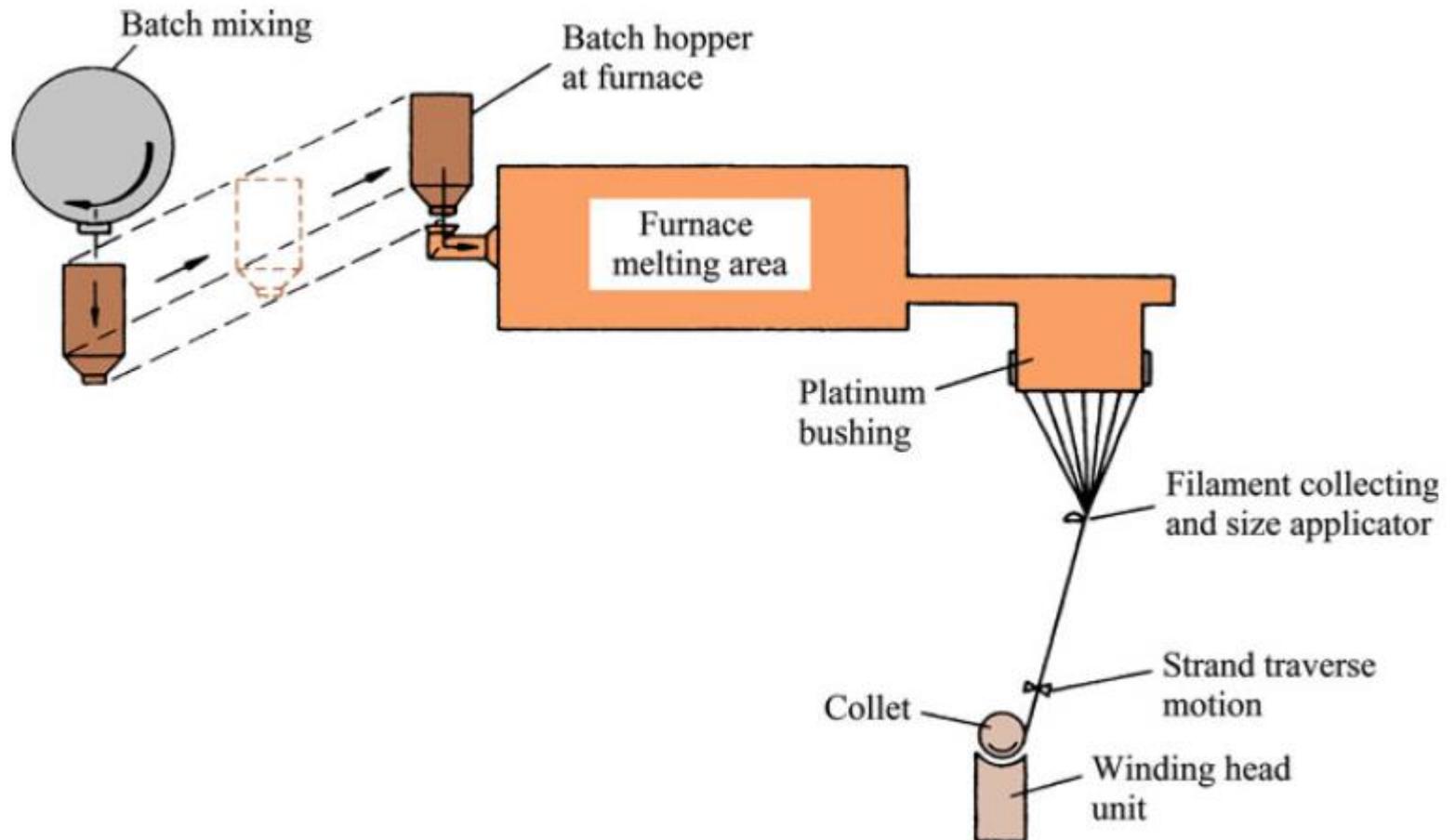
E: Electrical

C: Corrosion

S: Silica (temperatura)

# Fibre di vetro

Produzione delle fibre di vetro:





# Fibre di vetro

## Note:

- Bushing di Pt, riscaldato (200 – 300 fori).
- Estrusione per gravità.
- Le fibre ricevono un appretto (sizing).
- Le fibre vengono raccolte in uno strand e avvolte su un cilindro.

Il diametro delle fibre dipende dal diametro dei fori, dalla viscosità del fuso (T, composizione) e dal livello del battente liquido.

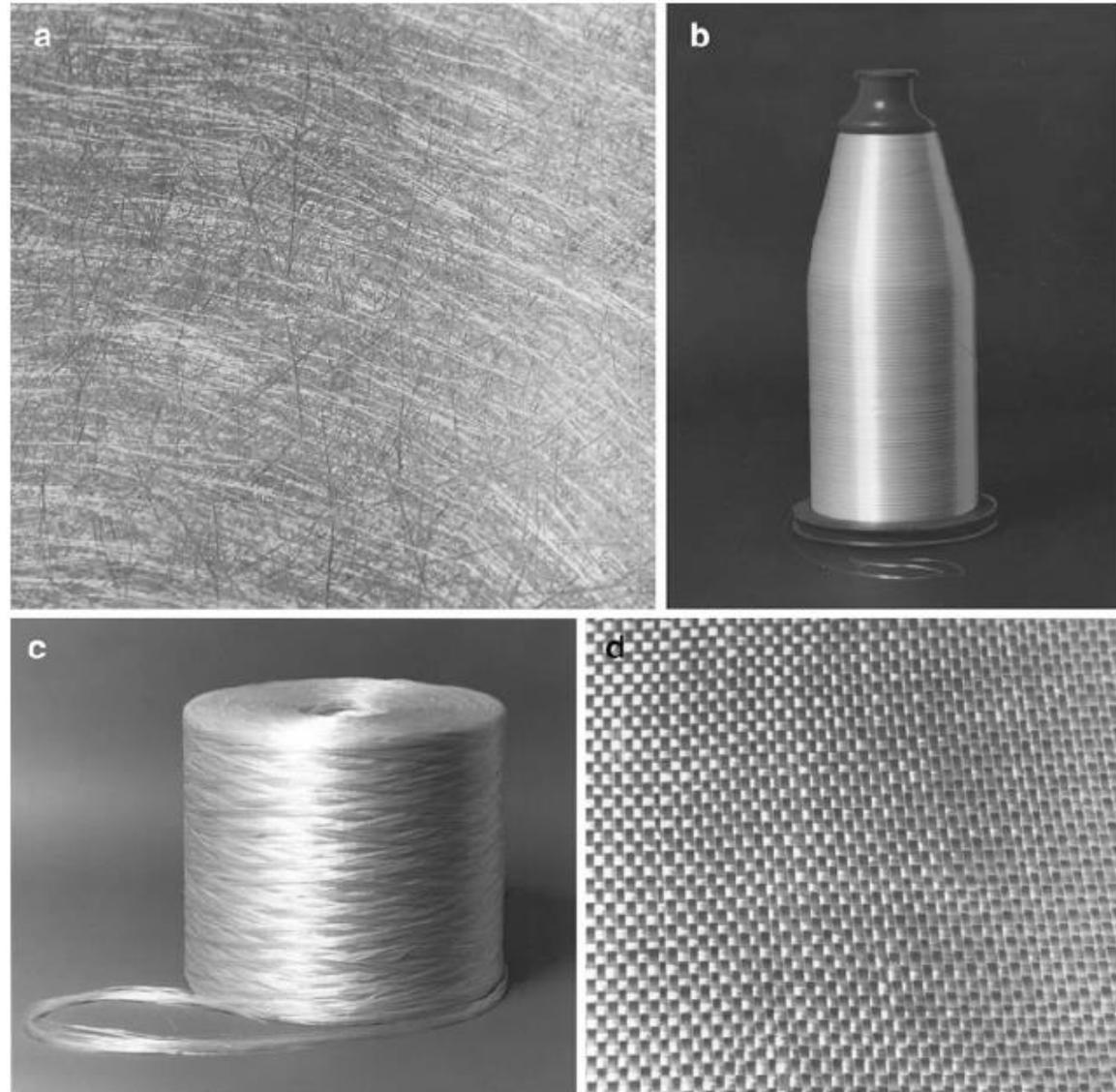
Problemi: alta temperatura, corrosività materiali fusi, immiscibilità di alcuni componenti allo stato liquido, cristallizzazione durante il raffreddamento.

Per superarli, sono state sviluppate anche altre tecniche, utilizzabili anche per altri tipi di fibre (ad es. quelle ceramiche), come ad esempio le tecniche **sol-gel**.

# Fibre di vetro

Alcune forme:

- Matt
- Yarn (continuo)
- Roving
- Tessuto





# Fibre di vetro

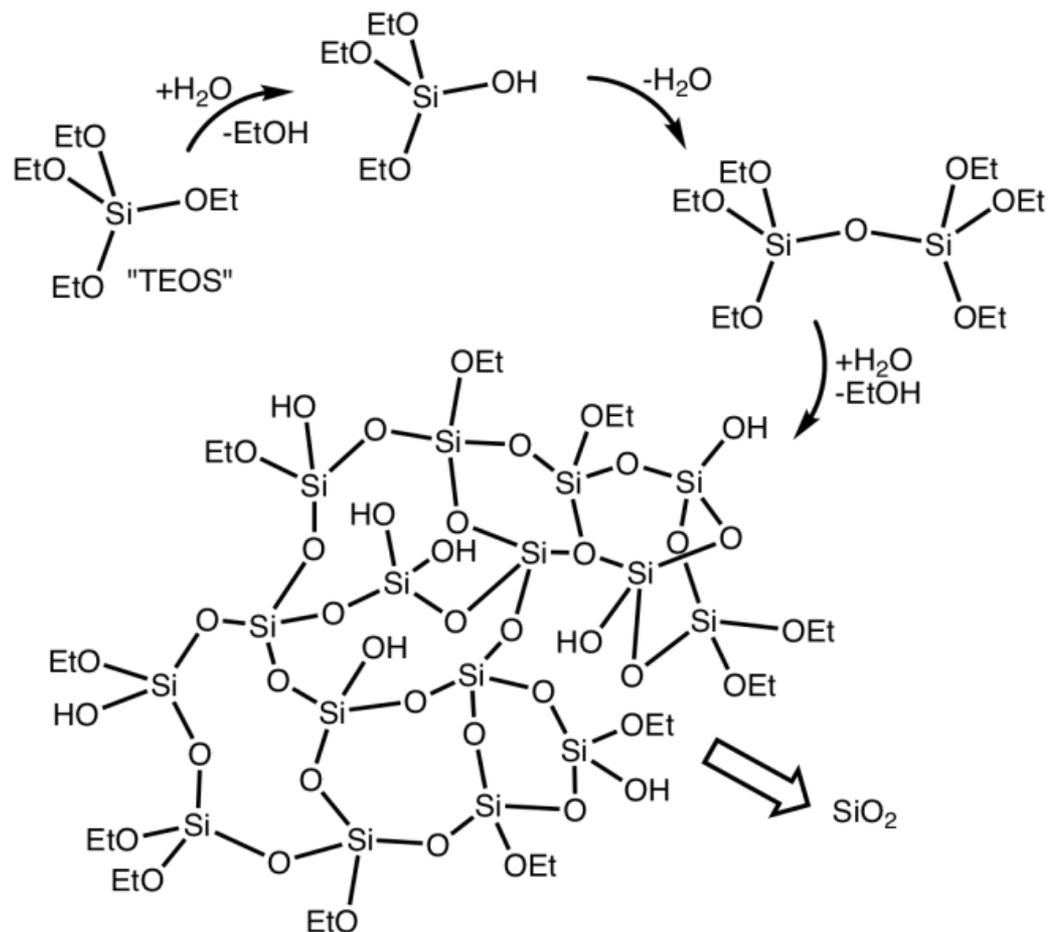
## *Tecnica sol-gel*

- Si parte da una soluzione di precursori metallorganici (alcossidi M-O-R).
- La soluzione viene trattata in modo tale da produrre un sol, ovvero una sospensione di particelle colloidali (dimensioni dell'ordine dei nm).
- Il sol viene gelificato.
- Il gel viene estruso a bassa temperatura.
- Il gel viene convertito in vetro (o ceramica) mediante calcinazione ad alta temperatura.

