

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale

Relazione per la prova finale

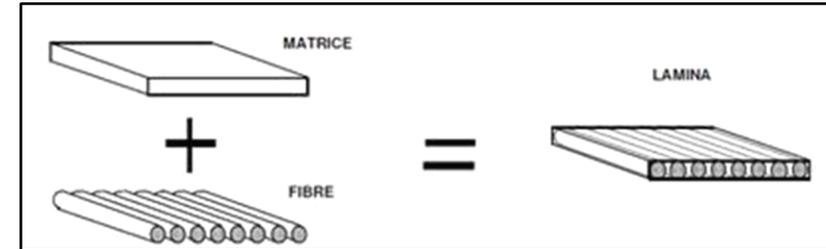
**«Caratteristiche chimico-fisiche e meccaniche di
materiali compositi a matrice polimerica contenenti
fibre di carbonio»**

Tutor universitario: Prof.ssa Bertani Roberta

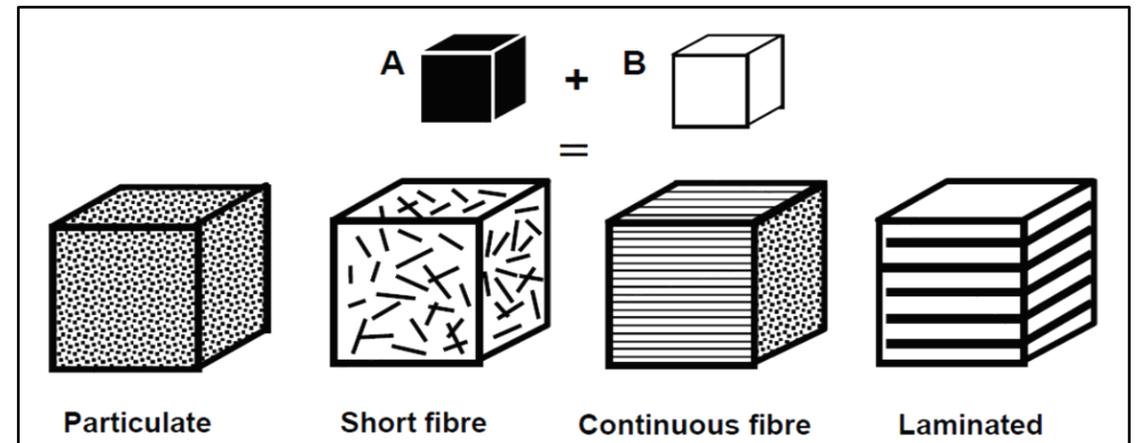
Laureando: *Andretta Gianluca*

Padova, 14/03/2022

- **Materiali compositi**
 - Compositi rinforzati con fibre
- **Matrici polimeriche**
 - Polimeri termoindurenti
 - Polimeri termoplastici
- **Fibre di carbonio**
 - Carbonio Pan
 - Carbonio Pitch
- **Produzione dei materiali compositi**



- Materiale composito: a livello microscopico consiste in due o più materiali diversi
- Classificati a seconda della geometria del materiale di rinforzo:
 - Compositi particellari
 - Compositi fibrosi
 - Fibre corte
 - Fibre continue
 - Compositi laminati



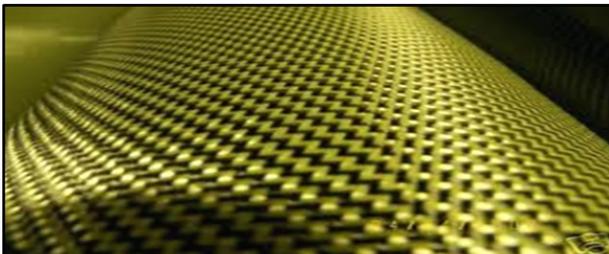
Panoramica delle differenti classi di materiali compositi

- Consistono in un materiale nel quale una serie di fibre, ad alta resistenza e modulo elastico, sono incorporate o legate ad una matrice che rimane distinta dalle fibre
- Esistono diverse tipologie di fibre rinforzanti

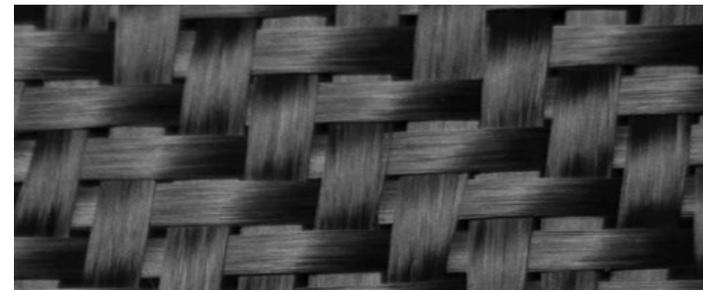
- **Fibre di vetro:** le più diffuse, varie tipologie.
Spessore di circa 10 μm



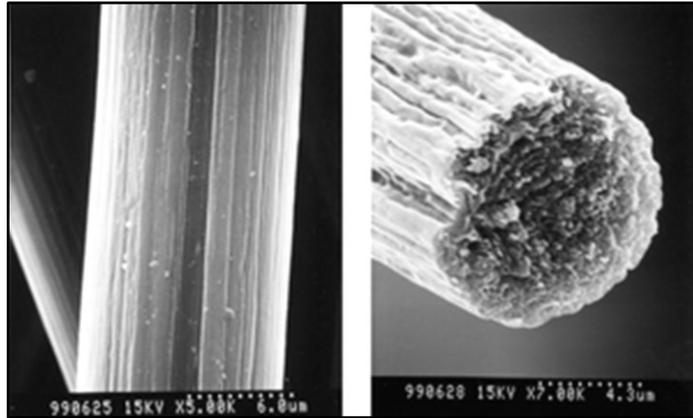
- **Fibre aramidiche:** kevlar, resistenti all'abrasione.
Spessore di circa 12 μm



- **Fibre di carbonio:** buonissima tenacità, anisotrope.
Spessore di circa 5-10 μm



