

# **UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA**

Dipartimento di Tecnica e Gestione dei sistemi industriali

Dipartimento di Ingegneria Industriale



**CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCANICA E  
MECCATRONICA**

Tesi di laurea triennale

**MATERIALI COMPOSITI PER L'AUTOMOTIVE**

**Relatore:** Prof. Ing. Enrico Bernardo

**Laureando:** Francesco Manfrin

ANNO ACCADEMICO 2012-2013



# INDICE

<b>CAPITOLO 1. Introduzione ai materiali compositi .....</b>	<b>5</b>
1.1. Cosa sono i materiali compositi .....	5
1.2. Classificazione dei compositi .....	6
1.2.1. Compositi rinforzati con particelle.....	7
1.2.2. Compositi rinforzati con fibre .....	7
1.2.3. Laminati e pannelli sandwich .....	8
1.3. Generalità sulle matrici .....	10
1.4. Generalità sulle fibre .....	13
1.4.1. Classificazione delle fibre.....	13
1.4.2. Principali tipologie di fibre .....	16
1.5. Tecnologie di fabbricazione per compositi plastici .....	19
1.5.1. Stampaggio in sacco a vuoto .....	19
1.5.2. Processo manuale di laminazione .....	20
1.5.3. Processo a spruzzo .....	21
1.5.4. Filament winding .....	21
1.5.5. Poltrusione.....	22
1.5.6. Prepregs.....	23
1.5.7. Resin Transformer Moulding .....	23
<b>CAPITOLO 2. I materiali compositi per l'automotive .....</b>	<b>25</b>
2.1. Le motivazioni e le cause del loro utilizzo .....	25
<b>CAPITOLO 3. Le matrici nell'automotive.....</b>	<b>27</b>
3.1. Le matrici ceramiche .....	27
3.1.1 Applicazioni.....	28
3.2. Le matrici metalliche .....	29
3.2.1 Applicazioni.....	29
3.3. Le matrici polimeriche .....	31
3.3.1. Termoidurenti.....	31

3.3.2. Termoplastiche.....	31
<b>CAPITOLO 4. II PEEK.....</b>	<b>33</b>
4.1. Introduzione al materiale .....	33
4.1.1. Storia del materiale.....	33
4.1.2. Proprietà chimico-fisiche e meccaniche.....	34
4.2. Tecniche di lavorazione .....	35
4.3. Il PEEK rinforzato .....	36
4.4. Applicazioni per l'automotive .....	37
<b>CAPITOLO 5. Le fibre tradizionali nell'automotive .....</b>	<b>41</b>
5.1. Le fibre di carbonio.....	41
5.1.1. Nanotubi di carbonio.....	43
5.1.2. Applicazioni.....	45
5.2. Le fibre di vetro .....	48
5.2.1. Applicazioni.....	49
<b>CAPITOLO 6. Le fibre vegetali nell'automotive .....</b>	<b>52</b>
6.1. Caratteristiche e proprietà .....	52
6.1.1 Le fibre di canapa .....	56
6.1.2. Le fibre di lino.....	58
6.1.3. Le fibre di juta .....	61
6.1.4. Le fibre di cocco.....	64
6.2. Applicazioni .....	64
6.3. I bio-compositi.....	72
<b>Bibliografia.....</b>	<b>75</b>



# **CAPITOLO 1: INTRODUZIONE AI MATERIALI COMPOSITI**

## **1.1 CHE COSA SONO I MATERIALI COMPOSITI**

I materiali compositi sono una categoria di materiali molto importante in quanto forniscono di combinazioni di proprietà particolari in uno stesso materiale, come ad esempio resistenza e rigidità con bassa densità. Questa combinazione di proprietà, che non è rintracciabile con materiali tradizionali, nasce tuttavia da una combinazione di materiali nello stesso materiale composito, quindi concettualmente ci si basa sull'accoppiamento di materiali diversi con proprietà significativamente diverse (se non opposte) in modo tale che le proprietà dell'unione siano per lo più migliori delle proprietà dei singoli costituenti.

Questo accoppiamento lo si può analizzare a livello microscopico, definendo il composito come un materiale non omogeneo con delle fasi considerate singolarmente omogenee, valutando le caratteristiche che derivano dalle mutue interazioni.

Si distinguono quattro fasi in un materiale composito:

- Fase matrice: è il costituente continuo che, bloccando il rinforzo, gli trasferisce il carico esterno e lo protegge dai fattori ambientali, dall'usura e da eventuali azioni meccaniche di taglio
- Fase di rinforzo: è il costituente discontinuo che migliora le caratteristiche della matrice, e si presenta sotto forma di fibre (allineate lungo una certa direzione oppure distribuite casualmente o ancora ordinate su due o tre direzioni) o in alternativa sotto forma di particelle, capace di conferire un miglioramento meccanico della matrice.
- Fase di interfaccia: la zona di contatto tra la fase di rinforzo e la matrice, importante nella progettazione perché decisiva per il trasferimento di carico tra le fibre e la matrice.
- Porosità: le imperfezioni che possono venirsi a formare tra matrice e fibra per via del loro accoppiamento di tipo meccanico.

Queste ultime due fasi sono da considerarsi molto importanti in quanto, al variare delle interazioni interfacciali e della porosità, si ottengono relative prestazioni che variano moltissimo e quindi, oltre alla relazione matrice rinforzo, anch'esse di grande importanza nella produzione industriale.

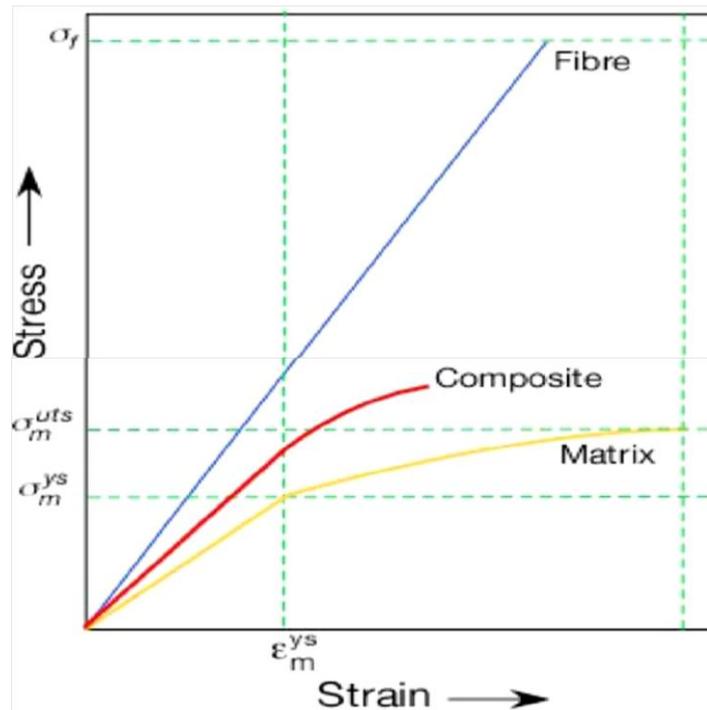


Figura 1.1 - Principio delle Azioni combinate per la resistenza meccanica.

La più importante caratteristica dei materiali compositi è che possono essere progettati e preparati partendo da opportuni componenti in modo tale da ottenere le proprietà finali desiderate. Quindi il concetto della progettazione è di fondamentale importanza: a differenza di quanto avviene per altri materiali, nei quali la struttura viene preparata dopo averne progettato la forma e calcolate le dimensioni, note le proprietà del materiale costituente, nel caso di materiali compositi la struttura può essere realizzata contemporaneamente al materiale che la costituisce, e il materiale progettato è fabbricato con le proprietà desiderate in funzione delle proprietà che si vogliono attribuire alla struttura. La progettabilità costituisce senz'altro la caratteristica più affascinante di un materiale composito, unico tipo di materiale che può essere prodotto nella forma definitiva e con le proprietà volute mentre viene prodotto.

## 1.2 CLASSIFICAZIONE DEI COMPOSITI

La classificazione dei materiali compositi è data dalla diversa forma ed all'orientamento del rinforzo. In base a questa distinzione abbiamo quindi i "compositi rinforzati con particelle" e i "compositi rinforzati con fibre". Oltre a queste due famiglie di compositi che ricoprono le categorie più importanti e utilizzate, da sottolineare anche i pannelli sandwich che sono molto utilizzati nel campo aerospaziale e soprattutto nell'automotive.

### 1.2.1 COMPOSITI RINFORZATI CON PARTICELLE

I materiali compositi particellari sono i più diffusi anche se meno importanti rispetto ai materiali compositi a rinforzo fibroso in quanto le particelle presenti, seppur di elevata resistenza, non garantiscono un significativo aumento delle caratteristiche meccaniche rispetto invece ai compositi fibrosi laddove sono le fibre a sopportare la quasi totalità del carico esterno. Inoltre, nel caso di frattura, le particelle non riescono a ostacolare efficacemente la propagazione di eventuali cricche e difetti.

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

In base al meccanismo di rinforzo, si distinguono i compositi rinforzati con particelle:

- Tipo I: compositi in cui l'interazione matrice-particella si può trattare in base alla meccanica dei continui e non a livello atomico o molecolare. Le particelle sono più dure e rigide della matrice e limitano la deformazione della matrice in prossimità di esse, dovuto al forte legame covalente all'interfaccia matrice-particella.

Esempi sono conglomerati cementizi (malta e calcestruzzo), cements (compositi ceramico-metallo) e i polimeri (che sono da considerarsi a tutti gli effetti dei compositi).

- Tipo II: metalli o leghe metalliche rinforzati e induriti per dispersione in essi di particelle fini e durissime (in genere ossidi); il meccanismo di rinforzo avviene per ostacolo del movimento delle dislocazioni.

Esempi sono il SAP (Sintered Aluminum Powder) ovvero alluminio rinforzato con particelle di allumina, e il nichel TD (Thoria Dispersed Nickel) cioè nichel metallico rinforzato con particelle di ossido di torio fino al 3% in volume.