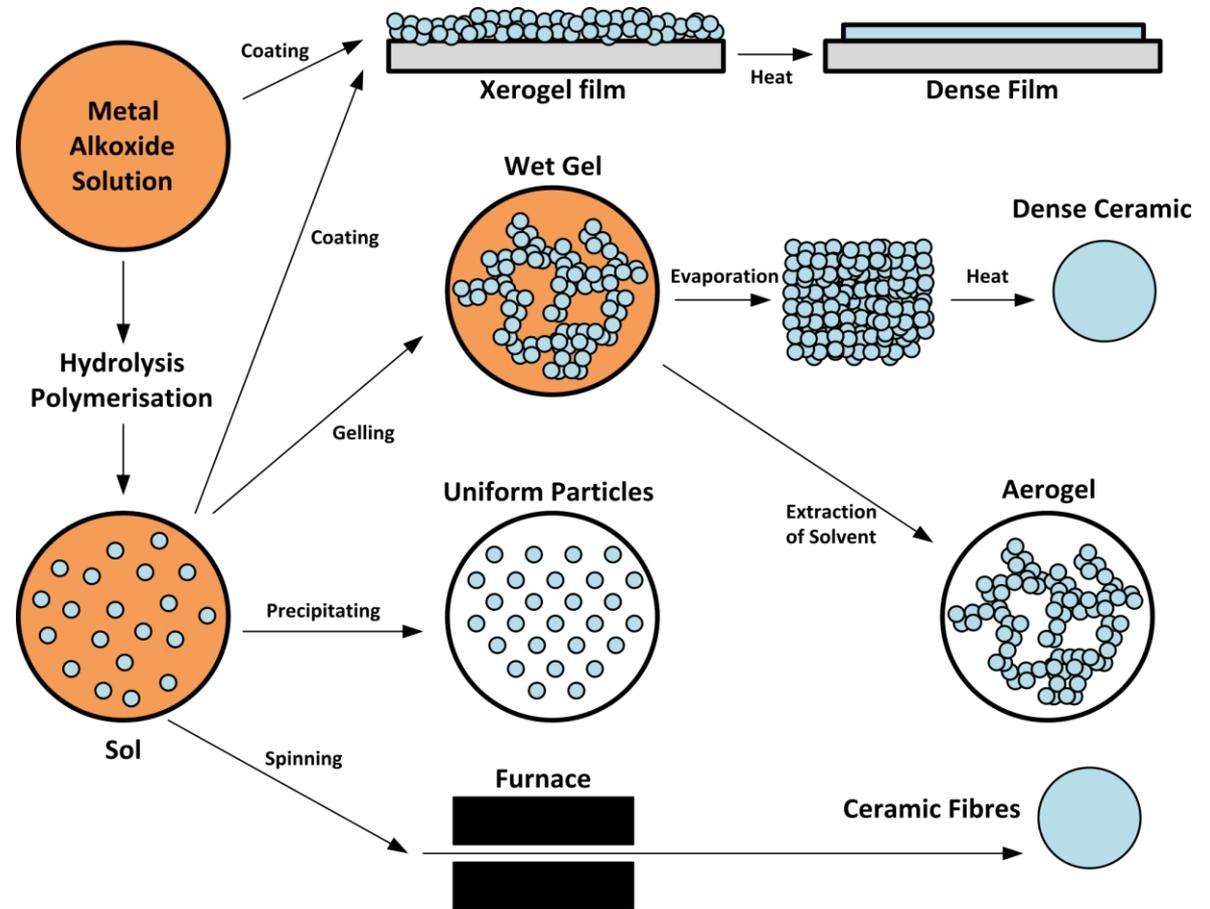
Ad es: TEOS, ovvero  $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$



# I rinforzi

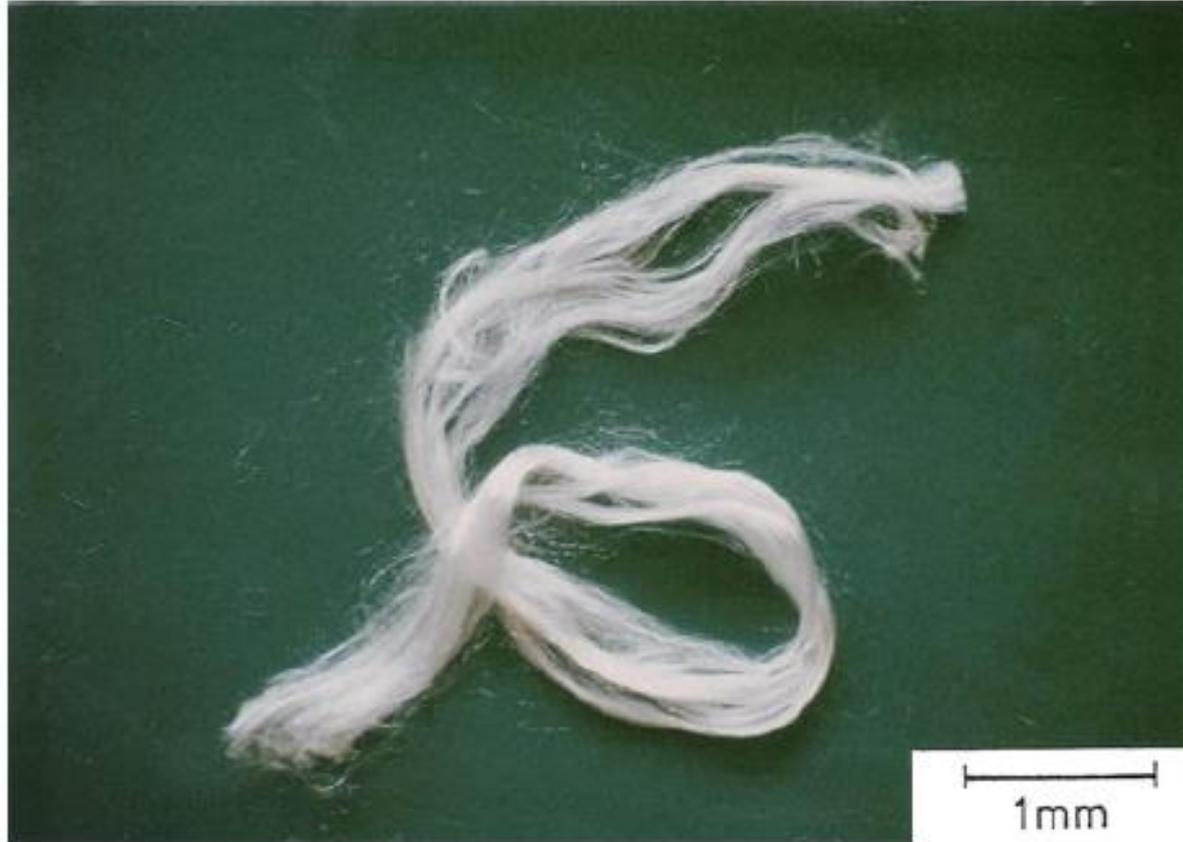


# I rinforzi



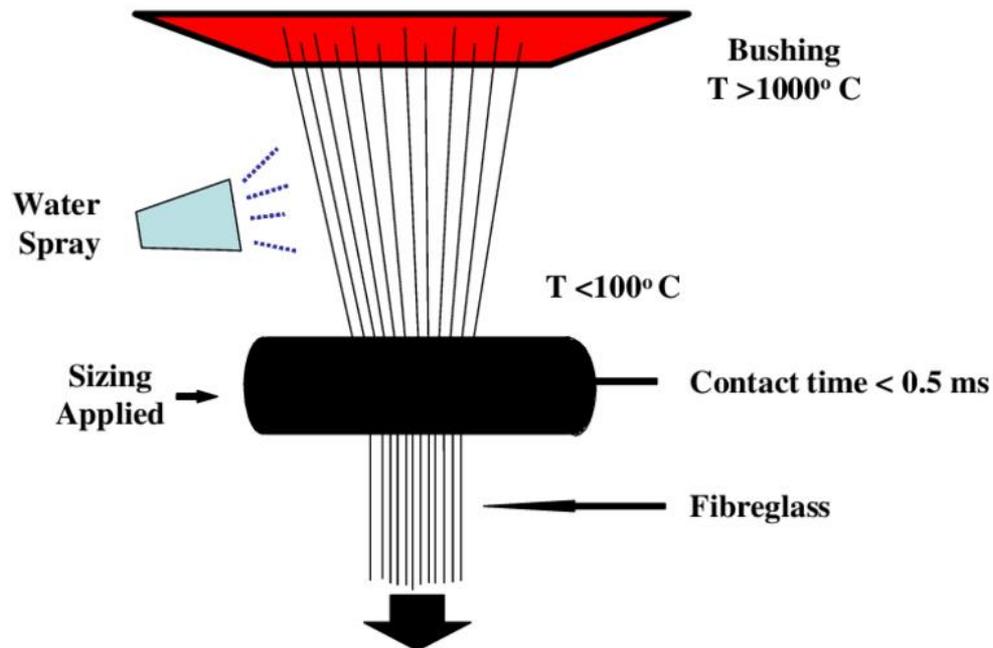


# Fibre di vetro



# Fibre di vetro

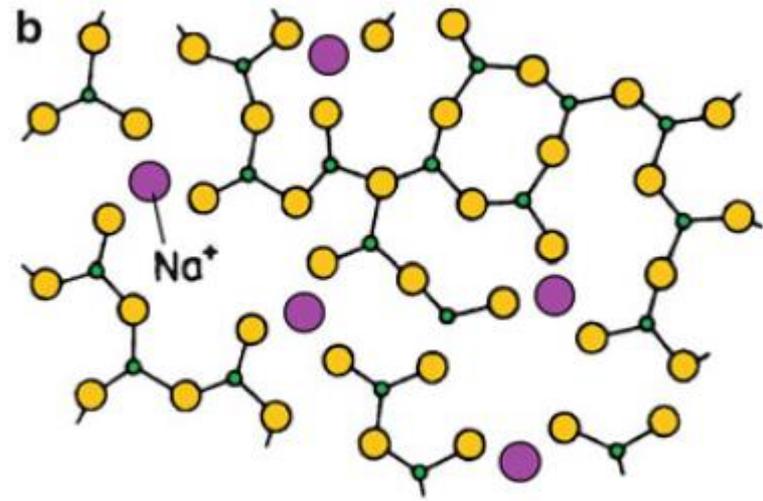
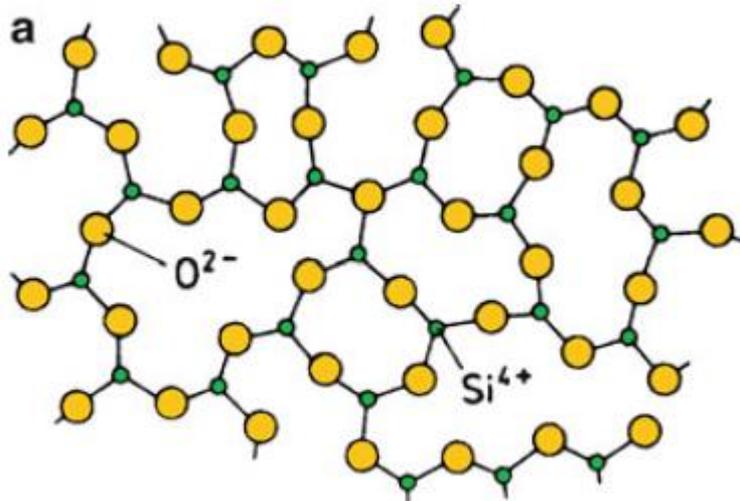
Le fibre di vetro vengono danneggiate facilmente, anche dalla semplice presenza di H<sub>2</sub>O. Pertanto vengono rivestite con un appretto (sizing), che ha anche la funzione di bonding layer.



## Fibre di vetro

Le fibre di vetro sono (devono essere) amorfe: nella struttura manca ordine a lungo raggio (reticolo cristallino).

La silice pura fonde a 1.800 °C circa, per rendere la produzione delle fibre più agevole (ridurre Tg) e per ridurre la tendenza alla cristallizzazione, si aggiungono altri ossidi.





# Fibre di vetro

Tipiche proprietà dell'E-glass:

Density (g/cm <sup>3</sup> )	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (GPa)	Coefficient of thermal expansion (K <sup>-1</sup> )
2.55	1,750	70	$4.7 \times 10^{-6}$

Le fibre di vetro hanno proprietà omogenee ed isotrope.

Caratteristiche:

- Bassa densità.
- Alta resistenza.
- Ottimo rapporto resistenza/densità.
- Modulo elastico relativamente basso.
- Discreto rapporto modulo/densità (motivo per cui l'industria aeronautica usa altre fibre).



## Fibre di vetro

- Le fibre di vetro vengono utilizzate per produrre manufatti basati sull'impiego di molti tipi di matrici: resine poliestere, epossidiche, fenoliche.
- Sono economiche e disponibili in molte forme.
- Sono sensibili all'umidità ed al fenomeno della «fatica statica», che consiste nella nucleazione e crescita di cricche subcritiche in fibre di vetro sollecitata per lunghi periodi con carichi costanti.
- Utilizzate per produrre GRP (Glass Reinforced Plastics).

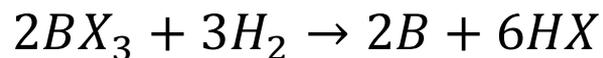


## Fibre di boro

Il boro è un materiale fragile.

Le fibre di boro vengono prodotte mediante deposizione chimica da fase vapore (CVD) su un opportuno substrato (di solito W o C), ad alta temperatura, per cui esse stesse sono un materiale composito.

Il processo più usato è quello di Talley (1959), nel quale un alogenuro di B viene ridotto su un filo caldo di W, in presenza di idrogeno:



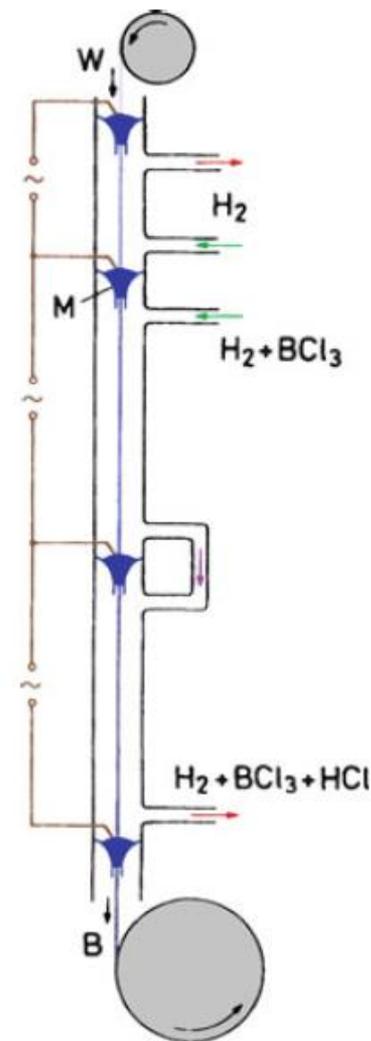
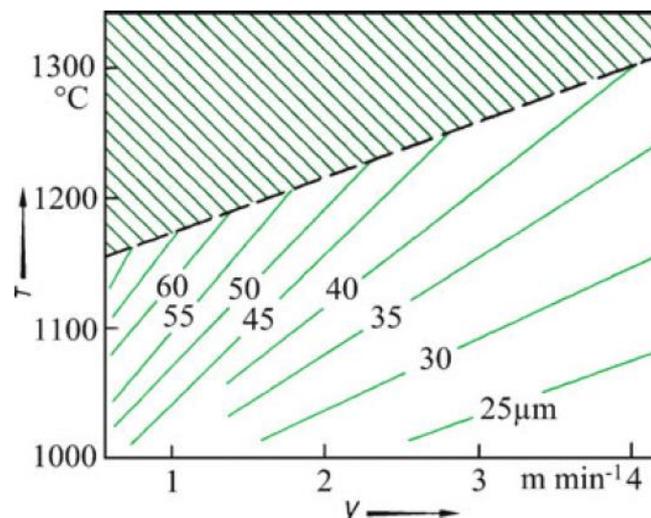
Dove X è Cl, Br o I.