- **Fibre di boro:** ottime proprietà, costo elevato.
Spessore di circa 100 μm



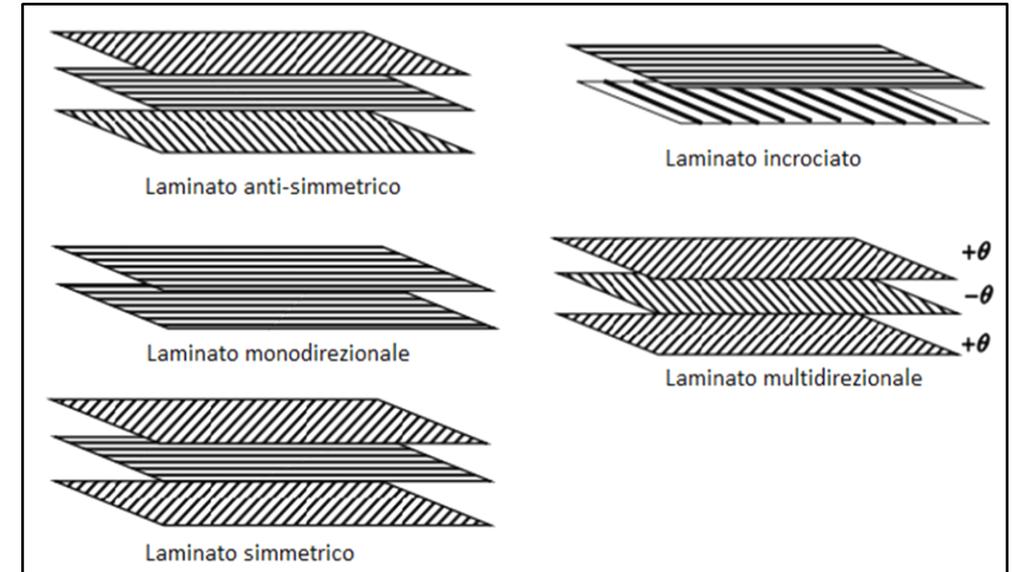
- **Fibre metalliche:** tenacità simile a materiali sfusi.
Diffuse in compositi ceramici



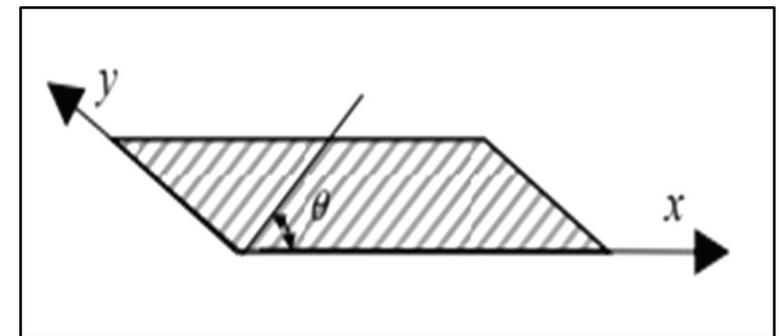
Fibre	Densità [g cm^{-3}]	E [GPa]	σ_r [MPa]	E/ρ	σ/ρ
Vetro E	2.5-2.6	72-80	3400	28.2-31.3	1333
Vetro S	2.46-2.49	85	4500	34	1818
Carbonio ad alto modulo	1.85	400	3000	216	1622
Carbonio ad alta resistenza	1.80	230	5000	128	2778
Kevlar 29	1.44	70	2800	49	1944
Kevlar 149	1.44	166	2200	115	1527

Confronto caratteristiche tra diverse tipologie di fibre

- Caratteristiche del composito dipendono dalla direzione delle lamine
- $[0/45/-45]$: indica un disposizione di $0^\circ/45^\circ/-45^\circ$
- $[0/\pm 45]_s$: indica un disposizione di $0^\circ/45^\circ/-45^\circ \mid -45^\circ/45^\circ/0^\circ$
- $[0/\pm 45]_{as}$: indica un disposizione di $0^\circ/45^\circ/-45^\circ \mid 45^\circ/-45^\circ/0^\circ$
- $[\pm 30/90]_2$: indica un disposizione di $30^\circ/-30^\circ/90^\circ/30^\circ/-30^\circ/90^\circ$
- $[0_2/\pm 45]$: indica un disposizione di $0^\circ/0^\circ/45^\circ/-45^\circ$