### 1.2.2 COMPOSITI RINFORZATI CON FIBRE

Il rinforzo è costituito da fibre e queste possono avere una lunghezza pari a quella del composito considerato (fibre continue), oppure possono essere corte (fibre discontinue). Fondamentale distinzione si ha nell'orientazione delle fibre che può essere diversa e differenzia in modo marcato le proprietà del composito che si viene a formare. Sperimentalmente si osserva che la resistenza di un dato materiale aumenta significativamente se esso viene prodotto in fibre sottili. Questi compositi sono di gran lunga quelli più utilizzati nelle costruzioni meccaniche. Il loro successo è

strettamente legato all'elevata resistenza specifica (resistenza/peso) ed all'elevato modulo specifico (rigidezza/peso) unito alla possibilità di variare il grado di anisotropia intervenendo 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.

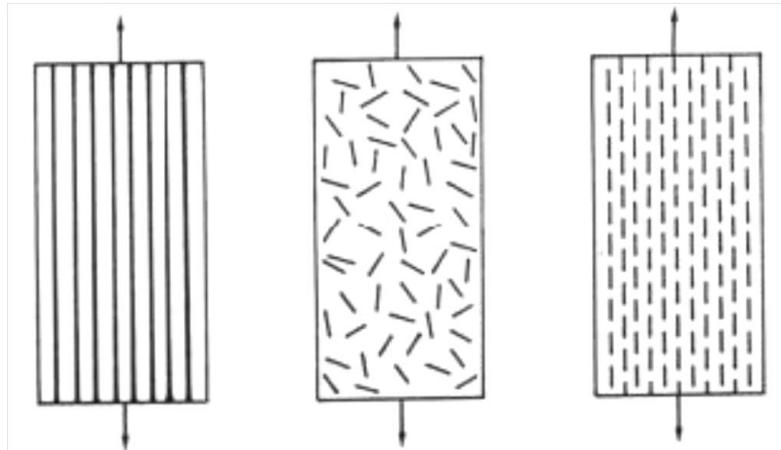


Figura 1.2 – Fibre continue unidirezionali, fibre discontinue orientate a caso, fibre discontinue allineate

### 1.2.3 LAMINATI E PANNELLI SANDWICH

- Laminati: sono ottenuti per sovrapposizione di lamine, in genere a rinforzo unidirezionale o tessuto, disposte secondo differenti orientazioni. Generalmente l'assemblaggio delle lamine avviene per polimerizzazione dell'insieme, a volte per collaggio (per esempio nella tecnologia del legno compensato). Nel primo caso, quindi, la suddivisione in lamine del prodotto finito è una pura convenzione. I laminati vengono utilizzati, come materiali strutturali, laddove vi sia da un lato la necessità di elevate prestazioni meccaniche in termini di rigidezza, resistenza, comportamento alla fessurazione, e dall'altro l'esigenza di limitare il peso. Questi materiali devono essere progettati secondo le necessità ed oggi si affaccia anche l'idea, e la tecnologia, di realizzare laminati con disposizione continuamente variabile delle fibre, in quantità e direzione.

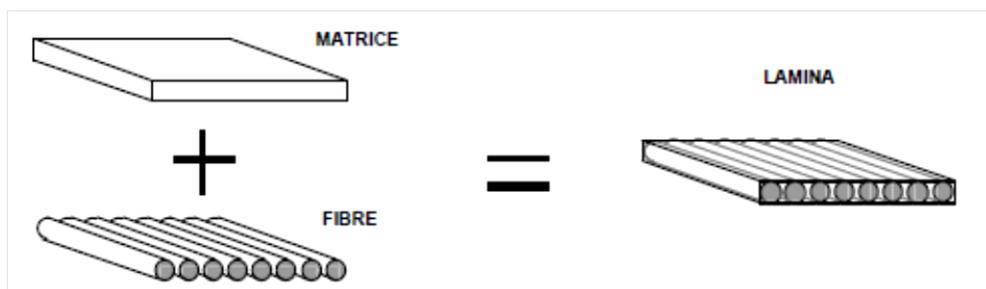




Figura 1.3 – Schema formazione di un laminato.

- Pannelli sandwich: elementi costituiti da due strati resistenti, detti facce, distanziati da un materiale connettivo chiamato "core" (cuore). Il core è in genere un materiale leggero e poco resistente, la cui unica funzione è distanziare le facce, di materiale più nobile sotto le qualità resistenziali meccaniche e di spessore ridotto. La rigidezza assiale del core è assolutamente trascurabile rispetto a quella delle facce, che sono preposte ai carichi nel piano. La presenza del core è utile ad aumentare il valore della rigidezza flessionale del pannello. Infatti, essendo la parte centrale leggera, la massa risulta essere distribuita più in periferia, massimizzando il momento di inerzia. Le facce sono solitamente costituite da leghe metalliche (alluminio, titanio) mentre il core si trova solitamente sotto forma di struttura a nido d'ape (honeycomb). Utilizzati nell'industria navale e aeronautica.

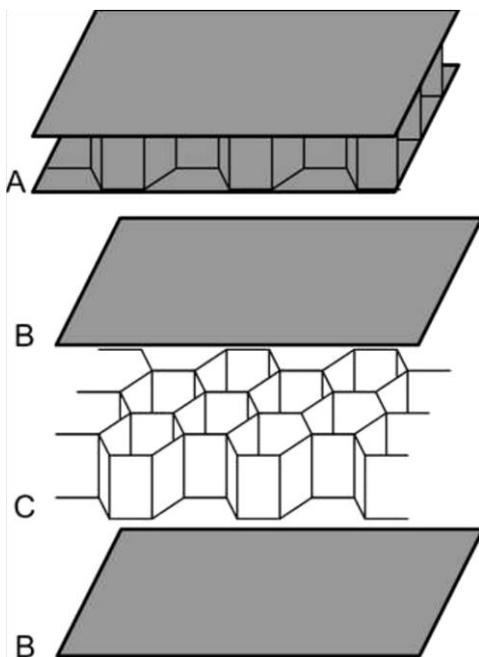


Figura 1.4 – Schema pannello sandwich.



Figura 1.5 – Telaio realizzato con sandwich in fibre di carbonio e honeycomb in schiuma di alluminio

## 1.3 GENERALITA' SULLE MATRICI

La matrice, identificabile come elemento continuo, di solito meccanicamente più debole delle fibre ma che assolve quattro fondamentali compiti: tenere uniti fra di loro rinforzo ed elemento strutturale rinforzato, trasmettere le sollecitazioni dalla struttura alla fibra, proteggere le fibre dall'ambiente circostante nel caso di ambienti corrosivi o ossidanti e bloccare eventuali cricche insorte nelle fibre nel caso di matrici più deformabili delle fibre.

Esistono diversi tipi di materiali compositi, classificabili a seconda dei materiali costituenti: in particolar modo in base al tipo di materiale di cui è costituita, la matrice assegna il nome ai vari tipi di compositi; avremo così compositi organici, metallici, ceramici o vetrosi a seconda che la matrice sia di materiale organico, metallico, ceramico o vetroso. Tale distinzione, ancor prima che per motivi costruttivi o meccanici, si rende tanto più utile quanto più si risentono gli effetti della temperatura di esercizio. La matrice, infatti, deve poter rimanere allo stato solido e non viscoso per poter assicurare una certa tenuta tra le fibre di rinforzo. A tale proposito si può fare riferimento alla seguente tabella:

Temperatura di max esercizio
MATRICE ORGANICA < 250°C
MATRICE METALLICA < 1000°C
MATRICE CERAMICA > 1000°C

Le matrici organiche a loro volta si possono suddividere in termoindurenti e termoplastiche.

Le termoindurenti, che sono le matrici più diffuse, sono 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. Le matrici termoindurenti sono fragili e non risultano avere una deformabilità apprezzabile. Le principali matrici termoindurenti utilizzate sono:

- Resine epossidiche: eccellente adesività, resistenza al calore e chimica. Inoltre possiedono buone proprietà meccaniche e sono ottimi isolanti elettrici. Usi: vernici, rivestimenti, adesivi e materiali compositi;
- le resine poliestere che trovano un'ottima applicazione in unione alle fibre di vetro (vetroresina); le poliestere sono caratterizzate da un basso costo, da un breve tempo di polimerizzazione e da buone caratteristiche meccaniche. Trovano applicazioni nel campo ferroviario, navale oltre che in ambito chimico e elettrico;

- le resine fenoliche hanno invece proprietà del tutto simili a quelle epossidiche ma una temperatura limite di esercizio maggiore ( $T > 250^{\circ}\text{C}$ ). Proprio per questa ragione vengono utilizzate principalmente dove si richiede una certa resistenza al fuoco.

Proprietà	Poliestere	Epossidica	Fenolica	Siliconica	Termoplastica (Peek 45 G)
Densità ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	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 ( $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )					
Conducib. termica ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	0,21	0,21	–	–	–
Coefficiente di dilatazione termica ( $10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ )	80 + 100	50 + 70	60 + 80	300	–
Temperatura di transizione vetrosa ( $^{\circ}\text{C}$ )	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 $\text{H}_2\text{O}$ (%)	0,15 + 0,60	0,08 + 0,15	0,3 + 1,0	0,2 + 0,5	–

Figura 1.6 – Proprietà delle principali matrici polimeriche.

Le matrici termoplastiche non presentano il fenomeno di reticolazione. Derivano da polimeri lineari o poco ramificati, che una volta formati possono essere rifusi e riformati.

I polimeri termoplastici si suddividono in:

- polimeri amorfi, cioè privi di un ordine a lungo raggio. Un esempio tipico di struttura amorfa è quella del vetro;
- Polimeri semicristallini, ossia polimeri in cui alcune molecole, durante la fase di sintesi, riescono a disporsi in modo ordinato, formando delle regioni cristalline. Un polimero non risulterà mai essere completamente cristallino, ed avrà sempre un certo grado di amorfismo. Le matrici di questo tipo hanno un forte contenimento del fenomeno di creep.

Per le matrici termoplastiche la deformazione massima è molto elevata e il comportamento generale è elastoplastico. Sono utilizzate a temperature inferiori rispetto le termoindurenti. Le principali matrici termoplastiche sono le polipropiliche (PP), le poliammidiche (es. Nylon 6,6), le policarbonatiche, le poli-eter-eter-chetoniche (PEEK) e il copolimero ABS (acrilonitrile, butadiene, stirene).