E' necessario l'impiego di temperature molto elevate, per cui il substrato è costituito da un filo di W riscaldato per effetto Joule.

Le fibre prodotte hanno una qualità molto elevata e caratteristiche consistenti.

## Fibre di boro

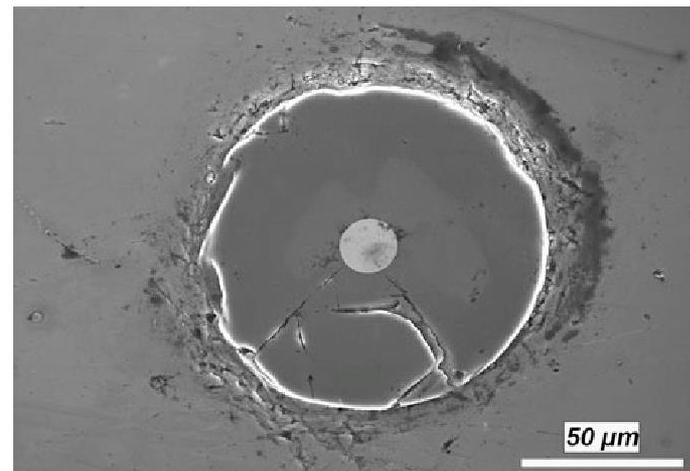
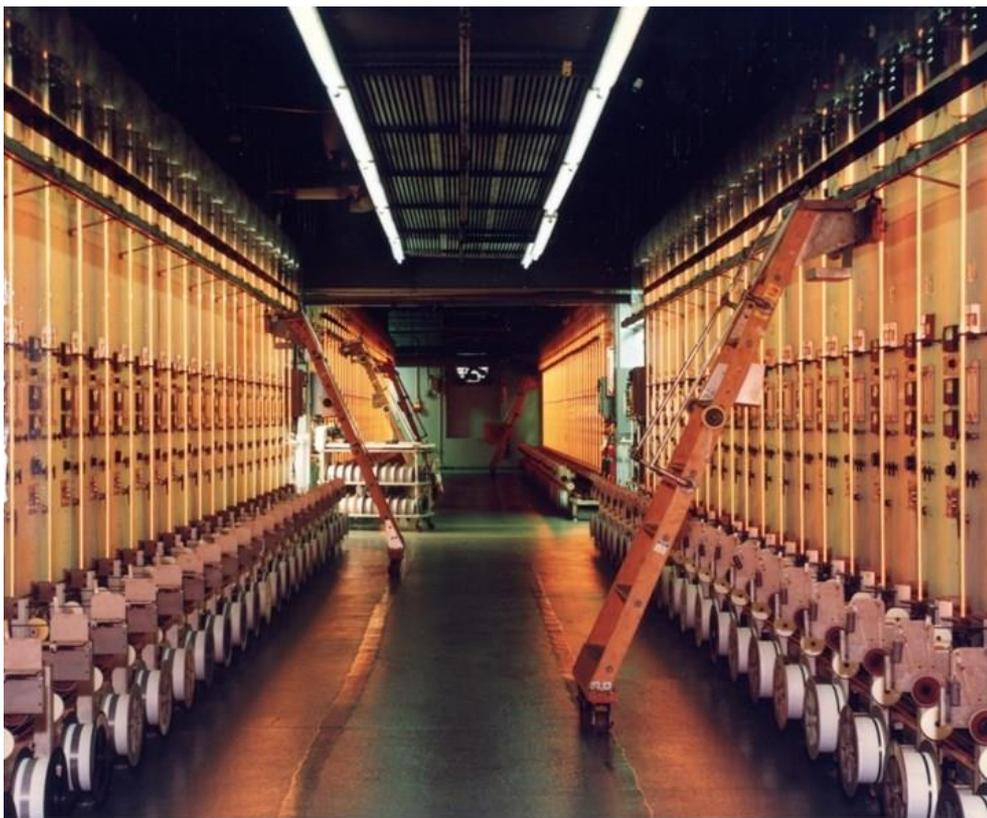
- Ogni reattore produce un monofilamento.
- Filo 10-12  $\mu\text{m}$ .
- $\text{BCl}_3 + \text{H}_2$
- T sotto un certo limite per ottenere B amorfo. Con filo fermo  $\sim 1000^\circ\text{C}$ , con filo in movimento aumenta.
- Problema del recupero di  $\text{BCl}_3$  (costoso).
- Sigillatura con Hg (anche contatto).





# Fibre di boro

Impianto AVCO Specialty Materials

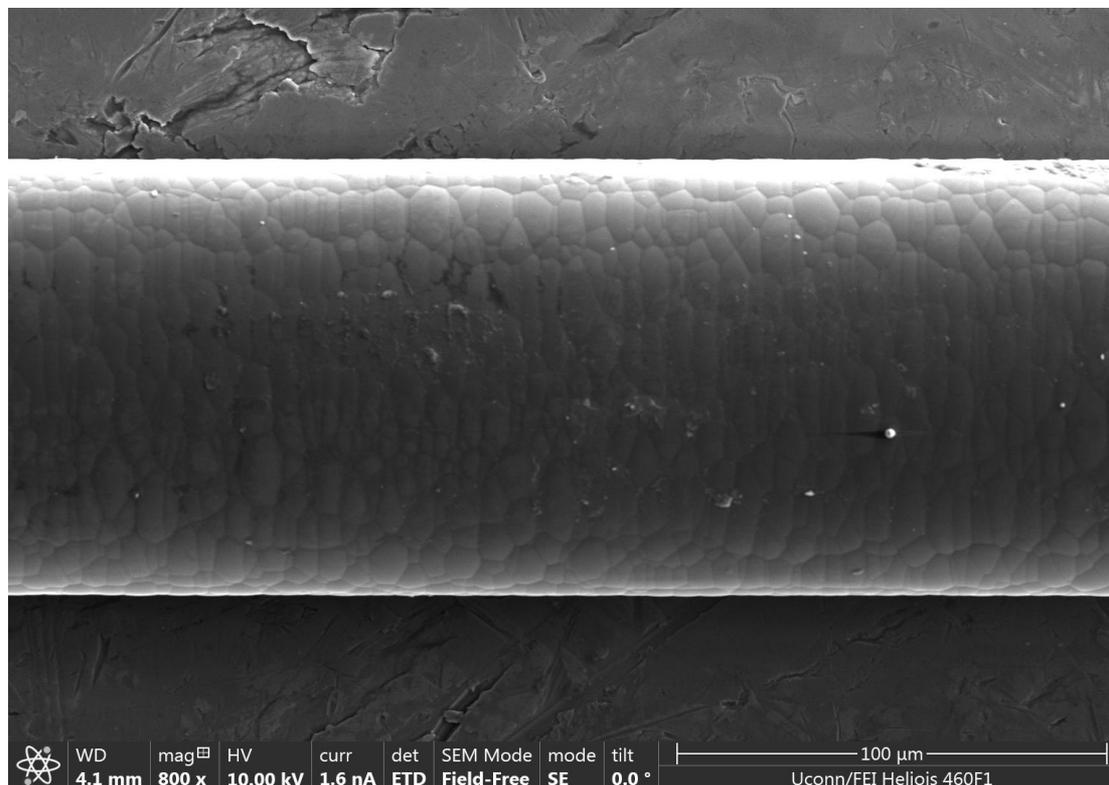


## Fibre di boro

Struttura nodulare, «amorfa» (in realtà, nanocristallina), delle fibre di B.  
All'interfaccia tra i due materiali si formano dei composti (bonding layer), come i boruri WB<sub>4</sub>, W<sub>2</sub>B<sub>5</sub>, ecc.).

Processo:

- nucleazione
- accrescimento



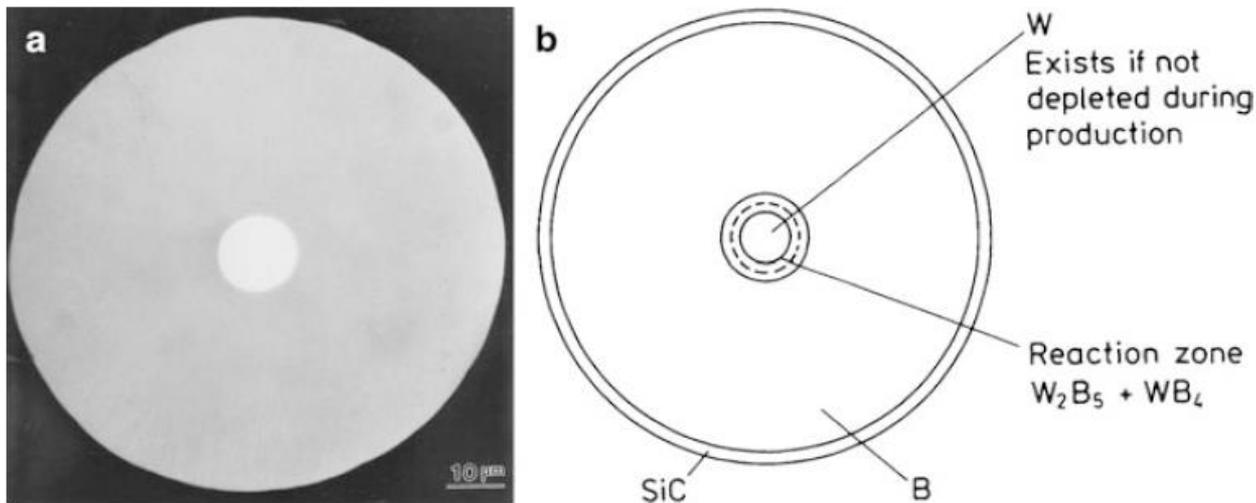


## Fibre di boro

Esiste anche un altro processo, basato sulla decomposizione termica, a temperature più basse, di idruro di B. In questo caso, può essere usato, come substrato, una fibra di vetro rivestita di C. Tuttavia, la qualità della fibra di B così ottenuta è inferiore a causa della mancanza di aderenza tra substrato e materiale depositato. Inoltre, la densità di questo tipo di fibre è inferiore a causa della presenza di gas intrappolati.

## Fibre di boro

Proprietà: sono funzione del processo, in quanto il limite teorico (dato dalla forza dei legami atomici) non può essere raggiunto a causa della presenza di difetti.  
Per prolungato riscaldamento, tutto il W eventualmente usato può essere convertito nel boruro  $WB_4$  (con espansione).



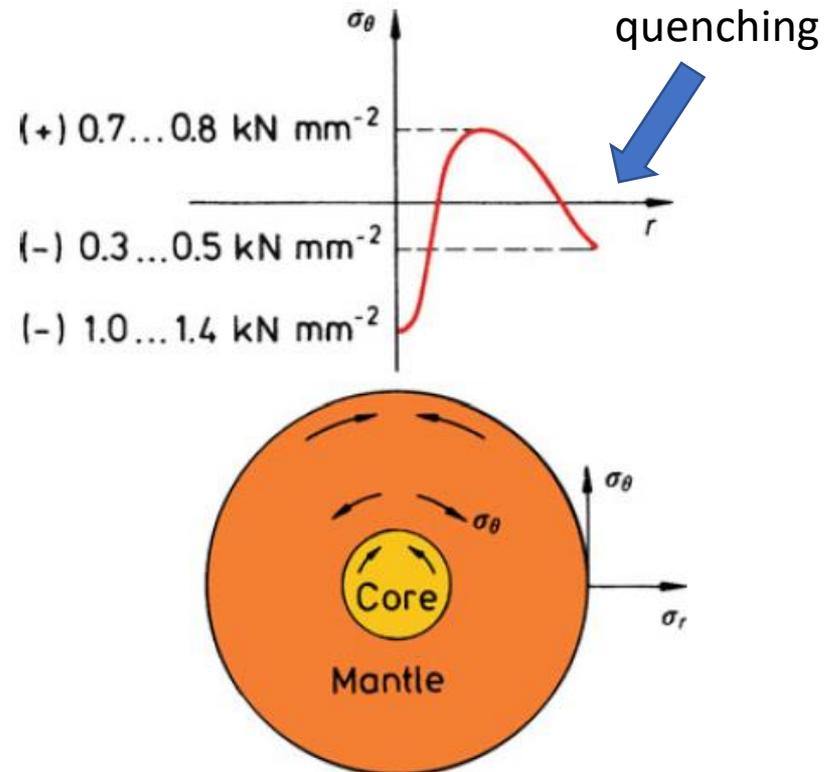
Il rivestimento in SiC (CVD da dimetildiclorosilano) serve per proteggere il B da possibili reazioni con la matrice (ad es. Al).

## Fibre di boro

Sono caratterizzate dalla presenza di notevoli stress residui:

- dovuti al processo di deposizione CVD
- dovuti alla parziale conversione (con espansione) del W
- dovuti al differente CTE di B e W

Possibile preesistenza di crack  
radiali subsuperficiali





## Fibre di boro

Hanno una struttura complessa e le proprietà sono funzione di molti fattori.