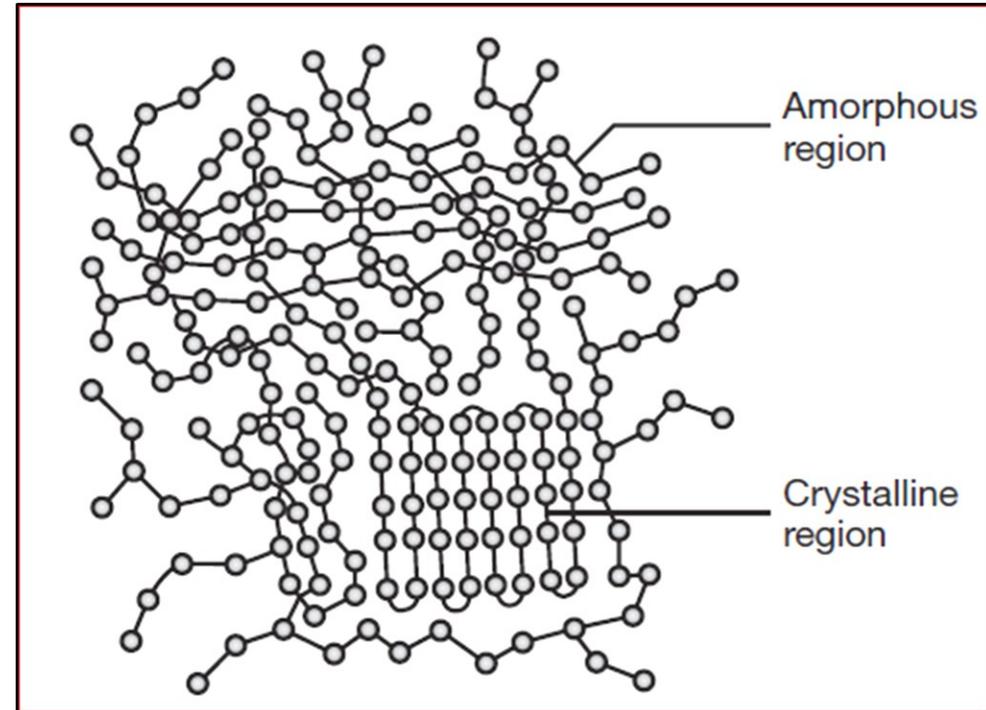


Esempi di possibili disposizioni lamine in un laminato



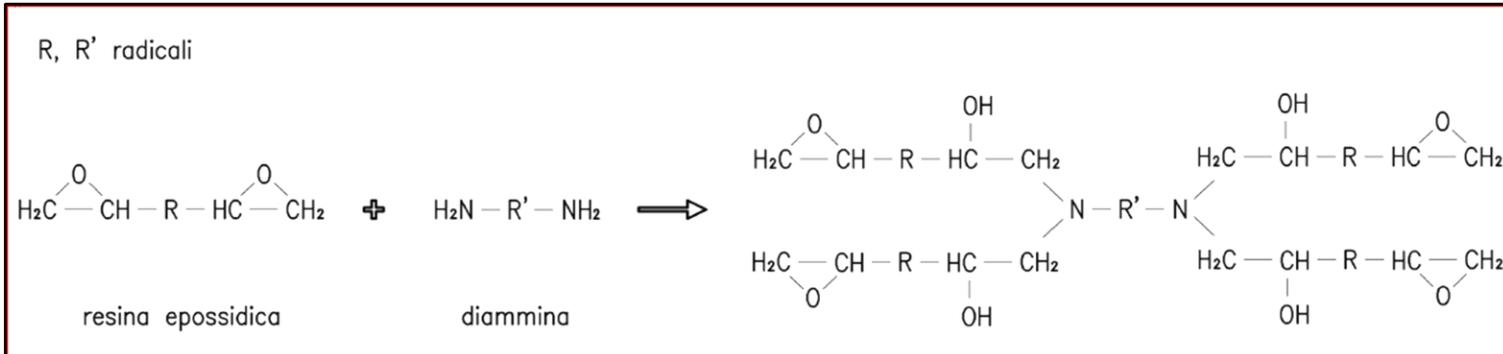
Direzione delle fibre in un sistema di coordinate x-y

- Polimero è definito come una molecola a catena lunga contenente uno o più unità ripetute di atomi, legati da legami covalenti molto intensi
- Polimero ha proprietà meccaniche che dipendono da:
 - Temperatura ambientale
 - Modalità applicazione del carico