I compositi a matrice ceramica (CMC, *ceramic matrix composites*) hanno come principale difetto quello di essere fragili. Tuttavia 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 che mantengono anche a temperature superiori ai 1000°C. Pertanto nei CMC non si ricerca un miglioramento nella rigidità e nella resistenza come in tutti gli altri compositi ma bensì si vuole principalmente aumentare la tenacità a frattura, quindi creare una forte dispersione di energia di frattura in fenomeni quali il debonding (distacco) e pull out (estrazione parziale) delle fibre dalla matrice una volta che si siano raggiunte le condizioni critiche per la parte fragile del materiale. Per densificare la matrice è necessario un 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.

Esistono compositi ceramici con matrice e fibre dello stesso materiale come i SiC-SiC e C-C, utilizzati per applicazioni particolari tra cui freni ad altissime prestazioni.

## 1.4 GENERALITA' SULLE FIBRE

La fibra è la parte costituente il rinforzo che ha il compito di esercitare la funzione resistente vera e propria. Nella realizzazione dei compositi le fibre possono essere continue o discontinue, nel primo caso la loro disposizione è allineata a formare dei nastri, dei tessuti o delle lamine anche di grandi dimensioni, mentre nel secondo caso le fibre sono corte e la loro disposizione è usualmente casuale. Le fibre maggiormente diffuse sono quelle di carbonio, di vetro e le organiche; la loro geometria filiforme, con le quali si trovano in commercio, garantisce una grande versatilità nelle applicazioni e vi conferisce spiccate caratteristiche di rigidità e resistenza rispetto al loro uso tridimensionale, questo grazie alla diminuzione dei difetti che spesso sono causa di innesco di crisi locali.

### 1.4.1 CLASSIFICAZIONE DELLE FIBRE

Le fibre sono costituite da filamenti continui molto sottili e quindi difficili da manipolare singolarmente, e per questo motivo le fibre sono disponibili sul mercato in varie forme:

- Filamento: elemento base con un diametro prossimo ai 10µm



- Cavo di filatura (Tow): Fascio di un numero elevato di filamenti, senza torsione. Usato per essere filato e strappato (fibre corte)



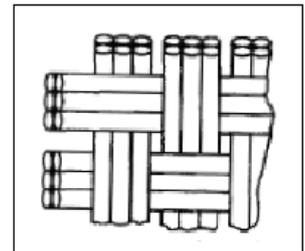
- Filato (Yarn): filo formato da fibre e tenuto da torsione



- Filo assemblato (Roving): fascio costituito da filati, assemblati parallelamente



- Tape: formato da centinaia di filati
- Tessuti: le fibre sono disposte quasi da garantire una isotropia del piano



Inoltre possiamo dare un'ulteriore classificazione delle fibre e suddividerle in tre gruppi principali: whisker, fibre e fili. Il loro diametro varia da 5 a 15 micron, ma altre sono molto più spesse, come quelle ottenute per deposito di vapori su fibre, come le fibre di boro e di carburo di silicio (100-150 micron). I whisker sono monocristalli molto sottili e presentano un elevatissimo rapporto lunghezza-diametro. Grazie alle piccolissime dimensioni, essi sono in grado di raggiungere un elevato grado di perfezione cristallina e sono virtualmente privi di difetti, motivo per cui essi hanno resistenze meccaniche eccezionalmente elevate. I whisker sono infatti i materiali più resistenti che si conoscano. I materiali che sono classificati quali fibre possono essere sia policristallini che amorfi e mostrano piccoli diametri; le fibre sono generalmente realizzate in materiale polimerico o ceramico. Il diametro della fibra è critico rispetto alla resistenza: come tutti i materiali fragili, mostrano un incremento della resistenza al diminuire delle dimensioni trasversali. Le fibre in fiocco possono essere prodotte direttamente o attraverso il taglio di filamenti continui. Le fibre inorganiche, metalliche e non metalliche, sono più resistenti, più rigide, hanno un più elevato punto di fusione, resistono meglio al calore rispetto alle fibre tradizionali; sono inoltre del tutto

ininfiammabili, per contro, eccetto le metalliche, sono fragili. La loro importanza tessile è quindi finora molto limitata mentre è grande l'impiego come rinforzo nei materiali compositi. Sono di norma eccellenti alle alte temperature ed in ambiente corrosivo.

Come abbiamo detto, le fibre più utilizzate per la realizzazione di compositi sono quelle di vetro, di carbonio e le aramidiche, anche se negli ultimi anni si sta scoprendo l'utilizzo delle fibre naturali, grazie soprattutto alla ricerca dei loro ottimi vantaggi. Queste fibre vengono utilizzate sia come fibre lunghe, sia come fibre corte della lunghezza di alcuni millimetri. Altri tipi di fibra, sia organiche (alcune fibre polimeriche, quali, ad esempio, le polietileniche) che inorganiche (metalliche e ceramiche), hanno impieghi più limitati. Le fibre al carbonio e le ceramiche sono prodotte a partire da fibre organiche, precursori che vengono degradati termicamente. I precursori sono preparati con le stesse tecnologie impiegate per preparare le fibre organiche convenzionali. Per alcune fibre si ricorre al CVD (chemical vapor deposition), con un substrato di fibre altofondenti: SiC o B<sub>4</sub>C su boro, TiN, SiC su carbonio. Sia le fibre policristalline (carbonio e boro) sia quelle perfettamente monocristalline (whiskers senza dislocazioni o con una sola dislocazione centrale) raggiungono valori del modulo di Young e della resistenza a trazione che possono superare di gran lunga i relativi valori dei materiali usuali. Mentre l'uso di whiskers (fibre corte discontinue come Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, WC, SiC) comporta al momento notevoli difficoltà tecnologiche, le fibre di carbonio e boro hanno ormai superato la fase di sperimentazione e sono in uso per un crescente numero di applicazioni industriali. I fili sottili sono invece caratterizzati dall'aver maggiori diametri, in genere essi sono realizzati in acciaio, molibdeno e tungsteno. L'ottenimento di un significativo grado di rinforzo è possibile solo se il legame interfacciale fibra-matrice è forte. Tuttavia, in condizioni di carico, tale legame si annulla all'estremità delle fibre: la conseguenza di ciò è che in questi punti non vi è alcun trasferimento di sforzo. Pertanto per ottenere un effettivo rafforzamento ed irrigidimento della struttura è necessario che la fibra raggiunga almeno una certa lunghezza critica, che dipende dall'accoppiamento fibra-matrice. Le fibre per le quali la lunghezza è molto maggiore della lunghezza critica sono definite fibre continue, mentre quelle più corte di essa vengono chiamate fibre discontinue o fibre corte. In questo secondo caso la matrice si deforma intorno alle fibre in maniera tale che in pratica non vi è nessun trasferimento di carico, né viene fornito alcun rinforzo da parte della fibra. In tal caso il composito diventa sostanzialmente un particellare. Anche la disposizione delle fibre risulta critica per le caratteristiche del composito. Le proprietà meccaniche di un composito con fibre continue ed allineate sono fortemente anisotrope. Il rinforzo e la conseguente resistenza raggiungono il massimo valore nella direzione di allineamento ed il minimo nella direzione trasversale. Infatti, lungo questa direzione l'effetto di rinforzo delle fibre è praticamente nullo e normalmente si presentano delle fratture per valori di carichi di trazione relativamente bassi. Per altre orientazioni del carico, la resistenza globale del

composito assume valori intermedi. Quando su un piano sono presenti sforzi in più direzioni si realizzano spesso strutture multistrato ottenute sovrapponendo lamine di compositi unidirezionali secondo orientazioni differenti: queste strutture vengono chiamate compositi laminari. Nei compositi a fibre corte e discontinue le fibre possono essere sia allineate che distribuite casualmente. Per quelli con fibre allineate è possibile ottenere resistenze e rigidità significative nella direzione longitudinale. Le proprietà dei compositi a fibre corte casualmente orientate sono invece isotrope a scapito, tuttavia, di alcune limitazioni sull'efficienza del rinforzo.

## 1.4.2 PRINCIPALI TIPOLOGIE DI FIBRE

Vediamo ora una breve descrizione delle fibre più importanti e diffuse:

- Le fibre di carbonio, scoperte nel 1878 da Edison per realizzare la prima lampada ad incandescenza, sono state prodotte commercialmente però solo in un secondo momento dal 1960 secondo un procedimento messo a punto da William Watt per la Royal Aircraft nel Regno Unito, rappresentano il punto di separazione tra le fibre organiche e le fibre inorganiche in quanto prodotte per modificazione di fibre organiche o da peci organiche. Le fibre di carbonio possono essere prodotte per trattamento termico (pirólisi controllata) di diversi precursori polimerici, materie prime contenenti carbonio, quali il *rayon*, il *poliacrilonitrile* (PAN), le poliammidi aromatiche e le resine fenoliche, ecc.. Recentemente sono state introdotte fibre di carbonio e di grafite ottenute da residui della distillazione del petrolio o del catrame (PITCH). Le fibre di carbonio hanno iniziato l'era dei materiali compositi per impiego inizialmente militare o aeronautico ed in seguito anche per prodotti dell'industria automobilistica e per il tempo libero. La struttura rigida delle molecole ad anelli ciclici a nastro o a scala a pioli, delle fibre di carbonio sia da PAN che da peci ha suggerito come costruire molecole organiche aromatiche per ottenere fibre ad elevate prestazioni. La terminologia fibre di carbonio si alterna, nella pratica comune, a quella di fibre di grafite. In realtà il primo termine dovrebbe essere applicato a fibre trattate fino a circa 2000 °C, riservando il termine "grafite" a quelle trattate ad almeno 2500 °C, anche se la struttura di queste ultime non corrisponde alla tipica struttura cristallina tridimensionale della grafite.

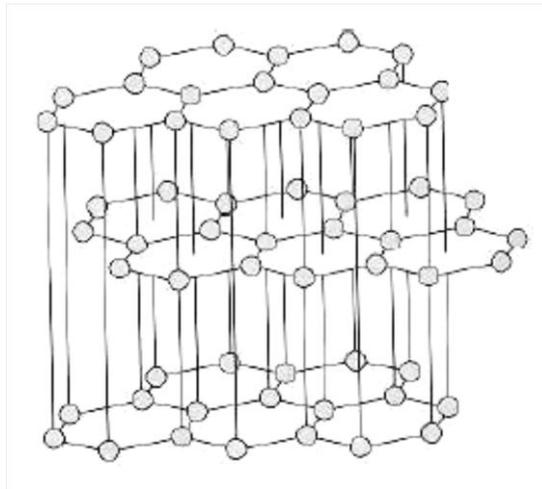


Figura 1.9 – Struttura della molecola di carbonio.