Tipicamente:

Diameter ( $\mu\text{m}$ )	Treatment	Strength		Relative fracture energy
		Average <sup>a</sup> (GPa)	COV <sup>b</sup> (%)	
142	As-produced	3.8	10	1.0
406	As-produced	2.1	14	0.3
382	Chemical polish	4.6	4	1.4
382	Heat treatment plus polish	5.7	4	2.2

<sup>a</sup> Gauge length = 25 mm

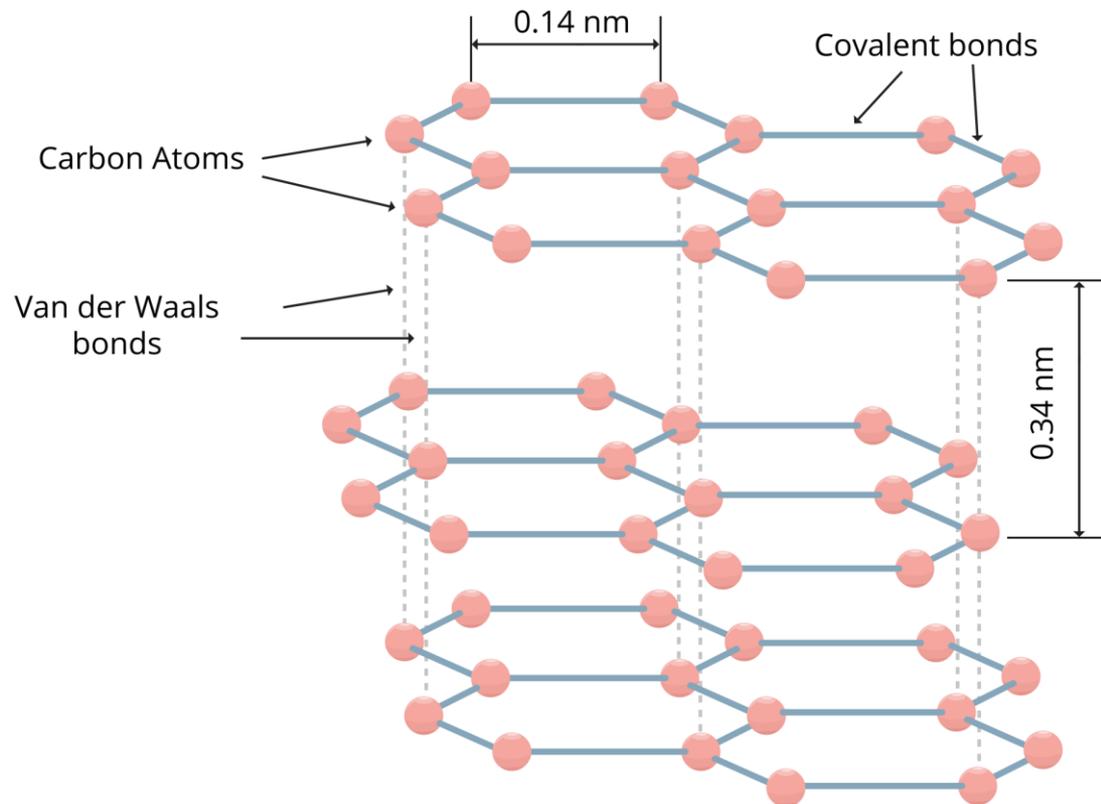
<sup>b</sup> Coefficient of variation = standard deviation/average value

- Modulo elastico: 380-400 Gpa
- Diametro commerciale: 140-150  $\mu\text{m}$
- Densità globale tipica: 2.6 g/cm<sup>3</sup>
- Utilizzabili (in ambiente non ossidante, sino a 2.000+ °C)
- Ok, in compressione, visto il diametro (no buckling)
- Alto costo

# Fibre di carbonio

Carbonio in forma di grafite, densità molto interessante ( $2.28 \text{ g/cm}^3$ ).

Proprietà fortemente anisotropiche (ad es.  $E=1.000 \text{ GPa}$  nel piano grafitico e  $35 \text{ GPa}$  in direzione ortogonale).





## Fibre di carbonio

- Già nel 1900 Edison riuscì a produrre fibre di carbonio mediante pirolisi di filamenti di cellulosa (per lampadine).
- Le fibre derivate dal PAN furono prodotte la prima volta nel 1961 (Shindo, JP – fibre con modulo 170 GPa).
- Nel 1963 la Rolls Royce scopre che il modulo può essere aumentato mediante un opportuno allungamento delle fibre durante il processo, nella fase ossidativa.



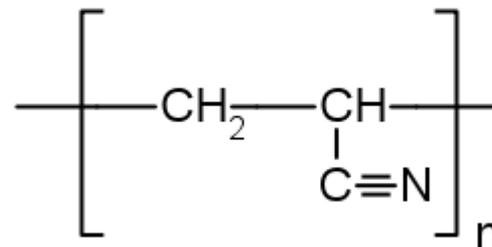
## Fibre di carbonio

Data la struttura della grafite, l'obiettivo è disporre i piani grafitici lungo l'asse delle fibre.

Il processo di produzione che porta alle fibre con le migliori caratteristiche consiste nella pirolisi e successiva grafitizzazione di un precursore polimerico, il PAN (Poliacrilonitrile).

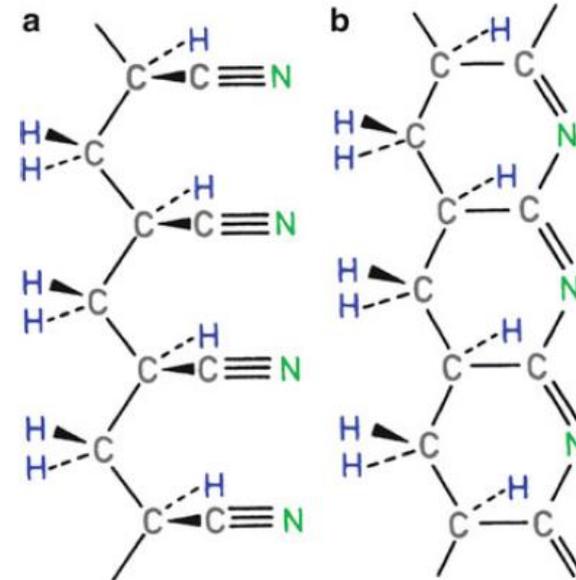
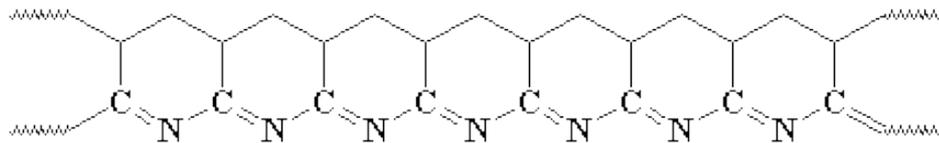
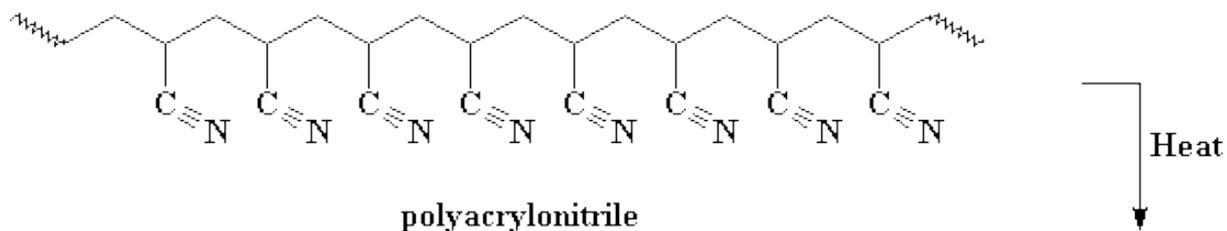
Il PAN viene, in una prima fase ossidativa, stabilizzato a 250 °C, in aria, per evitare la fusione durante il processo, mantenendo le fibre sotto tensione (da bianche diventano nere). Segue un lento riscaldamento in atmosfera inerte, ed infine un trattamento sino a 3.000 °C per aumentare il modulo elastico delle fibre (impacchettamento dei «nastri» grafitici).

Il calo in peso totale può variare dal 40% al 90%.



# Fibre di carbonio

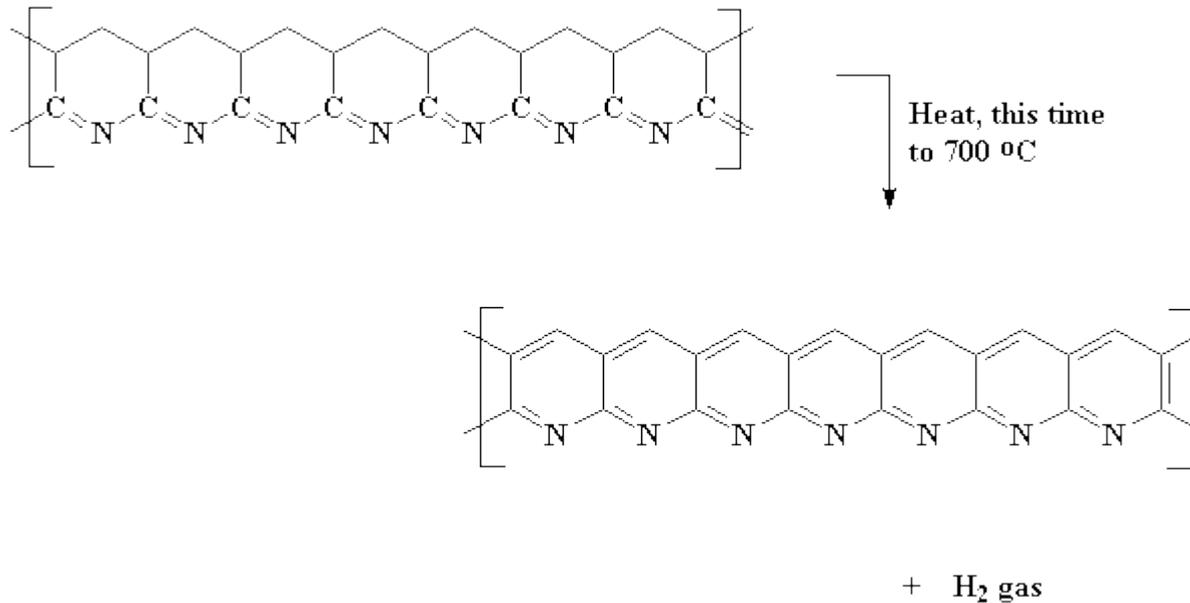
Mediante riscaldamento a 300 °C, avviene la stabilizzazione o ciclizzazione:



Alta Tg,  
non serve  
più stretch

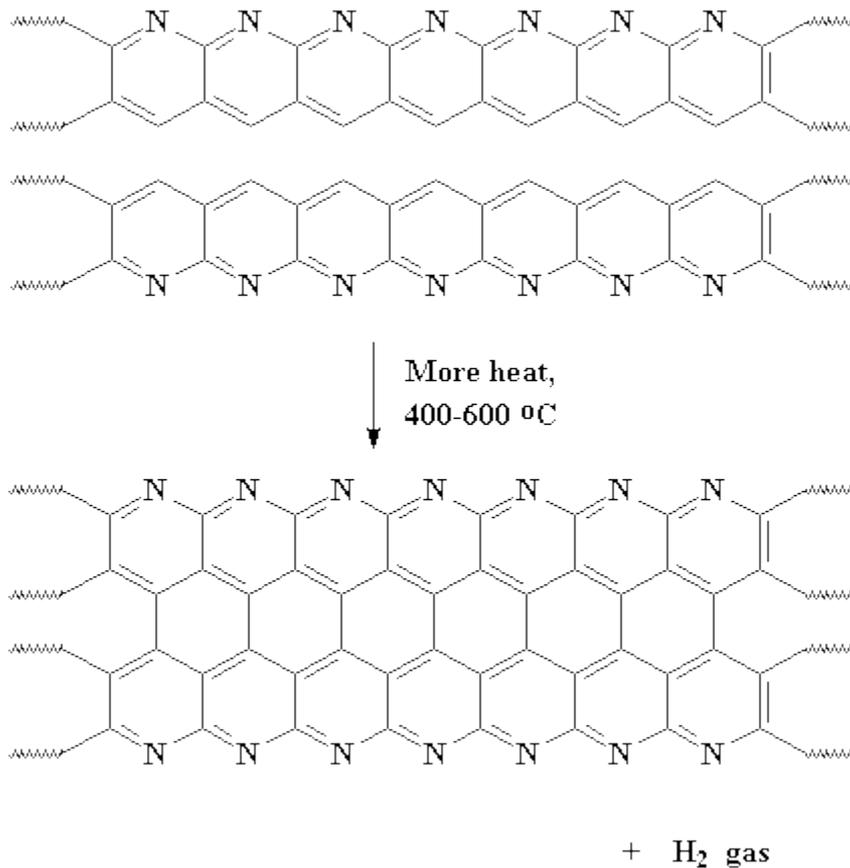
# Fibre di carbonio

Mediante successivo riscaldamento a 700 °C, avviene la deidrogenazione:



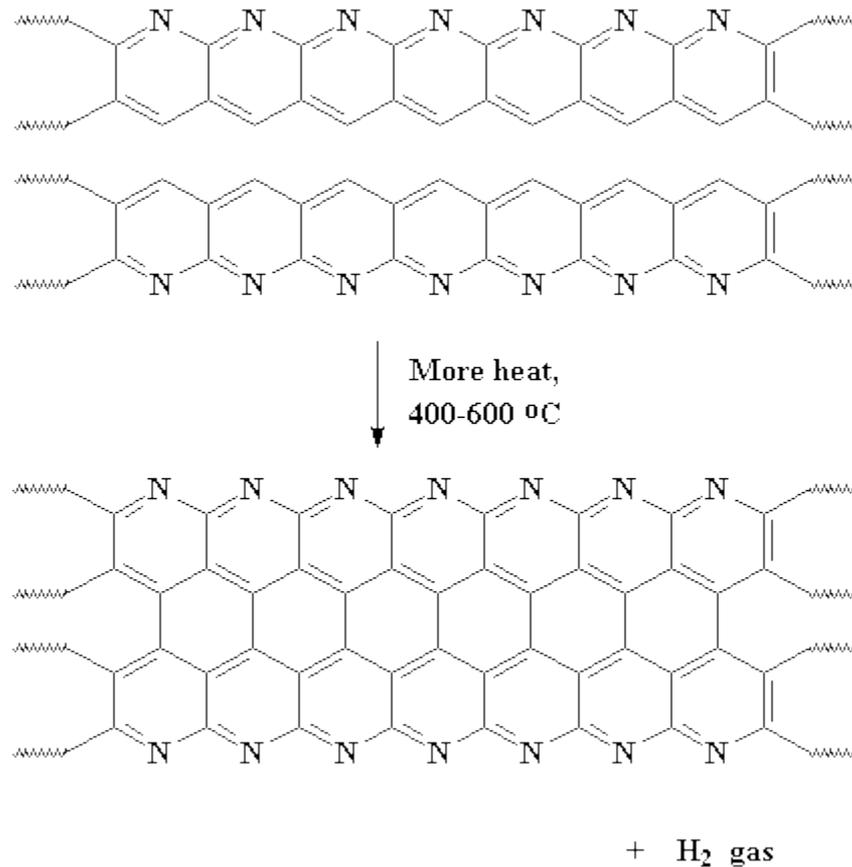
# Fibre di carbonio

Condensazione con eliminazione di ulteriore idrogeno.