Regioni amorphe e cristalline in un polimero

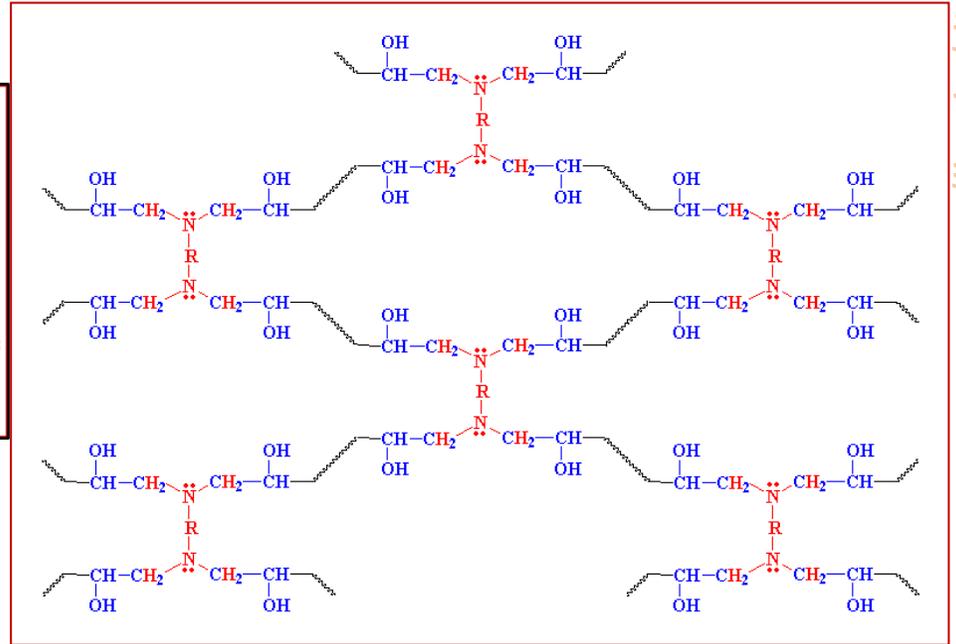
Resine epossidiche



Reticolazione di una resina epossidica tramite diammine

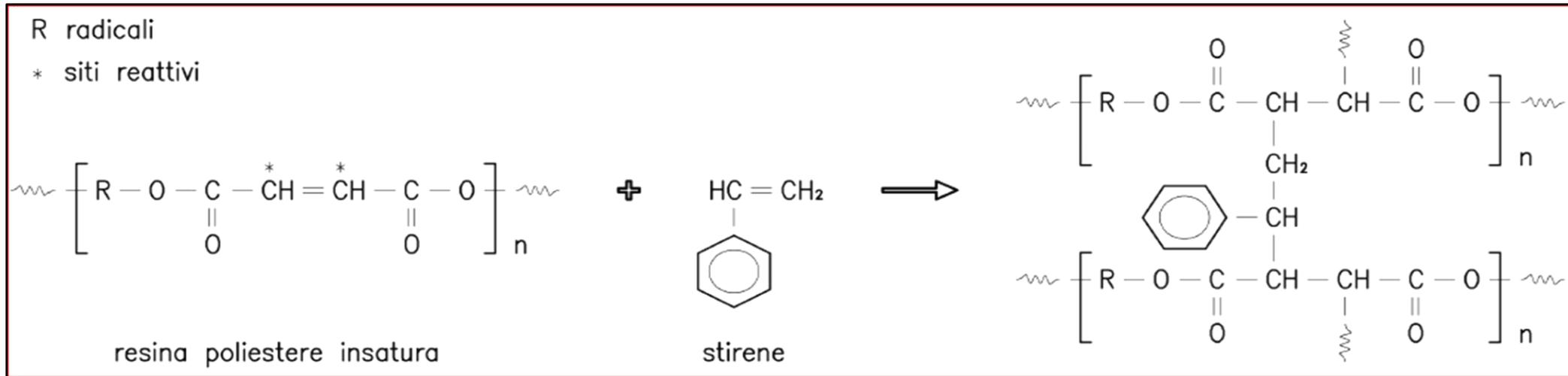
Materiale	ρ [g cm ⁻³]	E [GPa]	σ_t [MPa]	σ_c [MPa]	E/ ρ	σ/ρ
Epox-Vetro E	1.99	52	1103	490	26	554
Epox-Vetro S	1.99	59	1751	496	30	880
Epox-Carbonio HM	1.63	207	1276	1020	126	783
Epox-Carbonio HS	1.55	145	1482	1227	93	956
Epox-Kevlar 49	1.39	83	1310	290	60	942
Alluminio	2.76	69	572	-	25	207
Titanio	4.43	114	1103	-	26	249
Acciaio	8.01	207	1241-1379	-	26	162

Confronto compositi a matrice epossidica ed alcuni metalli



- Eccellente resistenza meccanica
- Eccellente resistenza chimica alla corrosione
- Stabilità dimensionale
- Tempi di reticolazione lunghi
- Proprietà dipendono dal grado di reticolazione

■ Resine poliestere insature

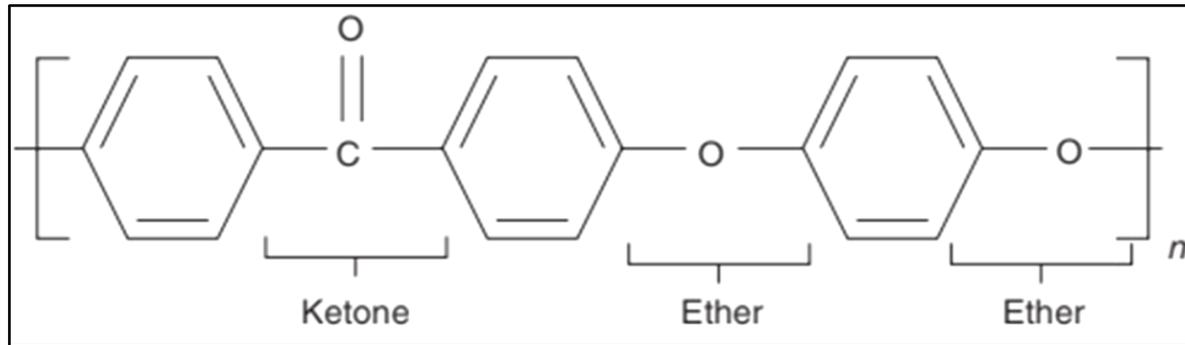


Reticolazione di una resina poliestere insatura con stirene

- Due tipologie:
 - Resina poliestere ortoftalica: scarsa resistenza chimica, alto assorbimento d'acqua
 - Resina poliestere isoftalica: buona resistenza chimica, basso assorbimento d'acqua

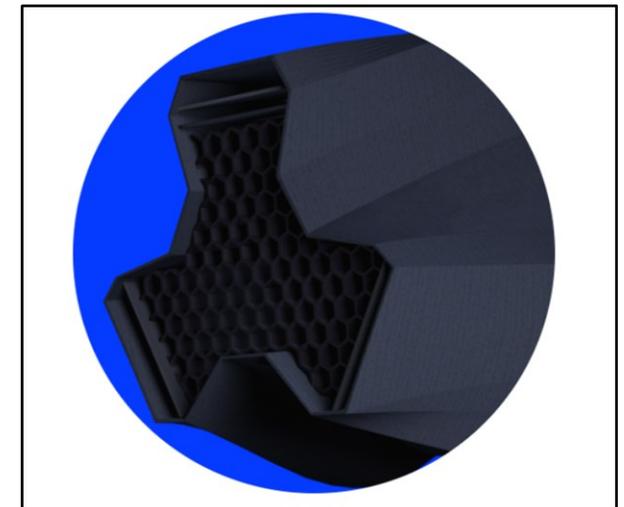
- Meno performanti delle resine epox, ma costo minore e tempo di reticolazione inferiore

- Peek o polietere etere chetone



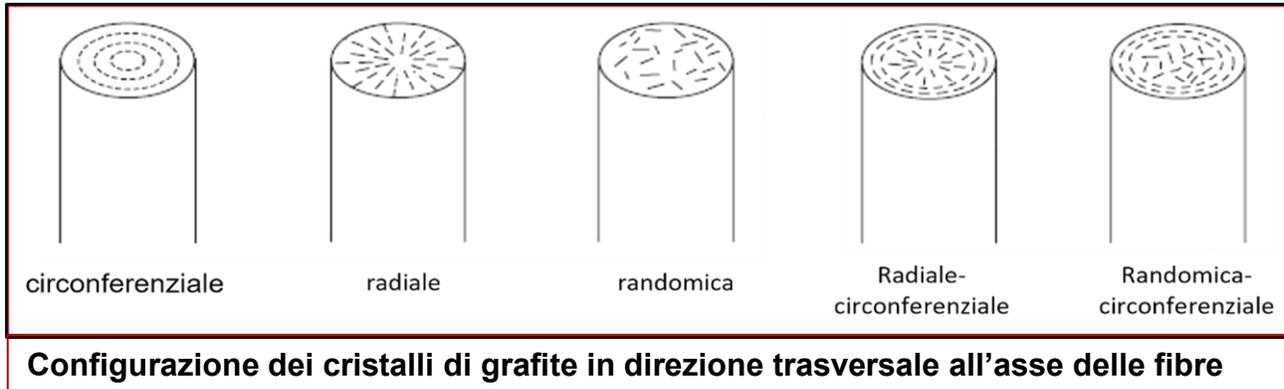
Peek

- Alta tenacità alla rottura, basso assorbimento d'acqua
- Se usato con le fibre di carbonio prende il nome di Composito Polimerico Aromatico (APC)