- Tra le più importanti fibre organiche ci sono le aramidiche, il cui sviluppo è iniziato negli anni '50, vengono ottenute da poliammidi aromatiche. Dalla reazione tra para-fenilendiammina con il cloruro di tereftaloile si ottiene la catena polimerica nota con il nome di Kevlar. Tra le fibre aramidiche, il Kevlar è quella attualmente più diffusa, prodotta in quattro diverse tipologie (Kevlar, Kevlar 29, 49, e 149), ma già da alcuni anni altre fibre della stessa famiglia vengono prodotte e commercializzate. Il kevlar 29 viene impiegato nella fabbricazione di cavi, cordami, tessuti per vele e indumenti protettivi balistici, mentre il 49 è utilizzato come fibra di rinforzo nei laminati plastici. Il kevlar, dal caratteristico colore giallo-oro, offre ottime doti di leggerezza (il suo peso specifico è circa metà di quello del vetro) e una elevata resistenza a trazione unita a un contenuto allungamento a rottura. Il processo di produzione di tali fibre è piuttosto complesso, prevedendo nel caso del Kevlar: estrusione in acqua di una pasta contenente il 20% di polimero in acido solforico (che presenta comportamento liquido-cristallino), neutralizzazione della fibra mediante NaOH, trattamenti termici e stiro. Una caratteristica tipica del Kevlar è la modalità di frattura, che avviene per sfibratura (splitting) in microfibrille, quando viene sottoposto a trazione, e con la formazione di zone di schiacciamento (buckling) e di attorcigliamento (kinking), quando è sottoposto a compressione. La bassa resistenza agli sforzi di compressione è il motivo per cui il suo uso per la realizzazione di compositi è sconsigliato nel caso di strutture soggette a carichi di compressione o, per carichi di flessione, nelle zone delle strutture soggette a compressione. La tipologia di frattura del Kevlar, con la formazione di fibrille, consente invece la dissipazione di elevate energie di frattura, impartendo al composito elevata resistenza all'impatto. Nel corso degli anni, questo tipo di fibra sintetica ha ricevuto miglioramenti notevoli in termini di resistenza meccanica. Fin dall'inizio essa si dimostrò promettente, con una resistenza rispetto all'acciaio, inteso a parità di massa di oltre 2 volte.

Con il tempo si è arrivati a prodotti ancora più resistenti, che offrono un rapporto di almeno 5:1 sull'acciaio. Chiaramente questo riguarda la resistenza meccanica, ma non quella al logorio né tanto meno quella al calore: non esistono ingranaggi in kevlar, o parti di motore in tal materiale. Queste fibre presentano costi inferiori rispetto a quelle di carbonio.

Tra le arammidiche sono da considerarsi anche le fibre Nomex, commercializzata a partire dagli anni sessanta, che presentano una eccezionale resistenza al calore e alla fiamma, oltre che ad avere eccellenti proprietà di isolamento elettrico.

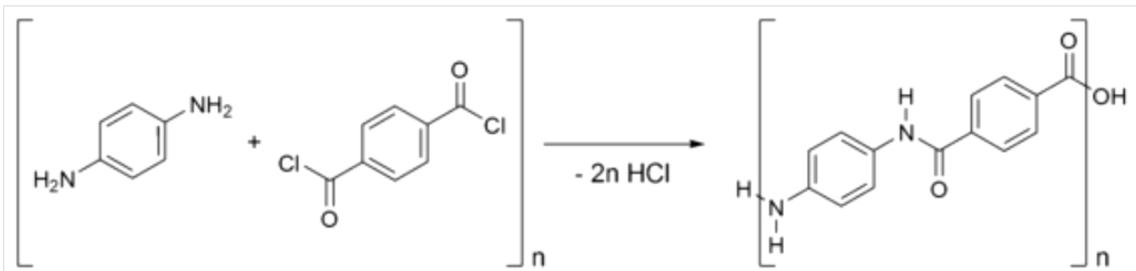


Figura 1.10 – formazione di un aramide: struttura di Kevlar.



Figura 1.11 – Nastro di tessuto in Kevlar.

- Le fibre ceramiche sono impiegate soprattutto come fibre refrattarie per impieghi che superano i 1000 °C e sono caratterizzate da una struttura policristallina piuttosto che amorfa. Le fibre ceramiche refrattarie sono utilizzate soprattutto per l'isolamento termico ad alte temperature e per la realizzazione di compositi speciali. Si tratta di fibre aventi proprietà assolutamente eccezionali, di gran lunga superiori a quelle dell'acciaio e delle altre fibre normalmente usate; purtroppo il metodo stesso di fabbricazione pone dei problemi di costo, per cui questo tipo di fibra presenta un costo elevatissimo il che la rende disponibile ancora in piccoli quantitativi per applicazioni speciali, come nel settore aerospaziale.

Tra le varie tipologie esistono inoltre le fibre di vetro, che appartengono sempre alla famiglia delle fibre ceramiche e che sono state utilizzate e utilizzate tutt'ora per l'industria navale e automobilistica.

<i>Proprietà</i>	Fibra di vetro	Fibra di carbonio
<b>Modulo elastico a trazione [GPa]</b>	9.6 – 17.2	137.8
<b>Sforzo a trazione [MPa]</b>	55.2 – 172.3	1.490
<b>Deformazione a rottura (%)</b>	3.0	1.1
<b>Sforzo a rottura [MPa]</b>	68.9 – 248.2	1.849
<b>Modulo di flessione [GPa]</b>	6.9 – 15.2	120.4

Tabella 1.1 – Caratteristiche meccaniche a temperatura ambiente di un composito a matrice poliestere rinforzato con fibre di vetro o di carbonio.

## 1.5 TECNOLOGIE DI FABBRICAZIONE PER COMPOSITI PLASTICI

Si descrive ora quelli che sono i sistemi usualmente adoperati per la fabbricazione di strutture in materiale composito plastico.

### 1.5.1 STAMPAGGIO IN SACCO A VUOTO

In questo processo la struttura viene realizzata attraverso un processo di laminazione (sovrapposizione manuale secondo orientazioni prestabilite) di strati successivi di tessuti di fibra,

sotto forma di mat, pre-impregnati o meno, tessuti oppure lamine. La struttura laminata, supportata da uno stampo corrispondente alla forma che si vuole riprodurre viene poi inglobata in un sacco, nel quale viene effettuato il vuoto, ed infine posta in autoclave.

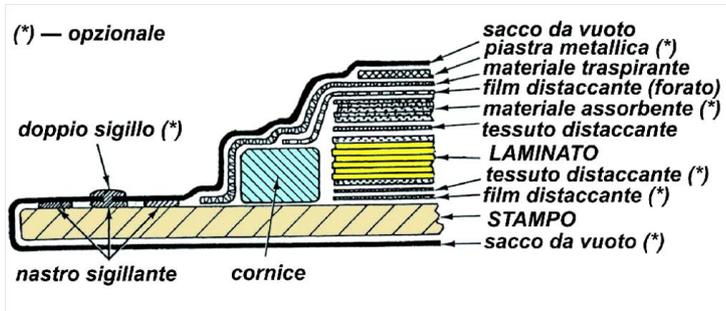


Figura 1.12 – Confezionamento di un sacco a tenuta.

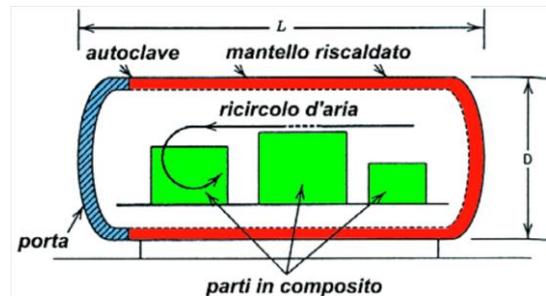


Figura 1.13 – Consolidamento in autoclave.

Le fasi del processo:

- taglio del rotolo di fibre preimpregnate;
- sagomatura su stampo;
- rimozione del film distaccante;
- laminazione, eseguita in stampo aperto;
- confezionamento di un sacco a tenuta;
- consolidamento in autoclave;
- estrazione e finitura.

## 1.5.2 PROCESSO MANUALE DI LAMINAZIONE

Nel processo manuale di laminazione, nello stampo aperto viene applicata una mano di gel come da rivestimento; le fibre di rinforzo (nel caso più comune, fibre di vetro) vengono poste nello stampo e dopodiché la resina di base viene mescolata con dei catalizzatori e quindi applicata per colata con un rullo.

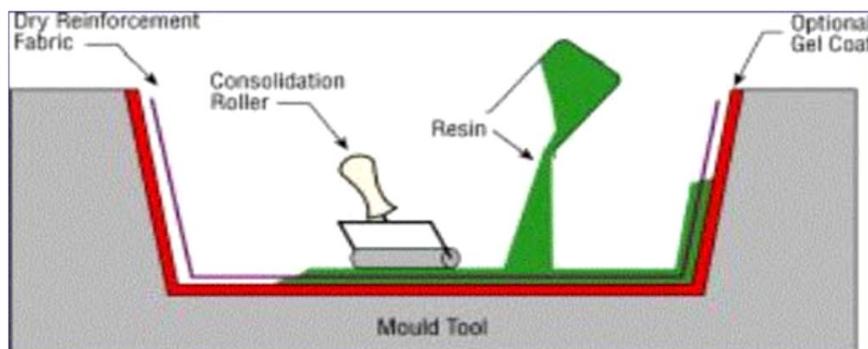


Figura 1.14 – Fase di laminazione.

### 1.5.3 PROCESSO A SPRUZZO

Una variante molto usata alla laminazione manuale è la tecnica di spray-up (processo a spruzzo) che consiste nello spruzzare contemporaneamente resina e fibre corte tagliate da una apposita taglierina. Aria compressa spruzza il miscuglio sullo stampo in genere rotante per uniformare la deposizione. Questa tecnica è usata per la formatura delle pre-forme, cioè semilavorati del pezzo finale, che vengono poi posti tra stampo e controstampo ed il pezzo finale viene formato per pressatura a caldo (hot matched die molding).