# Fibre di carbonio

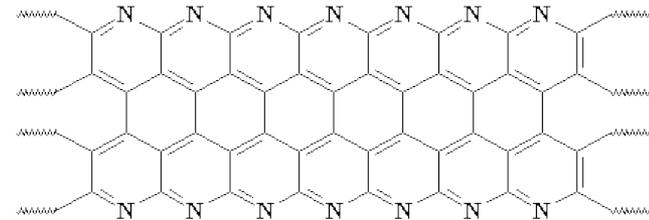
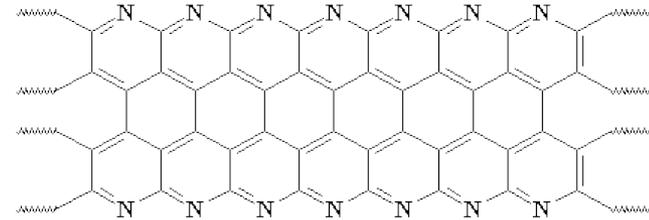
Condensazione con eliminazione di ulteriore idrogeno (si formano dei «nastri»).



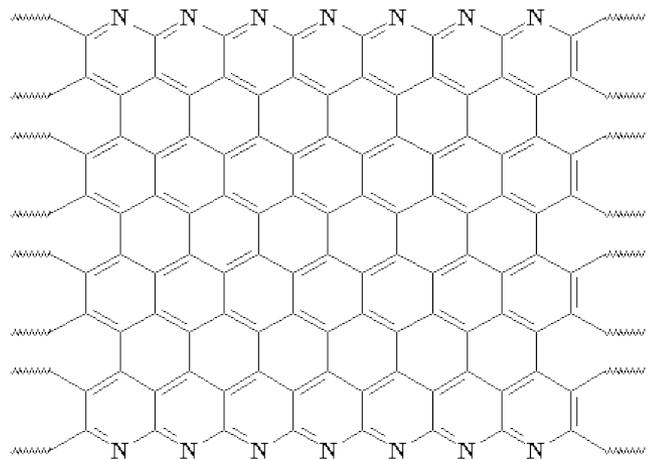


# Fibre di carbonio

Condensazione ed eliminazione dell'azoto:



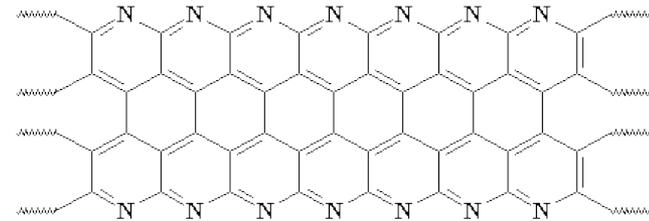
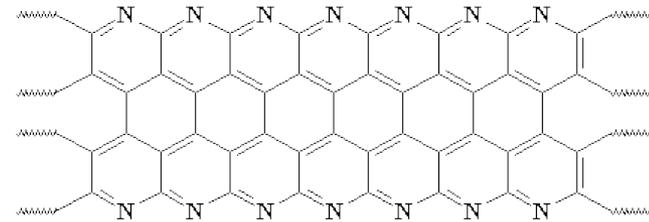
↓  
still more heat,  
600 to 1300 °C



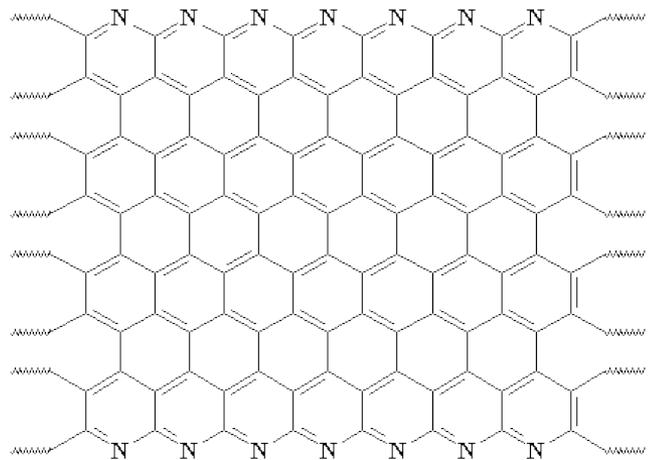
+ N<sub>2</sub> gas

# Fibre di carbonio

Condensazione ed eliminazione dell'azoto:  
(grafitizzazione)

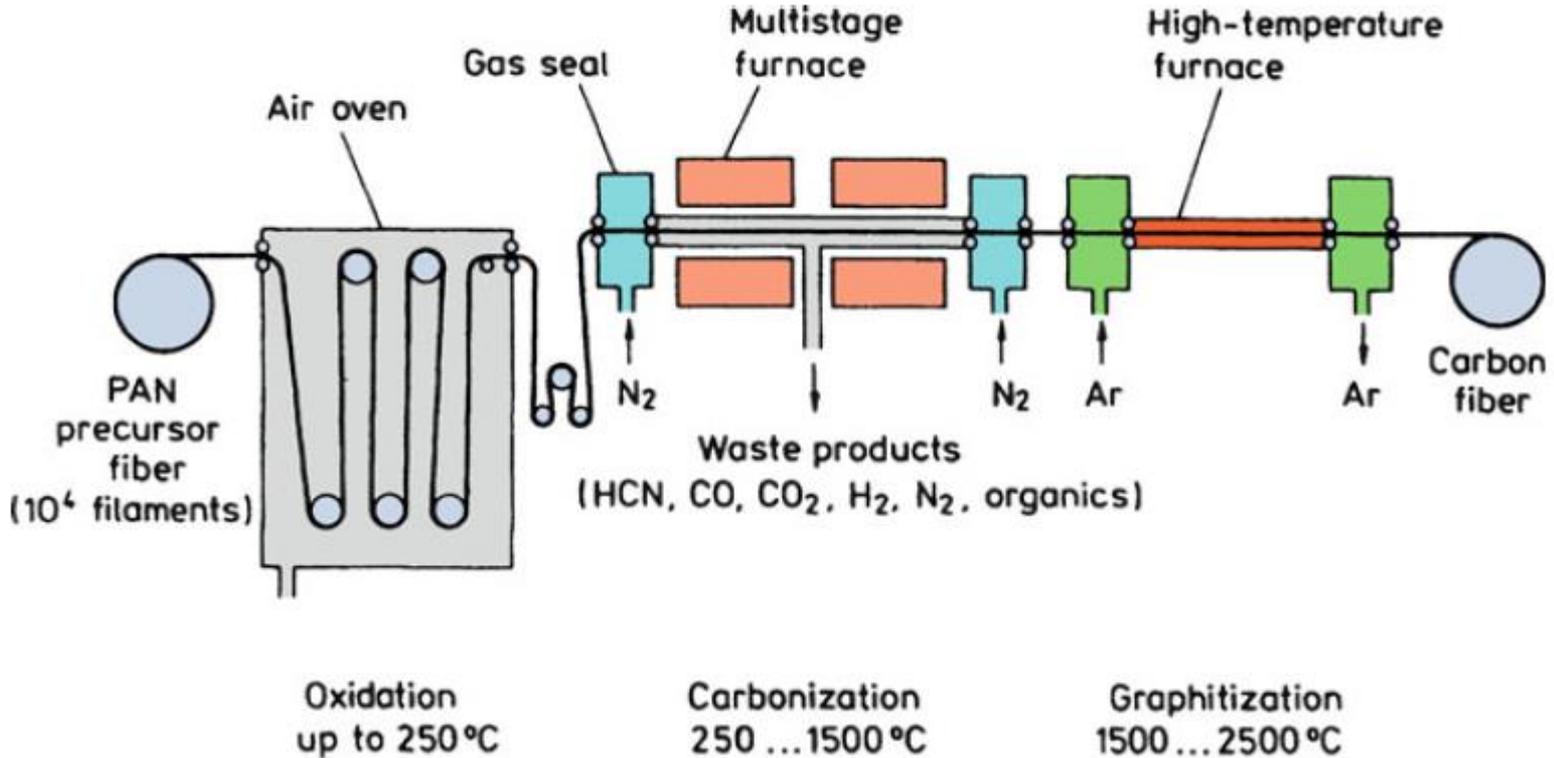


↓ still more heat,  
600 to 1300 °C



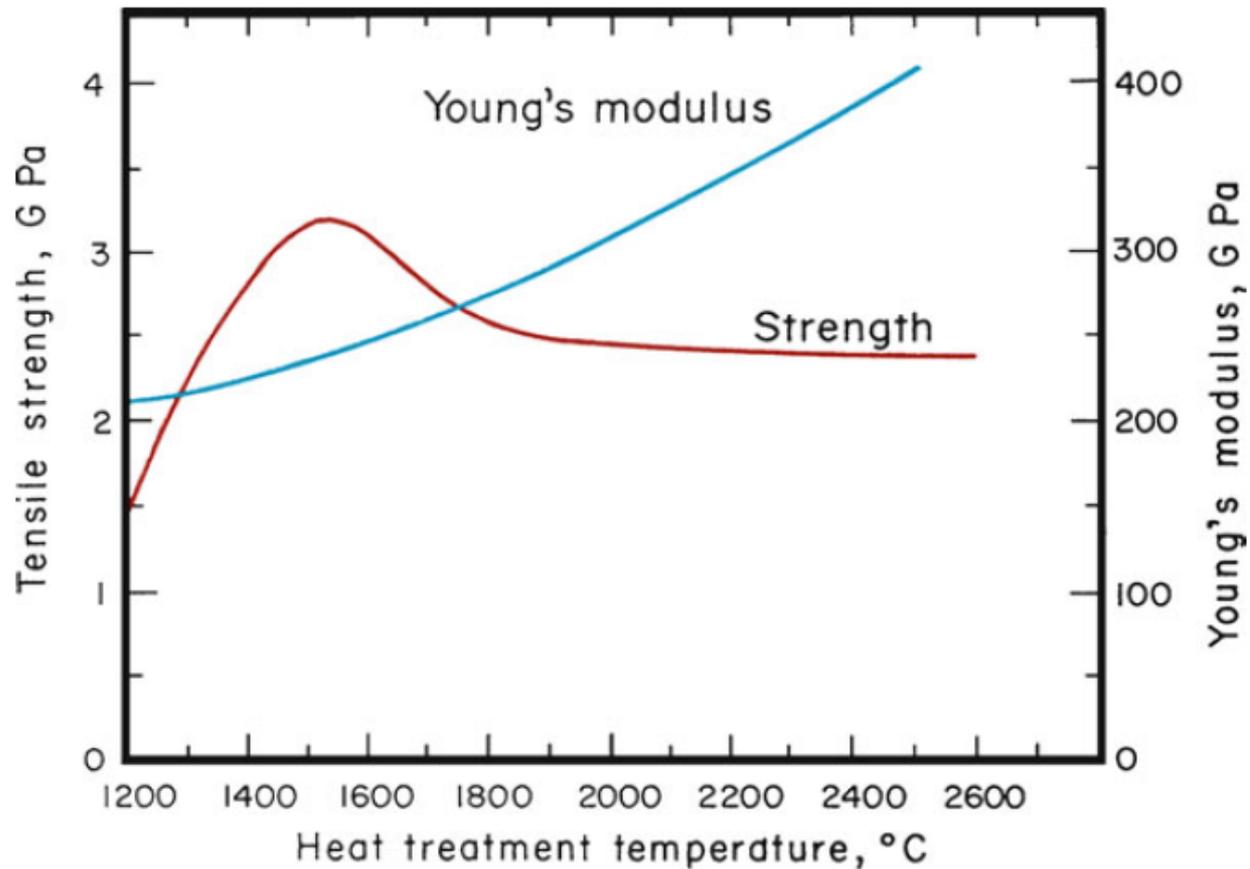
+ N<sub>2</sub> gas

# Fibre di carbonio



# Fibre di carbonio

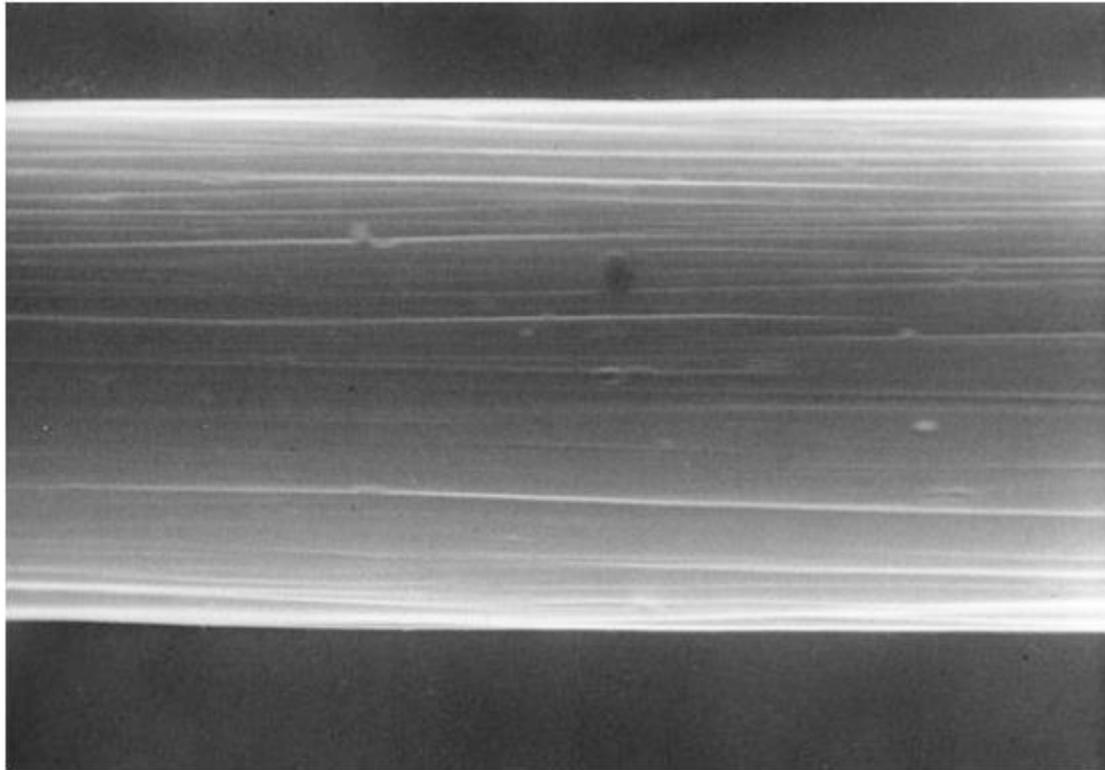
Lo stadio finale può essere effettuato anche allungando le fibre a caldo.