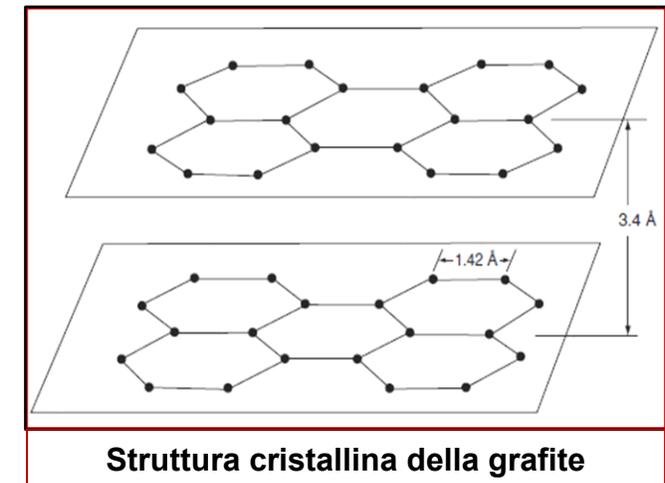


Carbon Peek

- Struttura cristallina allineata con l'asse della fibra
- In direzione trasversale orientamento struttura cristallina variabile



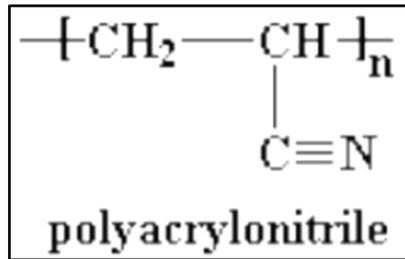
- Contengono miscela di carbonio amorfo e grafite
- Alto modulo elastico (207 GPa-1035 GPa)



Materiale	ρ [kg/m]	E [GPa]	σ_t [MPa]	ϵ [%]	σ/ρ [MPa/kg]
Carbonio ad alta resistenza	1800	230	5000	2.0	2.78
Carbonio ad alto modulo	1850	400	3000	0.9	1.62
Carbonio ad altissimo modulo	2100	700	1500	0.3	0.71
Acciaio FeB 44K	7850	210	540	20	0.07

Caratteristiche di varie tipologie di carbonio

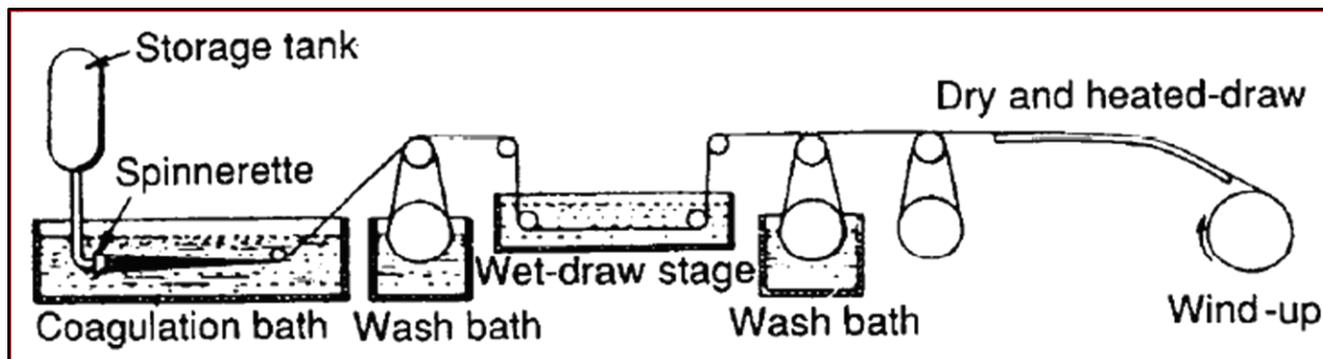
■ PAN



PAN

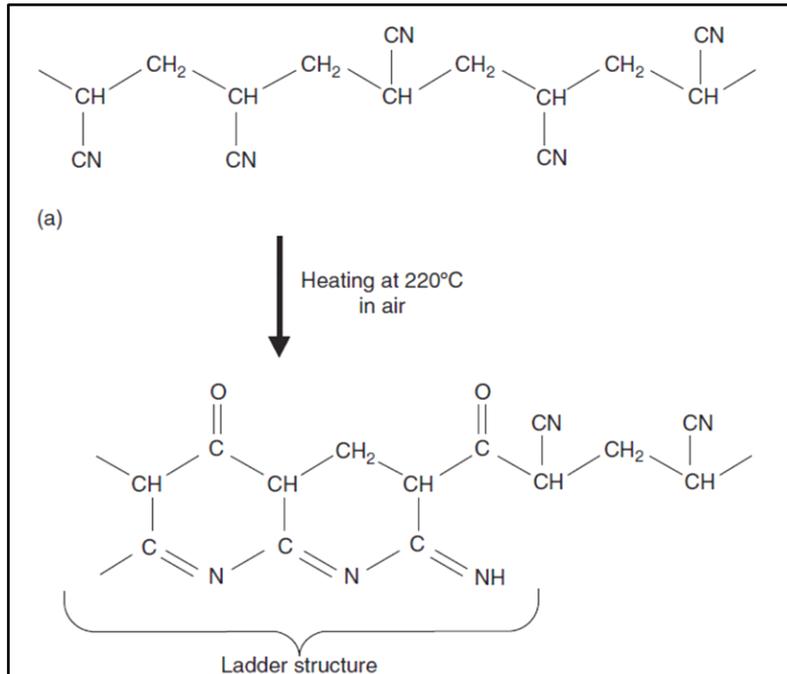
- Polimero atattico, lineare e contenente gruppi CN polarizzati
- Temperatura transizione vetrosa di circa 120°C
- Prodotto solitamente mediante *wet spinning*