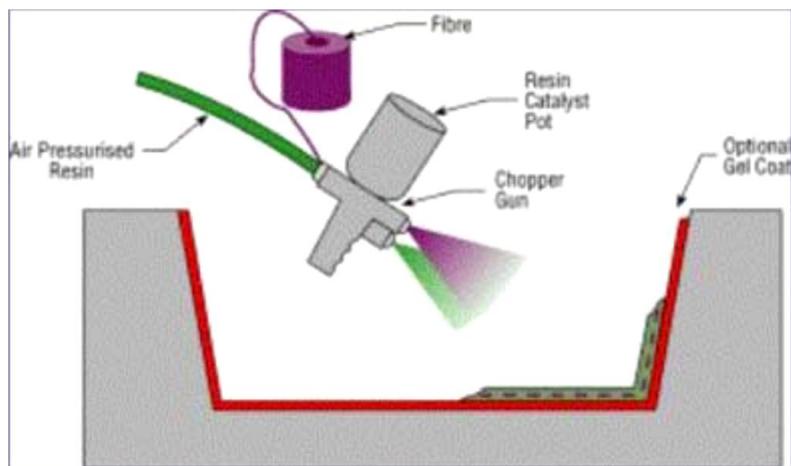


Figura 1.15 – Tecnologia spray up: getto in pressione di resina e fibre corte premiscelate.

### 1.5.4 FILAMENT WINDING

Il filament-winding (FW) è un tipo di lavorazione interamente automatizzata. Consiste nell'avvolgimento di filamenti continui di materiale di rinforzo su un corpo, generalmente rotante su un asse chiamato mandrino. La forma del mandrino determina la geometria del pezzo da realizzare; le fibre avvolte in una o più bobine poste su una rastrelliera, vengono impregnate di resina per poi giungere sul mandrino, dove vengono posizionate secondo ben precise angolazioni. Al posto delle fibre sciolte si possono anche usare fili o nastri preimpregnati. Al termine dell'avvolgimento lo stratificato viene sottoposto ad un ciclo di cura in forno (o in un autoclave in pressione). Se il pezzo è aperto il mandrino viene ricoperto da un agente distaccante che facilita l'estrazione dopo il taglio delle estremità. Un parametro fondamentale è l'angolo d'avvolgimento, definito in ogni punto come l'angolo compreso tra la direzione delle fibre e la tangente al meridiano del mandrino. L'angolo d'avvolgimento può variare tra 0° e 90° a seconda delle proprietà meccaniche richieste al pezzo, e può prendere il nome di avvolgimento polare.

Nell'avvolgimento polare il mandrino e l'occhiello di deposizione possiedono entrambi moto rotatorio, in modo tale che l'avvolgimento delle fibre avvenga praticamente secondo i meridiani della struttura. Così facendo le fibre non si sovrappongono durante l'avvolgimento e si può coprire l'intero mandrino con una singola lamina opportunamente orientata rispetto all'asse. Nell'avvolgimento elicoidale il mandrino ha un moto rotatorio, mentre il braccio di deposizione ha un moto traslatorio alternato. Combinando opportunamente questi due movimenti si può far seguire alle fibre le traiettorie d'avvolgimento desiderate ottenendo, tuttavia, non una struttura a lamine, ma una sorta di tessuto a fibre. Se invece si vogliono realizzare laminati con angolazioni maggiori è necessario utilizzare nastri di larghezza opportuna.

È una tecnica molto usata per la costruzione di serbatoi in pressione, ma anche di grandi pezzi, come fusoliere di aerei.

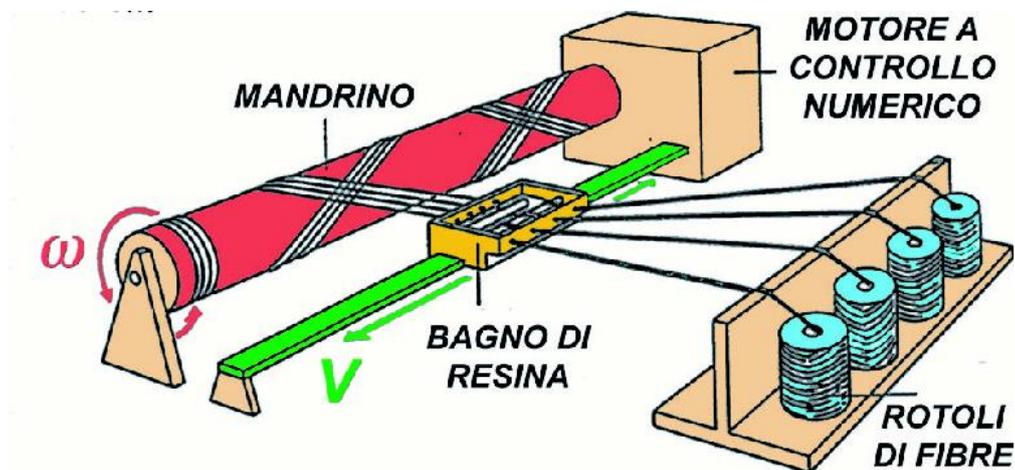


Figura 1.16 – Tecnologia Filament winding.

### 1.5.5 POLTRUSIONE

L'estrema automazione è uno dei grossi vantaggi di questo processo che consente di realizzare un elevato numero di pezzi a velocità molto elevata, tanto che il costo ora/macchina incide di poco sul costo del prodotto. Si presta bene per la produzione di semilavorati profilati a sezione costante con fibre principalmente monodirezionali come profilati, tubi, condotti e travi. Nel processo a poltrusione continua le fibre continue vengono impregnate in un bagno di resina, fatti passare attraverso uno stampo riscaldato e trafilato, uscendo lentamente come materiale composito reticolato a sezione trasversale costante.

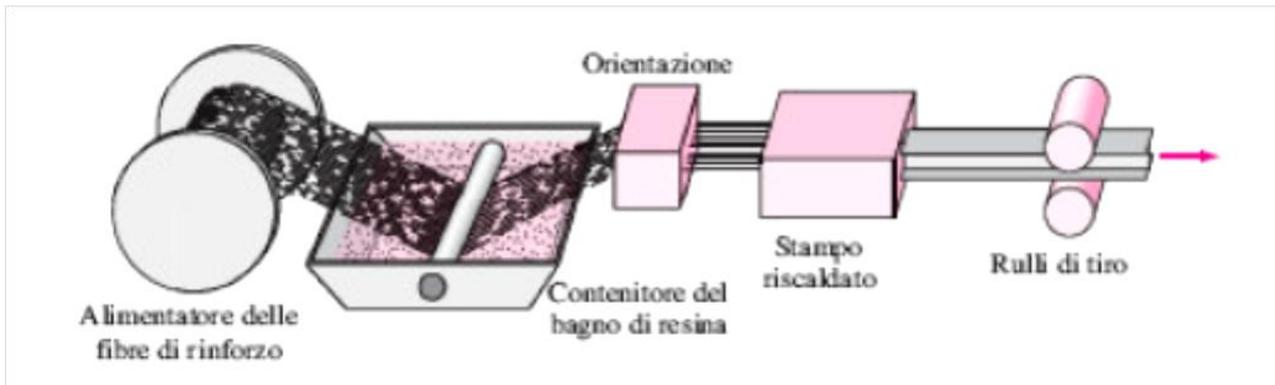


Figura 1.17 – Poltrusione continua.

### 1.5.6 PREPREGS

Questo processo di prepregs (dei pre-impregnanti) è quella più utilizzata per realizzare laminati piani, od anche, in autoclave, con certe curvature. Il laminato viene preparato a freddo, sovrapponendo i vari strati di preimpregnato. Il manufatto così realizzato viene posto in autoclave o in presse scaldanti per polimerizzare sotto pressione a temperature di circa 180°C. Questa tecnologia è molto costosa ma permette di ottenere dei componenti meccanici di alto pregio e di buona qualità di produzione, limitando al minimo i difetti di fabbricazione.

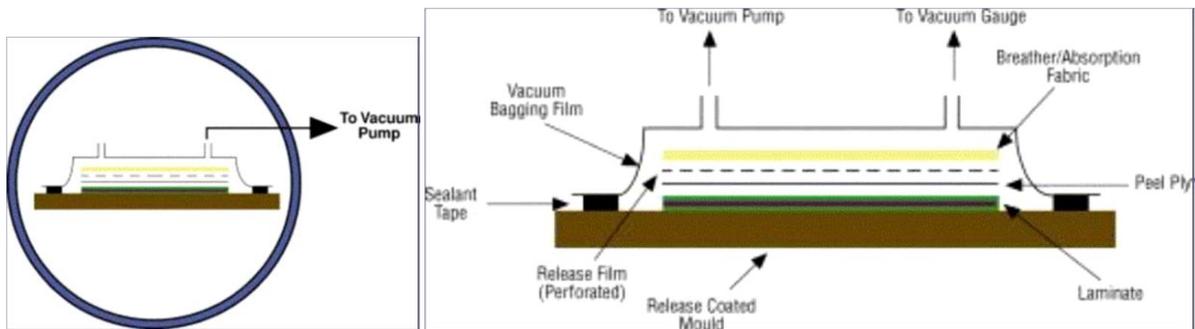


Figura 1.18 – Schema del processo prepregs.

### 1.5.7 RESIN TRANSFER MOULDING

Nel processo di Resin Transfer Moulding (RTM), il rinforzo (tessuti di fibra preformati) è messo nello stampo; in seguito, si procede all'iniezione di resina in pressione, a volte con stampo sotto vuoto. La polimerizzazione avviene a temperatura ambiente o a caldo, con o senza catalizzatore. Questa tecnologia è la più impiegata nella produzione in grande serie di pezzi. Esiste anche una variante che prevede l'iniezione sotto vuoto di resina non in pressione.

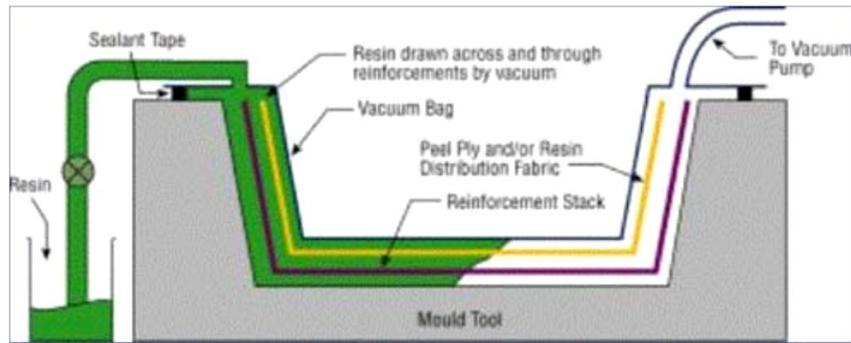


Figura 1.19 – Processo Resin Transfer Moulding (RTM).