## Fibre di carbonio

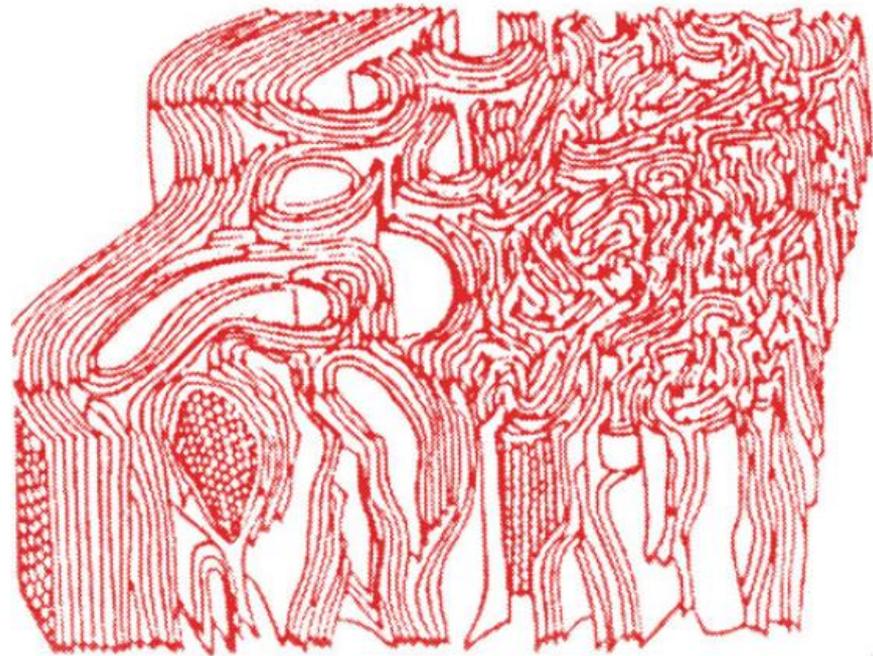
La morfologia esterna delle fibre C-PAN è generalmente quella della fibra di partenza:





## Fibre di carbonio

La morfologia interna è caratterizzata, indicativamente, dalla presenza di «nastri» di grafite disposti prevalentemente in direzione longitudinale rispetto all'asse della fibra.





# Fibre di carbonio

Le fibre di carbonio possono essere ottenute anche a partire da:

- Rayon (cellulosa) – resa più bassa, orientazione mediante deformazione ad alta temperatura.
- Pece – buona resa, basso costo, orientazione mediante spinning

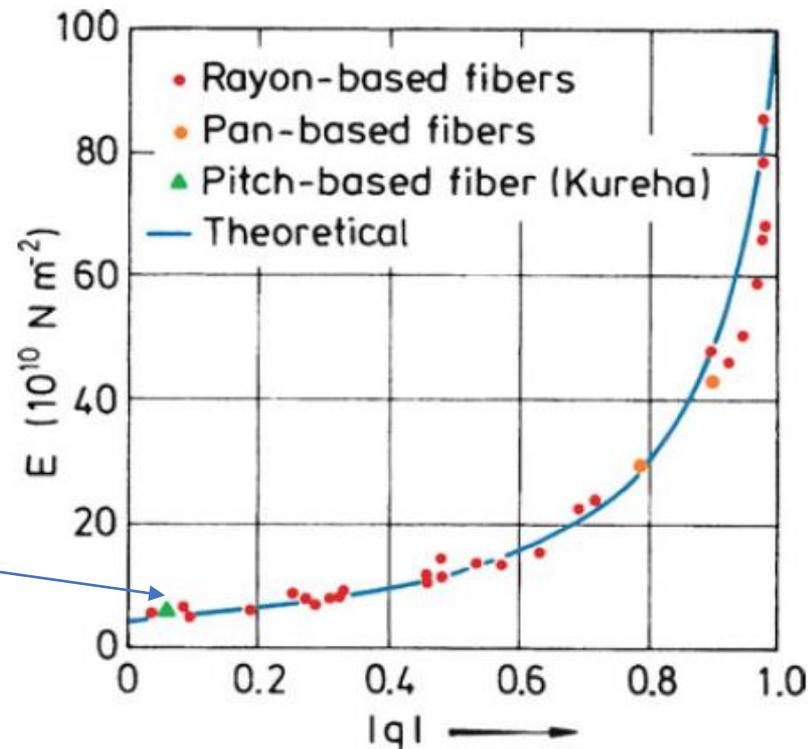
Le loro caratteristiche sono inferiori, così come il costo delle materie prime.

# Fibre di carbonio

Le proprietà variano a seconda del precursore e del processo utilizzato, tipicamente:

- densità 1.6-2.0 g/cm<sup>3</sup> (PAN: 1.14-1.19 g/cm<sup>3</sup>)
- Il modulo elastico dipende dal grado di orientamento (T di grafitizzazione, precursore):

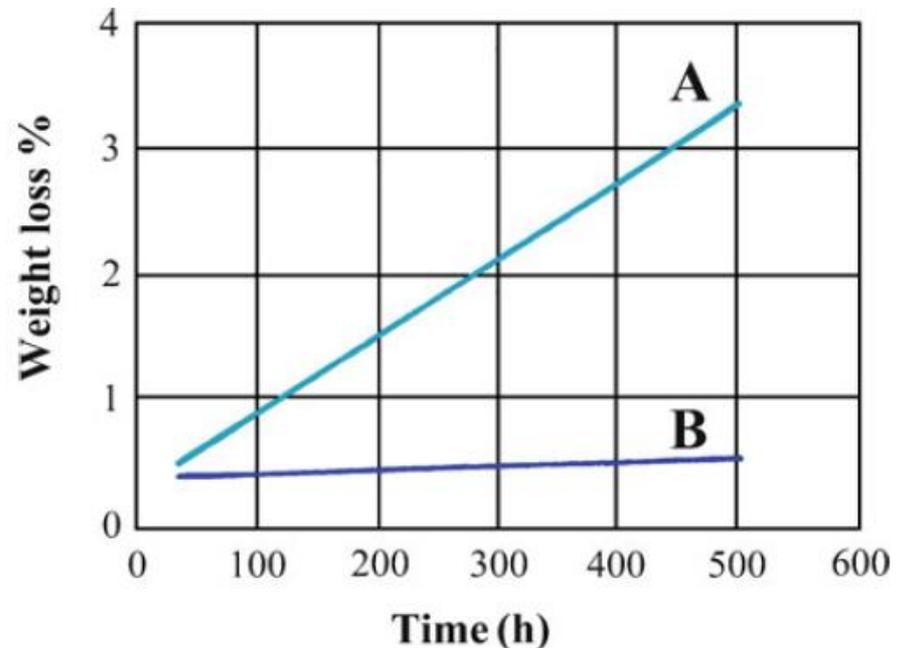
Isolamento  
Riempimento



# Fibre di carbonio

Per quanto riguarda le fibre C-PAN:

- HT: High Tensile (modulo basso, 200-300 GPa), è maggiore anche l'allungamento a rottura.
  - HM: High Modulus (modulo ~400 GPa)
  - SHT, SHM
  
  - Resistenza alla temperatura
- A: fibre a basso modulo  
B: fibre ad alto modulo





# Fibre di carbonio

## Tabella comparativa delle proprietà

Precursor	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Young's modulus (GPa)	Electrical resistivity (10 <sup>-4</sup> Ω cm)
Rayon <sup>a</sup>	1.66	390	10
Polyacrylonitrile <sup>b</sup> (PAN)	1.74	230	18
Pitch (Kureha)			
LT <sup>c</sup>	1.6	41	100
HT <sup>d</sup>	1.6	41	50
Mesophase pitch <sup>e</sup>			
LT	2.1	340	9
HT	2.2	690	1.8
Single-crystal <sup>f</sup> graphite	2.25	1,000	0.40

<sup>a</sup>Union Carbide, Thormel 50

<sup>b</sup>Union Carbide, Thormel 300

<sup>c</sup>LT low-temperature heat-treated

<sup>d</sup>HT high-temperature heat-treated

<sup>e</sup>Union Carbide type P fibers

<sup>f</sup>Modulus and resistivity are in-plane values

Source: Adapted with permission from Singer (1979)



## Fibre di carbonio

- CTE: le fibre di C sono fortemente anisotropiche:

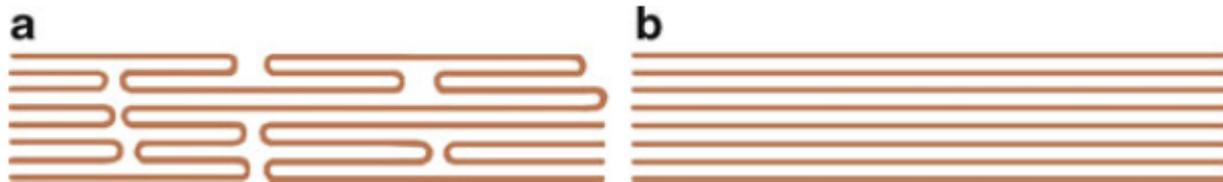
$$\alpha_l \approx 5.5 \text{ a } 8.4 * 10^{-6} K^{-1}$$

$$\alpha_t \approx -0.5 \text{ a } -1.3 * 10^{-6} K^{-1}$$

Resistenza a compressione: circa la metà di quella a trazione (comunque 10 volte meglio del Kevlar).

## Fibre polimeriche

- In genere, la struttura di un polimero è del tipo «random coil» (spaghetti) o parzialmente cristallina.
- Il modulo elastico dei polimeri ha normalmente un ordine di grandezza di 10 GPa.
- Con un processo di «stiratura» a caldo o a freddo, è possibile aumentare il modulo elastico sino a 70-80 GPa.
- Per aumentare ulteriormente il modulo elastico, le catene polimeriche non devono essere solamente orientate, ma anche estese lungo la direzione di applicazione dello sforzo ed impacchettate in una struttura ordinata. La possibilità di ottenere un materiale con questa struttura dipende dalla capacità del polimero di cristallizzare (fattore chimico) e dal processo utilizzato.





## Fibre polimeriche

- La temperatura utilizzata nei processi di stiramento delle fibre non deve essere né troppo bassa (creazione di vuoti), né troppo alta (deformazione senza effetto di allineamento molecolare).
- Per ottenere un materiale con modulo elastico superiore a 70 GPa servono, in ogni caso, rapporti di stiro molto elevati.

In generale, gli approcci possibili sono di due tipi:

1. stiramento a caldo di polimeri caratterizzati da una ben precisa distribuzione dei pesi molecolari.
2. Estrusione di un cristallo liquido polimerico. Questo approccio viene utilizzato, in particolare, quando le catene polimeriche hanno un comportamento del tipo rigid-rod.



## Fibre di UHMWPE

UHMWPE = Ultra High Molecular Weight Polyethylene

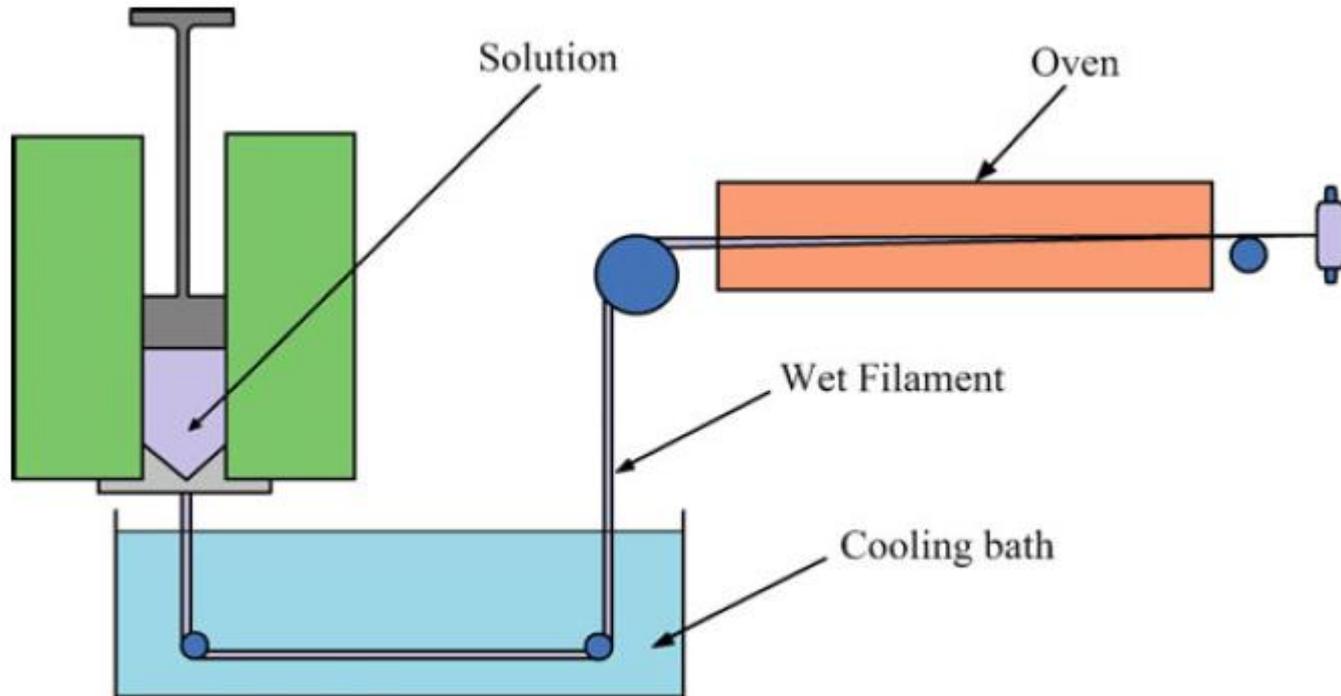
Sono fibre altamente cristalline, dotate di elevata rigidità e resistenza meccanica.