■ Produzione fibre PAN



- PAN disciolto in un solvente polare
- Presenza di una filiera e vasca di coagulazione
- Molecole di PAN organizzate in fibrille orientate parallelamente all'asse della fibra

Stabilizzazione

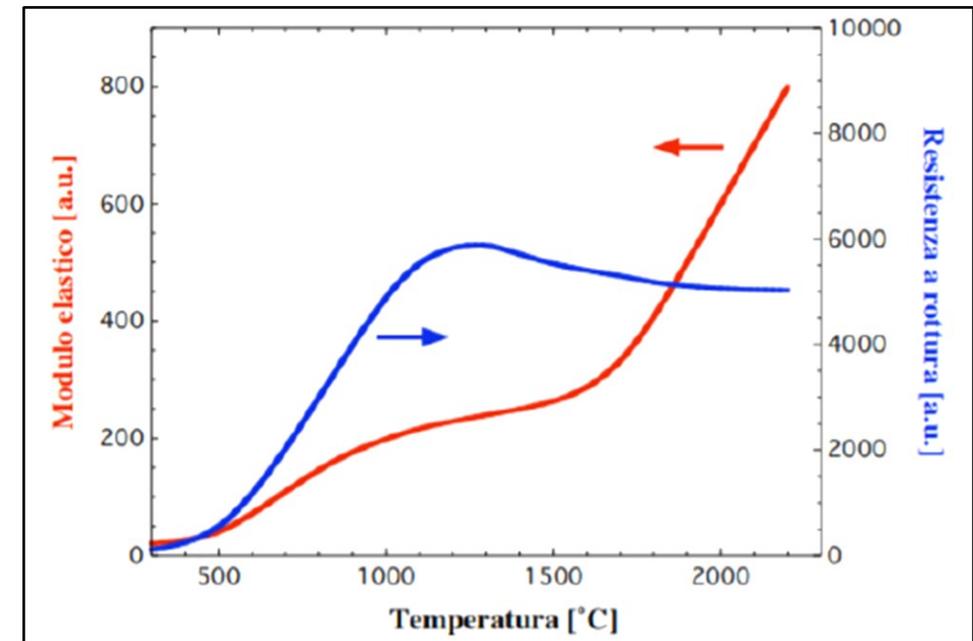


Struttura a scala ottenuta con la stabilizzazione

- Temperatura di circa 1000°C-2000°C
- Spariscono elementi non carbonici
- Caratteristiche meccaniche funzione della temperatura

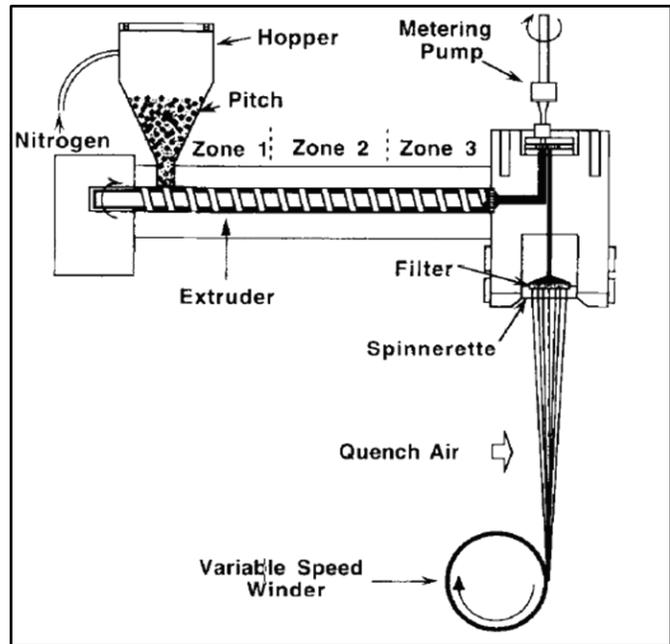
- Temperatura di circa 230°C-300°C
- Formazione di una struttura a scala più rigida
- Catene polimeriche devono allinearsi con direzione delle fibre

Carbonizzazione



Dipendenza proprietà meccaniche dalla temperatura

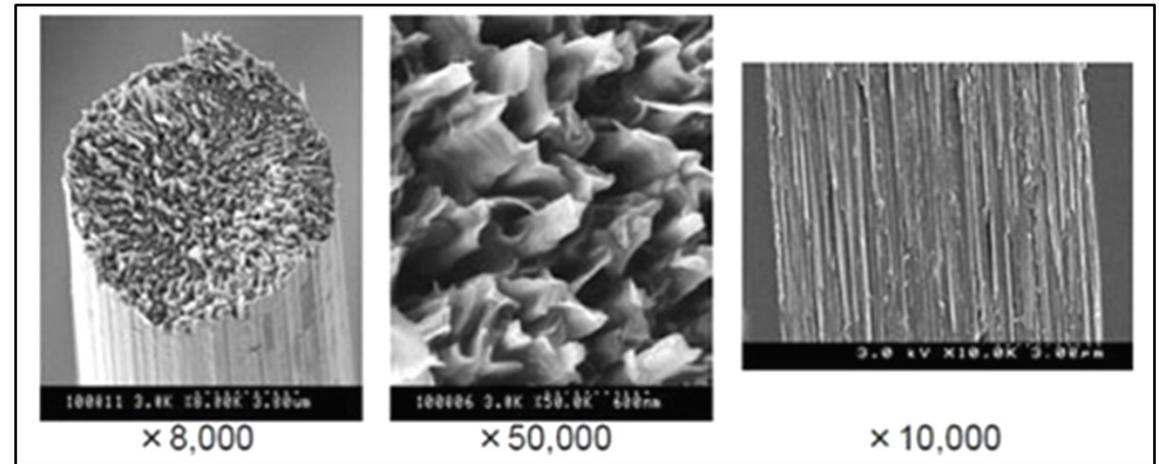
- Il pitch o pece è il residuo della distillazione del catrame o del petrolio e consiste in migliaia di idrocarburi aromatici