Lamborghini ha compiuto un'importante svolta sviluppando ulteriormente questo processo. Grazie al processo brevettato "RTM-Lambo", lo stampo non è più un pezzo di metallo pesante e complesso, ma è composto da parti leggere in fibra di carbonio. In questo modo il processo di produzione risulta più veloce, flessibile ed efficiente e la cottura non viene effettuata in autoclave. Un ulteriore vantaggio del processo RTM Lambo è rappresentato dalla pressione di iniezione ridotta che non richiede attrezzature e strumenti costosi.

Braiding: i componenti intrecciati sono realizzati con tecnologia RTM. Questa tecnologia con intrecci in fibra di carbonio deriva dall'industria tessile ed è utilizzata per la realizzazione di componenti tubolari per applicazioni speciali, ad esempio montanti strutturali e le profilature della parte inferiore. L'intreccio è realizzato incrociando diagonalmente le fibre in diversi strati.

## **CAPITOLO 2: I MATERIALI COMPOSITI PER L'AUTOMOTIVE**

### **2.1 LE MOTIVAZIONI E LE CAUSE DEL LORO UTILIZZO**

La produzione delle prime automobili aventi elementi della carrozzeria con materiale composito avvenne nei primi anni cinquanta, negli Stati Uniti: questa iniziativa fu intrapresa per motivi di forza maggiore a causa delle elevate tassazioni sull'acciaio imposte nell'allora dopoguerra.

Oggi invece, l'aumento delle prestazioni, la diminuzione delle masse e dei costi, la sicurezza e l'efficienza energetica sono le attuali tendenze nel settore automobilistico e i materiali compositi rappresentano, in un numero crescente di applicazioni, un valido sostituto dei materiali tradizionali, metalli ma non solo, in grado di garantire prestazioni elevate a costi vantaggiosi. I materiali compositi possiedono infatti una favorevole combinazione di proprietà meccaniche, fisiche e tribologiche.

	Automobili di vecchia concezione (1050 Kg)	Automobili di attuale concezione (900 Kg)	Automobili di futura concezione (750 Kg)
<b>ACCIAIO</b>	695	440	220
<b>ALLUMINIO</b>	35	175	195
<b>ALTRI METALLI</b>	20	25	35
<b>VETRO</b>	35	30	15
<b>PLASTICA</b>	150	170	170
<b>OLI VARI</b>	15	15	10

Tabella 2.1 – Peso dei materiali in automobili di vecchia, attuale e futura concezione.

Dalla tabella 2.1 si può subito notare come l'evoluzione nella produzione di automobili sia in linea con l'aumento dell'uso di materiali compositi plastici e dell'alluminio, in grado di essere promotori della diminuzione del rapporto peso/potenza e di saper dare notevoli vantaggi dal punto di vista tecnologico oltre che ambientale.

Dal punto di vista tecnologico con i compositi:

- la produzione di materiale composito è molto più veloce rispetto a quella dei materiali metallici in quanto può essere automatizzata in maniera molto più efficiente;
- non si ha bisogno di stampi molto costosi; in molti casi si utilizzano stampi di alluminio con un notevole risparmio rispetto ai classici stampi in acciaio o in lega;
- non si deve far fronte a trattamenti termici, in quanto applicando un film superficiale su di essi si può prevenire usura e corrosione degli stati superficiali;
- si hanno vantaggi nel costo di assemblaggio, in quanto si può limitare l'uso di organi di collegamento attraverso la fusione delle matrici;
- si ha un significativo risparmio di energia rispetto ai materiali metallici e ceramici.

Inoltre dal punto di vista ambientale, tema molto caro e di riferimento da alcuni anni nell'industria automobilistica, con i compositi si ottengono ulteriori vantaggi come:

- automobili molto più leggere e il conseguente minor consumo di carburante;
- aumento del riciclaggio dei componenti delle auto. Le matrici termoplastiche e le fibre naturali hanno bassi impatti ambientali e quindi possono essere riciclate, riutilizzate o stoccate inquinando meno.

## **CAPITOLO 3: LE MATRICI PER L'AUTOMOTIVE**

### **3.1 LE MATRICI CERAMICHE**

Nell'industria automobilistica sono utilizzati i compositi a matrice ceramica C/C-SiC e i Carbon-Carbon (C/C). I Carbon-Carbon sono costituiti da fibre di carbonio ad alto modulo, legate in una matrice epossidica (carbonio) mentre i compositi a matrice ceramica (C/C-SiC) invece, sono realizzati mediante infiltrazione di silicio fuso in una percentuale finale di almeno il 20% della massa totale del composito, in una preforma porosa di fibre di carbonio precedentemente realizzata. Dal punto di vista microstrutturale, un composito carbon-carbon è costituito da fibre di carbonio disposte in maniera ordinata tra di loro e inglobate in una matrice ancora in carbonio. Il materiale si ottiene per accrescimento, depositando uno sull'altro vari strati di fibra intrecciata; l'intreccio può essere di vario tipo anche se generalmente si presenta come una maglia: da ciò si comprende perché tale materiale sia così compatto e strutturalmente ordinato. In Figura 3.1 si nota la fibratura a maglie di un composito C/C. Le fibre di carbonio utilizzate hanno lunghezza variabile ma in genere di circa 8mm e presentano un altissimo modulo elastico per sforzi diretti come il loro asse (circa 5000 GPa), al contrario hanno un modulo elastico molto ridotto per sforzi non paralleli all'asse (circa 35 GPa). Il composito Carbon-Carbon risulta molto oneroso da produrre sia per motivi di ordine economico che di tempo, in quanto prevede l'unione successiva di singoli strati di fibre che vengono poi unite. Per ottenere il composito vero e proprio occorre realizzare la matrice in carbonio attorno alle fibre e ciò è possibile per mezzo della tecnica del "chemical vapor deposition", o mediante l'applicazione di speciali resine.

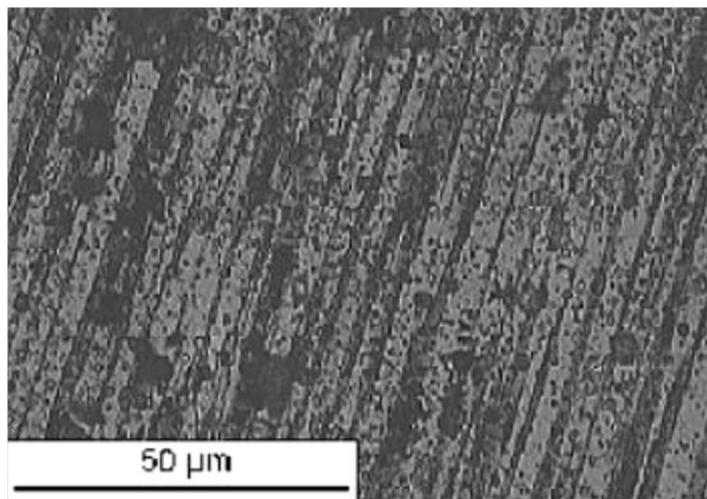


Figura 3.1 – Fibratura a maglie di un composito ceramico C/C.

### 3.1.1 APPLICAZIONI

Il più importante utilizzo dei compositi a matrice ceramica nell'industria automobilistica riguarda senza dubbio i freni a disco. In funzione delle prestazioni che si vogliono ottenere in un impianto frenante di alta gamma, il Carbon-Carbon come i ceramici C/C-Si sono in grado di garantire parametri estremamente vantaggiosi e soddisfacenti come:

- bassa densità e quindi la possibilità di avere componenti molto leggeri, che tradotto nel settore automobilistico il materiale garantisce alte doti di tenuta di strada dei veicolo;
- coefficiente di espansione termica basso, alto calore specifico e alta conducibilità termica; quindi la capacità di lavorare a temperature molto elevate e di smaltire velocemente alte quantità di calore;
- alto coefficiente d'attrito alle alte temperature, ovvero la possibilità di raggiungere alte potenze in fase di frenata, riducendo anche le dimensioni del braccio della forza, e quindi il diametro del disco.

I materiali ceramici avanzati mostrano particolari proprietà che li rendono estremamente utili in applicazioni soggette ad elevate temperature, quali l'elevata durezza, la resistenza in compressione, la refrattarietà, l'inerzia chimica e la bassa densità. Risultano però essere materiali molto fragili, e quindi per poter essere utilizzati per applicazioni strutturali, quale può essere quella di un disco freno, devono necessariamente essere resi più tenaci per mezzo di fibre come è stato trattato.

Il mercato attuale vede come materiale utilizzato per freni a disco a elevate prestazioni il composito ceramico C/C-SiC, studiato dapprima da Porsche AG, e successivamente da varie altre aziende specializzate come Brembo, che ne produce attualmente circa 15000 pezzi/l'anno.



Figura 3.1 - Freni a disco in ceramica della Brembo.

## 3.2 LE MATRICI METALLICHE

Molteplici sono i metalli usati come matrici nei MMC (Compositi a matrice metallica) nell'industria automobilistica, tra questi i più importanti e utilizzati sono il magnesio, il titanio e l'alluminio.

Il magnesio è un metallo avente una bassissima densità ( $1.8 \text{ g/cm}^3$  contro i  $7.8 \text{ g/cm}^3$  del ferro), una buona resistenza specifica, capace di assorbire gli urti e di avere una colabilità appropriata per la colata ad alta pressione insieme e saldabilità in atmosfera controllata. Inoltre presenta una buona resistenza a corrosione ed è di facile reperibilità. Dal punto di vista strutturale presenta un basso modulo di elasticità (circa 42 GPa), limitazioni dal punto di vista del carico di rottura e alla resistenza allo scorrimento plastico ad alte temperature. L'eccellente lavorabilità del magnesio comporta molti vantaggi come le basse potenze richieste, elevate velocità di lavorazione, lunga durata degli utensili, facilità di rottura del truciolo oltre ad avere ottime caratteristiche della superficie finale. Per il magnesio il processo produttivo solitamente utilizzato è di presso colata: ciò consegue una elevata produttività, stabilità dimensionale e una durata degli stampi doppia rispetto all'alluminio (per la bassa affinità del Mg per il Fe).