- ✓ Le fibre di PE prodotte mediante stiramento e cristallizzazione dal fuso (PMM: 1E4-1E5 UMA), con elevati rapporti di stiro possono raggiungere un modulo elastico intorno ai 70 GPa, molto lontano dal valore teorico. Il motivo è che si ottiene un orientamento, ma non un'estensione delle catene.
- ✓ La produzione di fibre di PE a partire da un gel di catene ad alto peso molecolare (> 1E6 UMA) ha consentito di ottenere fibre dotate di modulo elastico sino a 200 GPa (Dyneema, Spectra, ecc.)



## Fibre di UHMWPE

Di solito si usa, come materiale di partenza, HDPE perché ha meno branching ed un elevato grado di cristallinità.





## Fibre di UHMWPE

- Solventi: alifatici, come ad es. olio di paraffina.
- Concentrazione: 5-10%, per evitare eccessivo entanglement.
- Temperatura: intorno ai 150 °C
- All'uscita della filiera, la soluzione si raffredda e forma un gel, che viene ulteriormente raffreddato in acqua. In questa fase, la struttura è lamellare, del tipo folded-chain. Il solvente separa le lamelle, che tuttavia sono ancorate le une alle altre da fenomeni di entanglement, formando quindi un gel.
- E' proprio l'entanglement tra lamelle che consente di stirare il gel, con rapporti che possono arrivare anche a 200:1 (il massimo rapporto di stiro è determinato dal livello di entanglement e quindi dalla concentrazione della soluzione di partenza).
- Lo stiramento viene effettuato a temperature intorno a 120 °C.
- La velocità di produzione è bassa (1.5 m/min).



# Fibre di UHMWPE

Proprietà tipiche delle fibre di UHMWPE:

Property	Spectra 900	Spectra 1000
Density (g/cm <sup>3</sup> )	0.97	0.97
Diameter (μm)	38	27
Tensile strength (GPa)	2.7	3.0
Tensile modulus (GPa)	119	175
Tensile strain to fracture (%)	3.5	2.7

- La densità massima teorica del PE è 0.9979 g/cm<sup>3</sup>.
- In ogni caso, si tratta di un materiale con densità molto bassa (galleggia se posto in acqua).
- Il modulo elastico è inferiore a quello delle fibre aramidiche, ma il rapporto modulo elastico/densità è superiore del 30-40%.
- T di lavoro inferiore a 150 °C.



## Fibre di UHMWPE

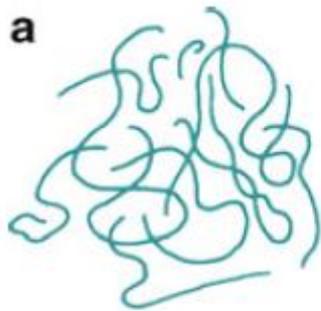
- Fibre con superficie molto liscia, in conseguenza dello stiramento.
- Bassa energia superficiale, adesione alla matrice scarsa se non trattate.
- Esempi di trattamenti superficiali: plasma freddo, corona, trattamento chimico con perossidi. In ogni caso, questi trattamenti riducono le proprietà meccaniche.

Il grado di cristallinità delle fibre di UHMWPE è del 90-95% (nel PE, densità e cristallinità sono strettamente correlate).

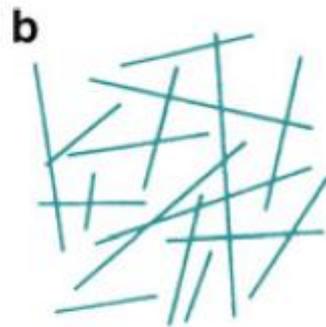
Resistenza al creep bassa.

## Fibre aramidiche

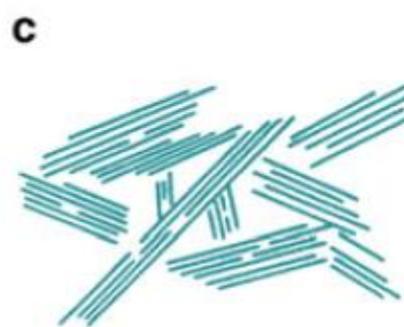
- Si tratta di fibre poliammidiche (es. Nylon 66) aromatiche. Definizione: almeno l'85% dei legami ammidici sono collegati direttamente a due anelli aromatici.
- Nomi commerciali: Kevlar (meta), Nomex (para), ecc.
- Catene rigide con struttura rod-like, da cui alta  $T_g$  e bassa solubilità. Per questo motivo, è difficile produrre fibre dal fuso o da un dope.
- Fibre filate da soluzioni nematiche.



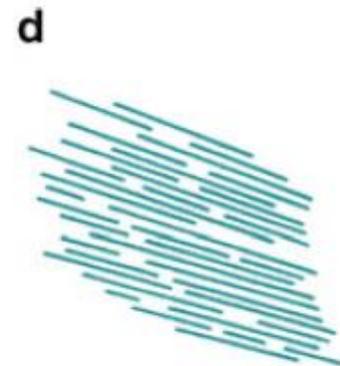
Random  
coils



Random  
rods



Liquid crystalline  
state



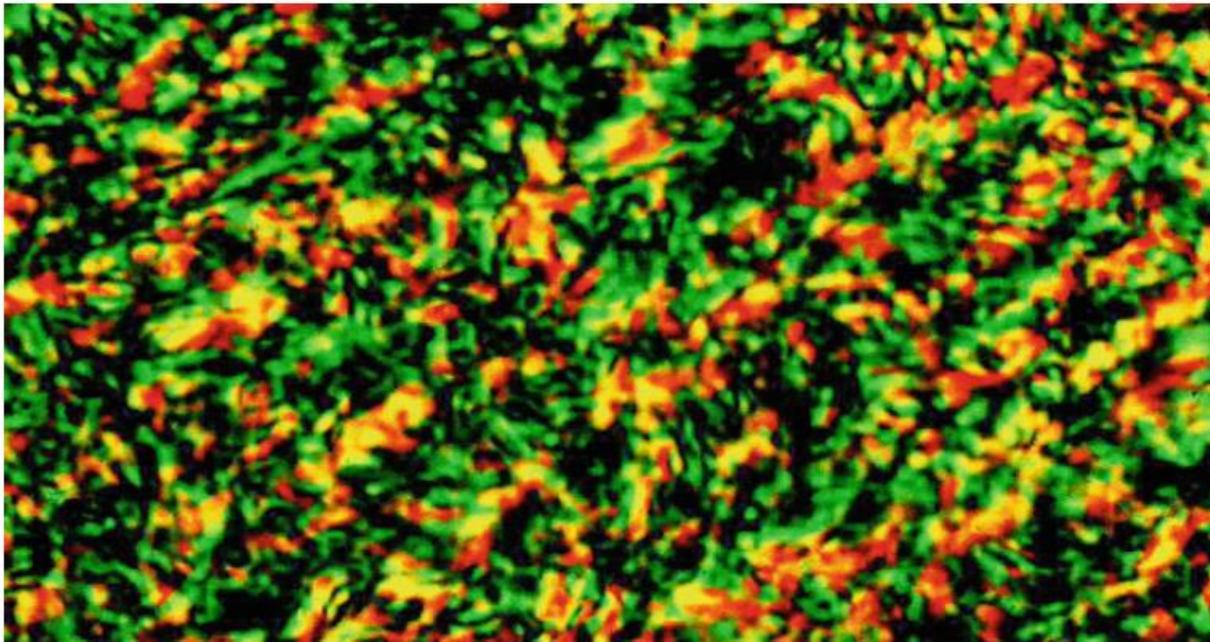
Nematic liquid  
crystal



## Fibre aramidiche

Le soluzioni caratterizzate dalla presenza di cristalli liquidi sono stabilizzate dalla presenza di alte concentrazioni di polimero. Queste soluzioni sono birifrangenti (anisotropia).

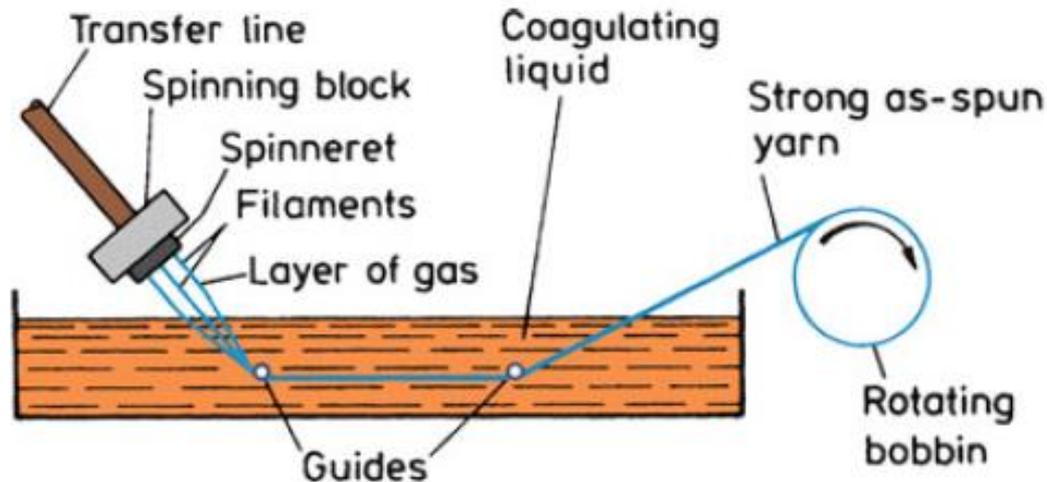
Per produrre il Kevlar, come solvente si usa l'acido solforico ( $H_2SO_4$ ).



## Fibre aramidiche

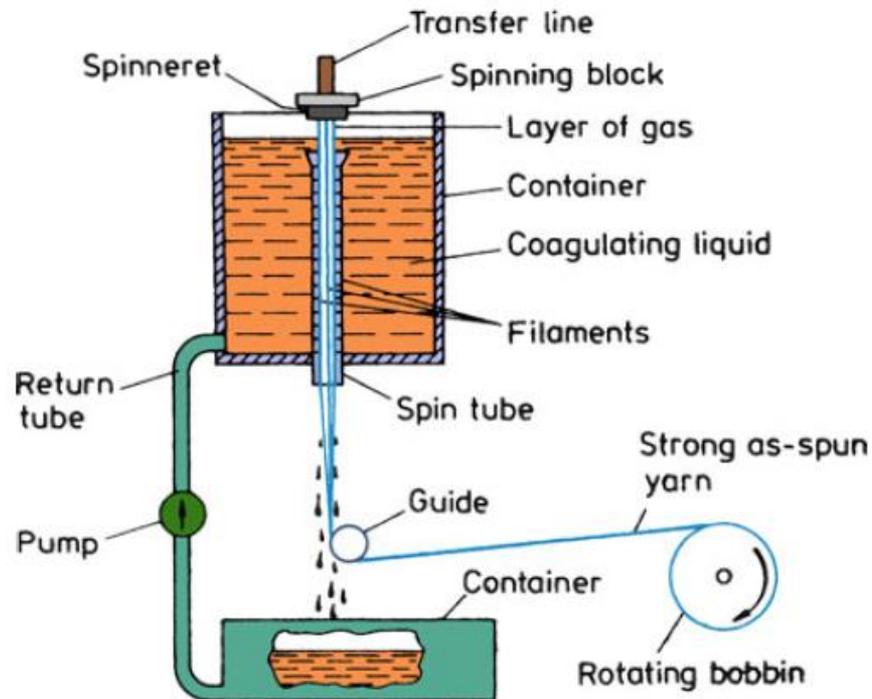
- Durante l'estrusione attraverso la filiera, gli sforzi di taglio tendono ad allineare ulteriormente i cristalli lungo l'asse della fibra.
- Le condizioni nelle quali una soluzione nematica può formarsi sono rappresentabili in un diagramma di stato.

Il metodo di produzione utilizzato per le fibre aramidiche è il dry-jet wet spinning.