Schema riassuntivo produzione precursore fibre pitch

Produzione delle fibre

- Si scalda la pece isotropica a circa 300°C-450°C
- Pece mesofase: cristalli liquidi con ordine molecolare intermedio tra quello dei cristalli e quello di un liquido



Fibre Pitch

Stabilizzazione

- Temperatura di circa 230°C-280°C
- Deve reticolare le fibre
- No tensione meccanica applicata

Carbonizzazione

- Temperatura di circa 1500°C-3000°C
- Eliminazione elementi non carbonici
- Diametro finale circa 10 μm

Caratteristica	Fibre da PAN	Fibre da Pece
Tenacità [GPa]	1.8-7.0	1.4-3.0
Modulo Elastico E [GPa]	230-540	140-820
Allungamento a rottura [%]	0.4-2.4	0.2-1.3
Densità [kg m^{-3}]	1.75-1.95	2.0-2.2

Confronto caratteristiche delle Fibra da Pan e delle Fibre da Pece

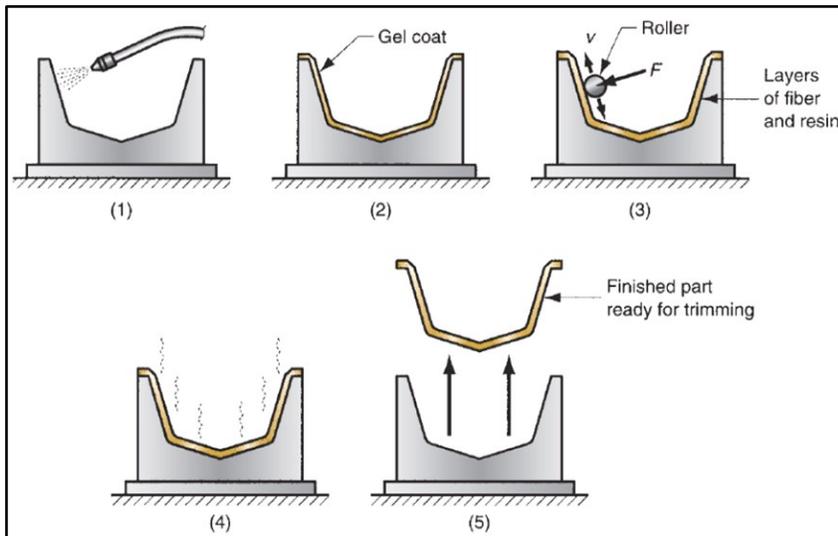
Proprietà meccaniche dipendono da precursore utilizzato

- **Fibre PAN costo maggiore, ma le più utilizzate:**
 - Tenacità maggiore e maggiore resistenza a rottura
 - Struttura turbostratica

- **Fibre Pitch costo minore, meno diffuse:**
 - Modulo elastico più elevato, minore resistenza a rottura
 - Struttura grafiteca

Per entrambe, maggiore è il valore del modulo elastico, minore è la resistenza a rottura

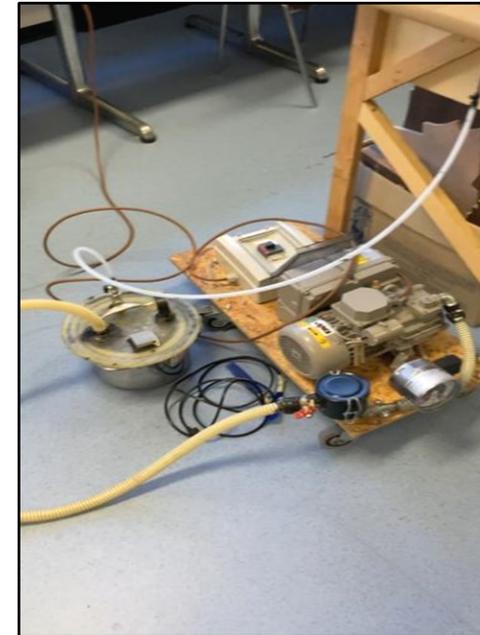
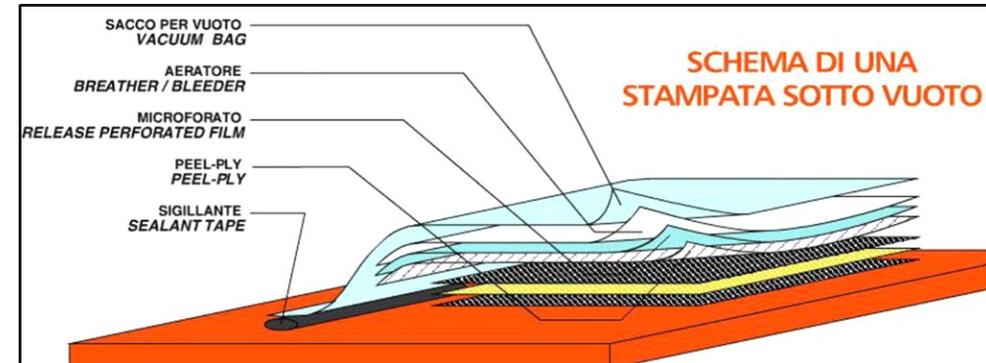
Stratificazione a mano