Il titanio è il materiale metallico candidabile nell'uso dell'automotive ad avere più di ogni altro una eccellente resistenza alla corrosione. Ha inoltre una bassa densità ( $4.51 \text{ g/cm}^3$ ) e proprietà non magnetiche.

L'alluminio presenta i egregi vantaggi come la sua bassa densità ( $2,7 \text{ g/cm}^3$ ), alta conducibilità termica ( $204 \text{ W/mK}$ ), buona colabilità e basso costo rispetto al magnesio e titanio, presenta un alto di isotropia. Per contro ha un basso Modulo di Elasticità (70 GPa) e una bassa resistenza meccanica (60 MPa), motivo per cui è necessaria l'aggiunta di una seconda fase per migliorarne tali proprietà. La sua (bassa) temperatura di fusione è di  $627^\circ\text{C}$ . I compositi a matrice a base di alluminio contengono generalmente silicio, o alternativamente sono rinforzati con allumina. L'utilizzo sempre più insistente dell'alluminio è dovuto in particolar modo dal favorevole rapporto modulo elastico/densità che permette il raggiungimento di alta rigidità specifica.

### 3.2.1 APPLICAZIONI

L'utilizzo dei compositi a matrice metallica nell'industria automobilistica è dettata dalla necessità di diminuire le emissioni di  $\text{CO}_2$  e ridurre il peso dell'auto (con il conseguente diminuzione del consumo di carburante, aumentando le prestazioni); pertanto alluminio e magnesio sono molto considerati e utilizzati visto la loro bassa densità.

L'uso del magnesio comunque avviene già da molti anni: si deve considerare che già nel 1936 la Volkswagen Beetle conteneva circa 20Kg di magnesio per i componenti della trasmissione e il blocco motore, o come nella Mercedes SL 300 Le Mans che nel 1955 disponeva di una carrozzeria in fogli di magnesio. Attualmente il magnesio è utilizzato per moltissimi componenti di un'auto, per esempio nei cerchi in lega, schienali dei sedili, armatura volante oltre che alla realizzazione di blocchi motori (per esempio, in lega di Mg-Al-Sr) etc.



Figura 3.2 – (1955) Mercedes SL 300 Le Mans.

L'alluminio invece è utilizzato in notevole quantità nella produzione attuale di automobili, per esempio nella produzione di pannelli di protezione interna, parti di sedili, componenti ausiliari del motore e delle sospensioni, componenti dei freni, supporti meccanici oltre a impianti di condizionamento e raffreddamento motore.



Figura 3.3 – (2012) Audi A8, scocca e carrozzeria completamente in alluminio.

## 3.3 LE MATRICI POLIMERICHE

### 3.3.1 TERMOINDURENTI

Le matrici termoindurenti più utilizzate nel settore automobilistico sono:

- resine epossidiche, eccellenti nell'adesività, resistenza al calore e chimica, inoltre possiedono buone proprietà meccaniche se rinforzati con fibre e ricoprono tutt'ora l'80% circa delle matrici termoplastiche;
- le poliesteriche, matrici termoindurenti solitamente rafforzate con fibra di vetro per realizzare la vetroresina. Gode di buone proprietà meccaniche;
- Le poliammidiche, hanno la struttura di una termoplastico ma l'infusibilità di un termoindurente.

### 3.3.2 TERMOPLASTICHE

I polimeri termoindurenti hanno avuto uno sviluppo nell'utilizzo molto accentuato negli anni, anche se negli ultimi anni le tecnologie moderne vogliono l'utilizzo di polimeri termoplastici proprio perché i vantaggi che possono offrire. I termoplastici hanno la proprietà, come il polipropilene e polietilene, di essere rifusi e riformati; di ottenere una riduzione dei costi e delle spese per via che i termoplastici vengono prodotti con materie prime più economiche; proprietà meccaniche migliori rispetto ai termoindurenti e quindi migliore durezza; hanno una temperatura di transizione vetrosa ben controllata e quindi una conseguente migliore capacità di controllare la temperatura di processo produttivo; in ultimo un migliore stoccaggio del materiale.

Le matrici termoplastiche più utilizzate nel settore automobilistico sono:

- l'ABS (acrilonitrile-butadiene-stirene), dimensionalmente stabile e rigido, presenta una buona resistenza all'impatto, all'abrasione e agli agenti chimici. Presenta buone proprietà di resistenza e tenacità anche alle basse temperature. E' utilizzato principalmente nella componentistica interna;
- le matrici aciliche (PMMA), che possiedono resistenza moderata, buone proprietà ottiche e di resistenza alle condizioni atmosferiche. Sono trasparenti, ma possono essere rese opache appunto con l'introduzione di fibre. Sono utilizzate principalmente nei parabrezza o nei vetri oscurati;
- il polipropilene (PP), ha buone proprietà meccaniche, elettriche e chimiche. Utilizzato per componenti interni;

- il polietilene (PE), poco costoso, ha generalmente proprietà di medio/basso livello. Il suo utilizzo è dettato dalle buone proprietà di isolare termicamente e di insonorizzare;
- le acetaliche, che hanno buone proprietà di resistenza, rigidità, resistenza al creep, all'abrasione, all'umidità, al calore e agli agenti chimici. Utilizzate nelle valvole e nei cuscinetti;
- il poli-eter-eter-chetone (PEEK), è nello studio dei componenti auto in compositi plastici di ultima generazione. offre un profilo di prestazioni unico e in grado di consentire a progettisti e ingegneri di contenere i costi, ottenere prestazioni inedite e ottimali. Sono moltissimi i componenti già realizzati o realizzabili con il polimero presenti nel motore, nei sistemi delle trasmissioni, delle sospensioni o per la regolazione dei sedili e poi per gli ammortizzatori, la frizione, i fari, la gestione dei carburanti, i sensori elettronici, i sistemi Hvac, i moduli delle portiere, i piccoli motori come quelli dei tergicristalli, e poi nelle pompe per vuoto e anche i freni.

## **CAPITOLO 4: IL PEEK**

### **4.1 INTRODUZIONE AL MATERIALE**

Il Poli-eter-eter-chetone (PEEK) è un polimero organico appartenente alla famiglia dei poli-aril-eter-chetoni (PAEKs), polimeri termoplastici ad alta temperatura, costituiti da una catena molecolare aromatica con conformazione a "zig-zag", formata da anelli di arile interconnessi attraverso specifici gruppi funzionali quali gli eteri e i chetoni. Il PEEK è un polimero semicristallino, costituito da una fase amorfa e da una fase cristallina, variabile tra il 30 e il 35%. Si presenta in forma di lamelle di spessore compreso tra i 50 e i 60Å, corrispondente a circa 10-12 anelli di arile o di sfere di diametro compreso tra i 25 e i 40µm. Questa variabilità dipende dalla tecnica con cui esso è stato processato. Pertanto la sua particolare struttura conferisce al polimero elevata resistenza e stabilità dal punto di vista sia meccanico che chimico.

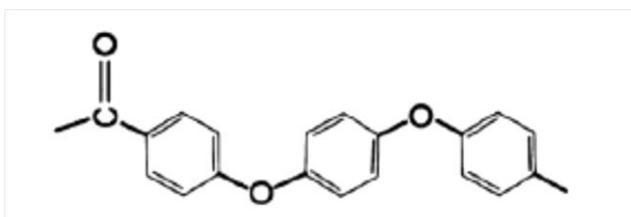
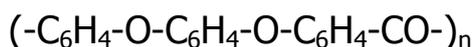


Figura 4.1 – Struttura e formula chimica del PEEK.

#### **4.1.1 STORIA DEL MATERIALE**

La comparsa sul mercato del PEEK risale al 1978 ad opera della VICTREX<sup>®</sup>, azienda leader nella produzione del materiale con sede centrale in Gran Bretagna (Lancashire). Il polimero viene prodotto in forme diverse: polveri, granuli, pellet, a seconda della tecnica di processo prevista, e in gradi diversi a seconda della viscosità o che l'applicazione richieda un grado non caricato ai fini dell'elevata purezza oppure un grado caricato per migliorarne la forza.

Il polimero VICTREX<sup>®</sup> PEEK<sup>™</sup> si è rapidamente diffuso nel mondo, dapprima nell'Europa occidentale e negli Stati Uniti, in risposta alle sole esigenze del mercato dell'automobile e dei trasporti, a causa degli elevati costi di produzione, decisamente superiori, oltre i due ordini di grandezza, rispetto ai polimeri termoplastici a bassa temperatura come il polietilene. Successivamente però l'attività si è allargata su scala globale e il polimero è diventato il

protagonista di molte delle innovazioni attuali in svariati comparti di mercato che vanno dal settore aerospaziale a quello petrolifero, dall'elettronica fino alla produzione alimentare, medicale, tessile.

#### 4.1.2 PROPRIETA' CHIMICO-FISICHE E MECCANICHE

La VICTREX® è l'unico produttore del polimero VICTREX® PEEK™. Questo polimero lineare aromatico semicristallino è riconosciuto come il materiale termoplastico dalle prestazioni più elevate attualmente disponibile, che si possono così riassumere:

- Resistenza termica: non solo è in grado di sopportare temperature in continuo di 260 °C, ma mantiene anche, nel breve termine, le proprie qualità meccaniche nei pressi del proprio punto di fusione a 340 °C.
- Resistenza all'attrito e all'usura: gli elevati valori di rapporto Pressione/Velocità lo rendono particolarmente adatto per essere utilizzato in applicazioni che richiedano elevate prestazioni tribologiche, che vanno molto oltre quelle dei metalli o di altri materiali plastici ad elevate prestazioni.
- Resistenza chimica: il polimero VICTREX® PEEK™ mostra una eccellente resistenza alle basi, gli acidi, i reagenti organici ed inorganici anche alle alte temperature. Inoltre, non teme l'aggressione dei fluidi tipicamente utilizzati nel settore dell'automobile, come i lubrificanti, i grassi, il liquido per i freni, le benzine, i refrigeranti.
- Stabilità idrolitica: le proprietà meccaniche e di stabilità dimensionale non vengono compromesse in presenza di acqua o vapore anche a temperature elevate.
- Resistenza all'umidità: l'umidità non compromette le proprietà meccaniche, né genera variazioni dimensionali.
- Resistenza all'urto: il polimero VICTREX® PEEK™ unisce elevata resistenza all'eccellente forza, in un vasto spettro di temperature e condizioni ambientali.
- Forza: questo materiale mostra una elevata resistenza al creep in diverse condizioni termiche e la forza specifica dei compound in VICTREX® PEEK™ può eccedere quella dei metalli leggeri.
- Infiammabilità: il polimero mostra una classificazione V-O, senza necessità di cariche di autoestinguenti.
- Coefficiente di dilatazione termica (CTE): il polimero presenta un basso indice di CTE che può essere adattato a diverse tipologie di cariche per abbinare il CTE dell'acciaio o dell'alluminio.