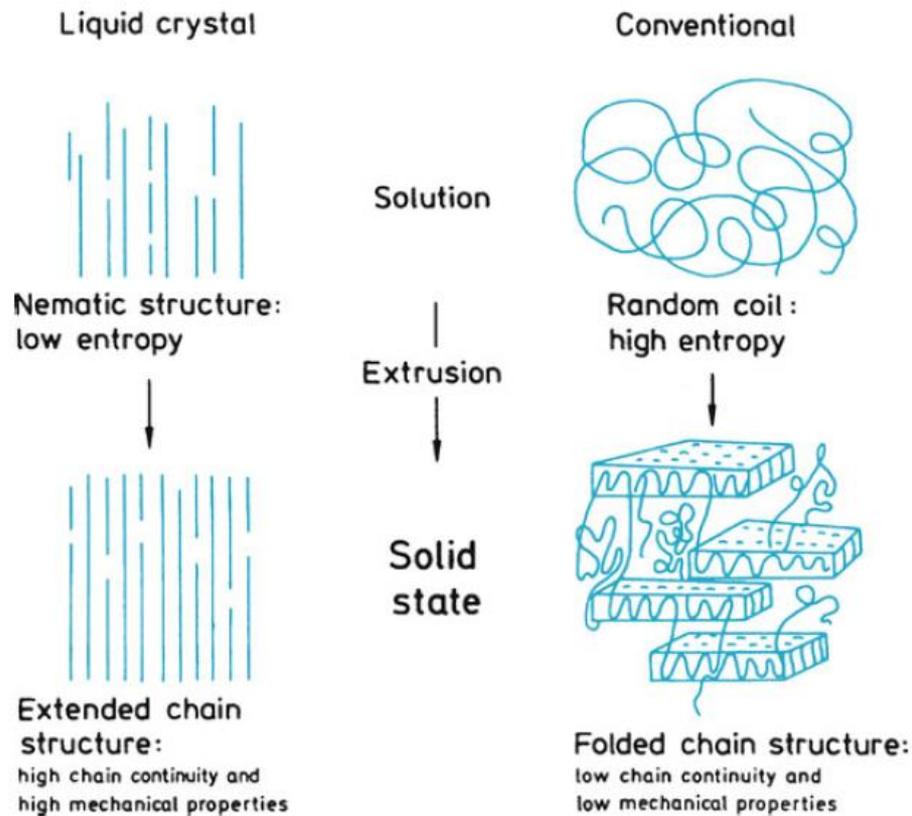
## Fibre aramidiche

Il polimero viene polverizzato, lavato ed asciugato, miscelato con oleum ed estruso attraverso una filiera a circa 100 °C. All'uscita degli orifizi, i getti di soluzione incontrano uno strato di aria di circa 1 cm prima di entrare in acqua fredda (0 - 4 °C). Le fibre solidificano in aria e l'acido viene rimosso nel bagno di coagulazione.



# Fibre aramidiche

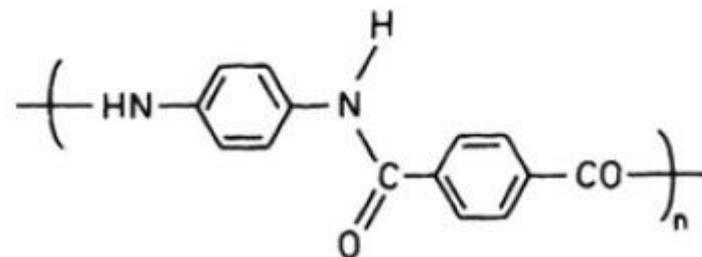
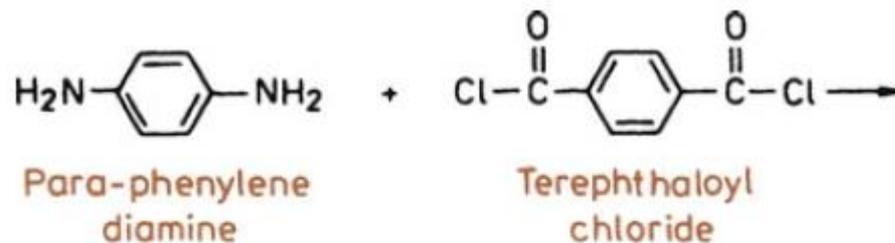
Confronto tra una filatura dry-jet wet di soluzioni nematiche ed una tradizionale.



## Fibre aramidiche

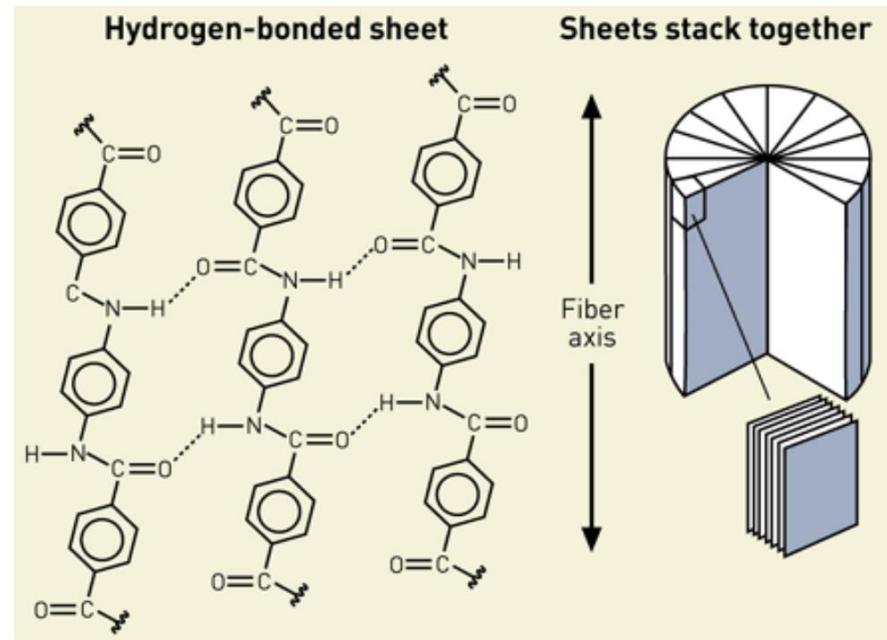
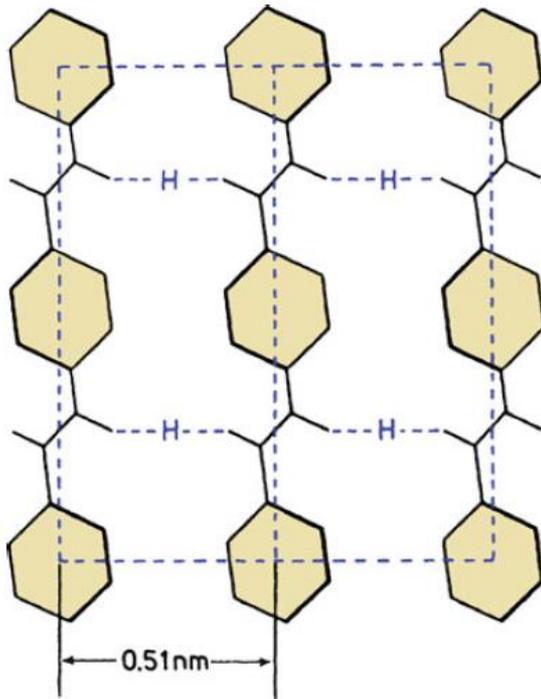
I domini cristallini vengono allineati nella filiera capillare e nel transito in aria, in modo tale che i filamenti as-spun posseggano già un'elevata cristallinità. Lo strato di aria garantisce la possibilità di utilizzare temperature del dope più elevate, soluzioni più concentrate e più alte velocità di estrusione (produttività).

All'uscita del bagno di coagulazione, le fibre vengono lavate, asciugate, avvolte in una bobina ed eventualmente sottoposte ad ulteriori trattamenti termici e/o chimici.



# Fibre aramidiche

Le fibre di Kevlar hanno forti legami primari lungo l'asse delle singole catene polimeriche e legami intermolecolari più deboli (legami idrogeno). Per questo motivo, le proprietà del Kevlar sono fortemente anisotrope.



## Fibre aramidiche

Le fibre di Kevlar hanno forti legami primari lungo l'asse delle singole catene polimeriche e legami intermolecolari più deboli (legami idrogeno). Per questo motivo, le proprietà del Kevlar sono fortemente anisotropiche.

- Il modulo di taglio longitudinale è basso.
- Proprietà a compressione e trasversali scarse.

Funi, protezioni  
balistiche, ecc.      Impregnazione

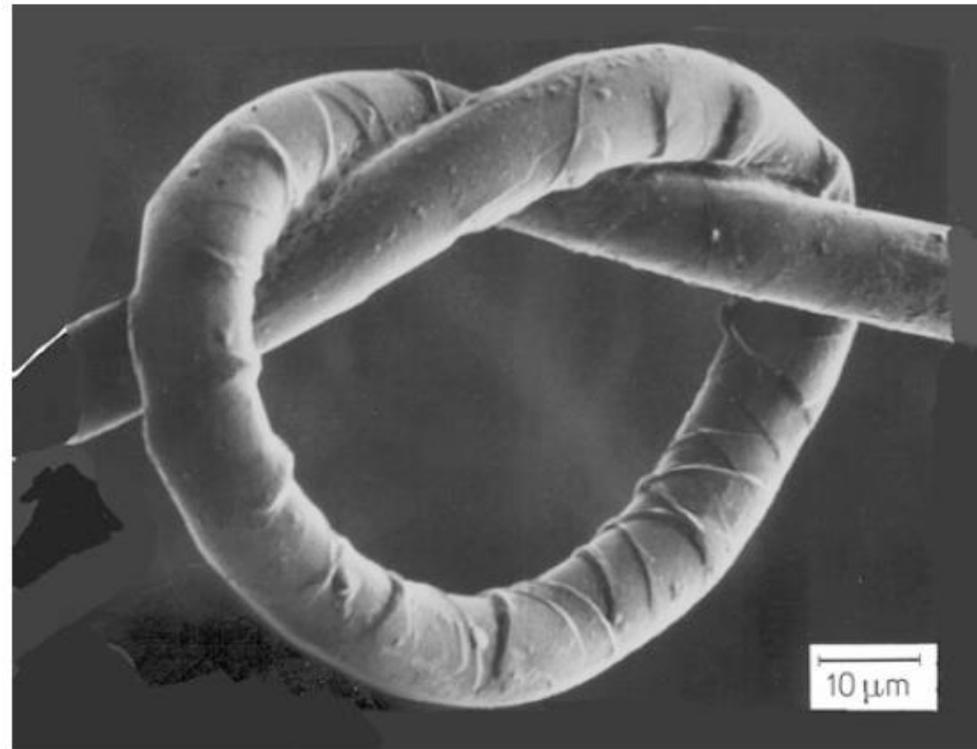


Property	K 29	K 49	K 119	K 129	K 149
Density (g/cm <sup>3</sup> )	1.44	1.45	1.44	1.45	1.47
Diameter (μm)	12	12	12	12	12
Tensile strength (GPa)	2.8	2.8	3.0	3.4	2.4
Tensile strain to fracture (%)	3.5–4.0	2.8	4.4	3.3	1.5–1.9
Tensile modulus (GPa)	65	125	55	100	147
Moisture regain (%) at 25 °C, 65 % RH	6	4.3	–	–	1.5
Coefficient of expansion (10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> )	–4.0	–4.9	–	–	–



## Fibre aramidiche

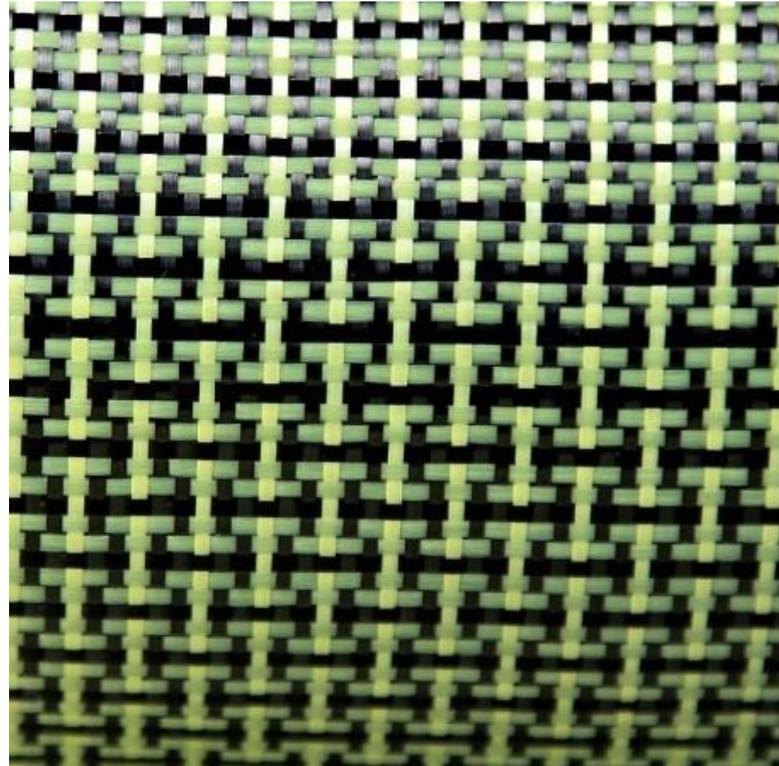
Quando vengono sottoposte a sforzi di compressione, le fibre di Kevlar mostrano fenomeni di instabilità elastica (buckling).



# Fibre aramidiche

Altre caratteristiche del Kevlar:

- buona capacità di smorzamento delle vibrazioni.
- Sensibilità agli UV (modifica del colore, decadimento delle proprietà meccaniche).





# Fibre ceramiche

Le citiamo solo per completezza.

- Fibre di ossidi ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$ , ecc.).
- Fibre di materiali ceramici non-ossidi ( $\text{SiC}$ , ecc.).

# Altre fibre

- Fibre di basalto.
- Fibre di origine vegetale.

## I rinforzi

- Fibre di vetro
- Fibre di carbonio
- Fibre polimeriche

## Le matrici

- Matrici polimeriche
- Matrici metalliche (cenni)
- Matrici ceramiche (cenni)

## Interfacce

## I compositi a matrice polimerica (PMC)

- Processi
- Interfacce
- Struttura e proprietà
- Applicazioni
- Riciclo

## Micromeccanica dei materiali compositi

## Macromeccanica dei materiali compositi

## Resistenza, fatica e creep