Schema riassuntivo stratificazione a mano

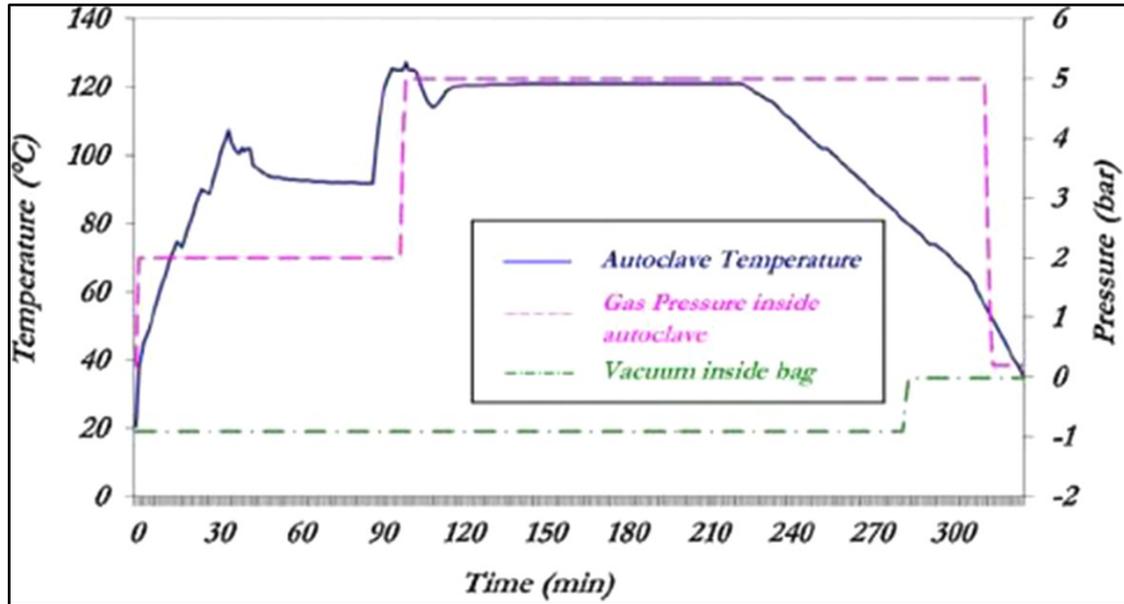
- Richiede l'uso di stampi trattati appositamente
 - Prevede diverse fasi
 - Laminazione sia con fibre a secco che pre-preg
-
- Necessità di materiali accessori
 - Ulteriore compattazione del laminato

Vacuum bag molding

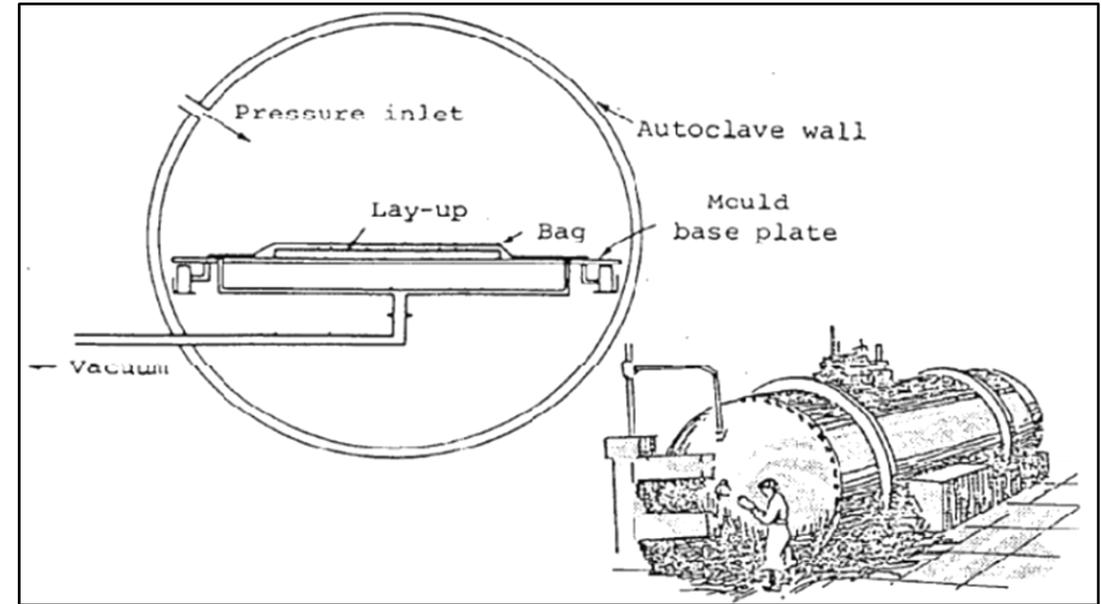


Pompa a vuoto e sacco a vuoto usati nel progetto studentesco Lift-Up

Formatura in autoclave



Processo di polimerizzazione in autoclave



- Formatura in autoclave fa utilizzo di uno speciale forno pressurizzato dove è possibile creare un ambiente riscaldato (tipicamente circa 120°C-180°C)
- Polimerizzazione ottenuta mediante combinazione di temperatura e pressione controllate
- Ottimo grado di compattazione, ma alto costo di produzione e limite massimo alla grandezza del componente

Robin Olsson. "Composite Mechanics and Laminate Theory".
Department of Aeronautics, Imperial College. (2006)

P. K. Mallick. "Fiber-reinforced composites". Department of Mechanical
Engineering, University of Michigan-Deaborn. (1997)

Roberta Bertani. Slide del corso «Chimica per l'ingegneria aerospaziale" per laurea triennale in Ingegneria Aerospaziale.
Università degli Studi di Padova. (Anno accademico 2021-2022)

Stefania Bruschi. Slide del corso "Tecnologie di lavorazione dei materiali aerospa-
ziali" per laurea magistrale in Ingegneria Aerospaziale. Università degli Studi di Padova. (Anno accademico 2021-2022)

W. Callister, D. Rethwisch "Material science and engineering an introduction".
John Wiley e Sons. (2013)

D. D. Edie "The effect of processing on the structure and properties of carbon fibers".
Center for Advance Engineering Fibers and Films and Department of Chemical Engineering, Clemson University. (1997)

L. Henderson "Carbon Fibers and Their Composite Materials".
Deakin University, Australia. (2019)

Mauro Pasquali. Slide del corso "Chimica dei materiali non metallici ".
Sapienza Università di Roma.

Scarponi, Andreotti, Compositi, Parte 2
[http://www.ingaero.uniroma1.it/users/ingaero/joomla/attachments/647_Compositi20\(Parte2\).pdf](http://www.ingaero.uniroma1.it/users/ingaero/joomla/attachments/647_Compositi20(Parte2).pdf)