## 4.2 TECNICHE DI LAVORAZIONE

Il PEEK, dopo essere sinterizzato, può essere processato con le tecniche normalmente utilizzate per tutti i polimeri termoplastici convenzionali, ovvero secondo estrusione, injection molding, compression molding, per ottenere così la forma desiderata.

- Injection molding: Lo stampaggio ad iniezione è un processo di produzione industriale plastico; il polimero in fase liquida viene immesso in una forma permanente detta stampo attraverso una forza di iniezione esercitata da una vite a cui viene applicata una pressione che la fa muovere come un pistone. Per stampare correttamente i materiali VICTREX® PEEK™, l'iniezione del polimero deve avvenire a pressioni elevate, fino a 14MPa, ed a temperature comprese tra 175 e 205° C, condizioni che consentono lo scorrimento del materiale "plastificato" in un'apposita sezione della pressa stessa, un buon riempimento dello stampo e un elevato livello di cristallinità nei manufatti. L'area di sviluppo del manufatto e del canale determina la forza di chiusura richiesta per impedire l'apertura dello stampo alla pressione massima di iniezione. Questa viene applicata idraulicamente o meccanicamente, e nel caso del polimero naturale corrisponde solitamente a 50-80MPa, arrivando però fino a 65-125MPa nel caso di composti rinforzati con fibre di vetro o di Carbonio. La maggior parte delle presse a iniezione con viti rotanti sono in grado di stampare sia i gradi caricati sia quelli non caricati. I componenti complessi e con forme intricate possono essere prodotti su base industriale senza necessità di ricottura o con macchine convenzionali.

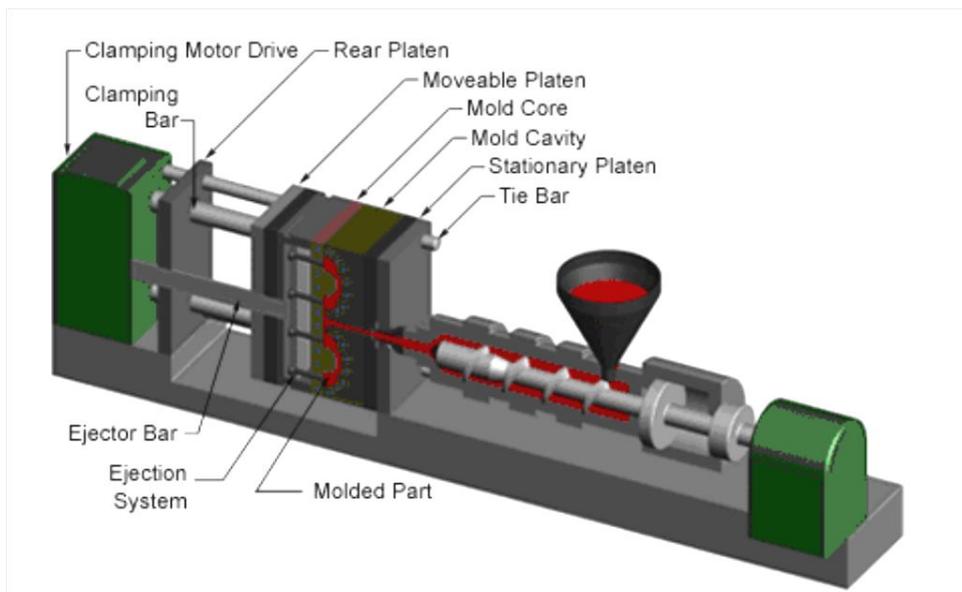


Figura 4.2 – Injection molding.

- Compression molding: Nello stampaggio a compressione il materiale, sotto forma di polvere pre-essicata per eliminare il più possibile problemi di porosità e bolle, è inserito in uno stampo aperto, costituito da una matrice ed un punzone. Quando lo stampo, riscaldato fino a 400° C per causare la completa fusione del polimero, si chiude, il punzone viene compresso con forze comprese tra 350 e 700bar facendo scorrere lentamente la resina e costringendola ad assumere la forma voluta. Lo stampo viene poi raffreddato fino a quando la temperatura scende al di sotto di 150° C, e il pezzo può così essere estratto dallo stampo. Gli stampi devono essere realizzati in metalli resistenti alla corrosione; buoni risultati sono stati ottenuti con l'acciaio inox duro, mentre è altamente sconsigliato utilizzare acciai dolci e acciai contenenti rame. Come regola generale, i componenti stampati a compressione sono più cristallini, possiedono un modulo più elevato nonché una maggiore resistenza a trazione, sono più duri, e mostrano in una minore duttilità.

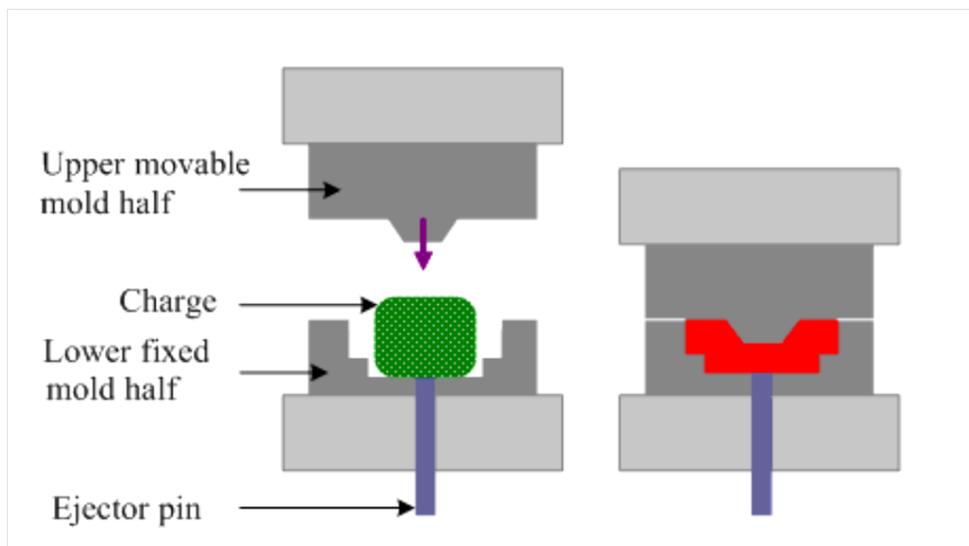


Figura 4.3 - Compression molding.

## 4.3 IL PEEK RINFORZATO

Il problema maggiore nell'applicazione di polimeri nell'ingegneria è legata alla loro bassa rigidità e resistenza, se comparata ad esempio con i metalli. Per ovviare a questa carenza è possibile realizzare un design particolare per raggiungere i necessari valori di rigidità e resistenza, oppure nel caso più indicato aggiungere alla matrice fibre o particelle di rinforzo per ottenere un materiale composito con proprietà meccaniche superiori.

Nel secondo caso i materiali preposti al rinforzo, principalmente Carbonio e vetro, sono più rigidi della matrice polimerica in cui sono immersi e si deformeranno di meno. Se si considera una

matrice polimerica rinforzata sottoposta a un carico assiale si può notare che la particella determina una riduzione generale nella deformazione del materiale, specialmente in vicinanza della particella stessa, e questo effetto è legato essenzialmente all'interfaccia matrice-rinforzo; maggiore è la resistenza di questo legame maggiore sarà la resistenza del composito.

Il PEEK è un composito altamente compatibile con il Carbonio, con il quale instaura dei legami con valori di resistenza molto elevati, considerando una forza di legame massima di soli 7.1MPa per il polietilene contro i circa 70MPa per il PEEK. Questo permette di ottenere un materiale ad elevatissima rigidità e resistenza meccanica alle sollecitazioni cicliche, in termini sia di usura che di fatica, superiori a quelle di ogni altro polimero termoplastico e di molti metalli. Una forza di legame non adeguata, oltre ad inficiare le proprietà meccaniche del polimero naturale, può provocare la fuoriuscita delle fibre dalla matrice polimerica con una conseguente azione abrasiva sulla superficie dell'altra componente articolare.

<i>proprietà</i>	PEEK naturale	20% CF/PEEK	30% CF/PEEK	60% CF/PEEK
<b>Tensile strength [MPa]</b>	100	200	228	340
<b>Flexural strength [MPa]</b>	170	288	324	590
<b>Flexural modulus [GPa]</b>	4	15	19	50

Tabella 4.1 – Proprietà meccaniche del PEEK naturale e rinforzato con fibre di Carbonio.

## 4.4 APPLICAZIONI PER L'AUTOMOTIVE

L'aumento delle prestazioni, la diminuzione delle masse e dei costi, la sicurezza e l'efficienza energetica sono le attuali tendenze nel settore automobilistico e il polimero Victrex Peek rappresenta, in un numero crescente di applicazioni, un valido sostituto dei materiali tradizionali, metalli ma non solo, in grado di garantire prestazioni elevate a costi vantaggiosi. Il PEEK possiede infatti una favorevole combinazione di proprietà meccaniche, fisiche e tribologiche, unitamente a una notevole resistenza chimica agli agenti tipicamente presenti negli autoveicoli. Le

numerosissime pompe presenti in una automobile costituiscono una delle principali applicazioni favorevoli ai materiali termoplastici ad alte prestazioni nella sostituzione dei metalli. L'utilizzo di tali materiali nella costruzione di parti di pompe a ingranaggi, di pompe di alimentazione e iniezione, di pompe per vuoto e di pompe a diaframma, grazie alle tolleranze ottenibili e alle proprietà termiche e meccaniche, consente infatti performance confrontabili con quelle dell'acciaio. Le ruote dentate, utilizzate nei diversi azionamenti presenti in un veicolo, sono un altro componente d'elezione per il PEEK. Esempi tipici, caratterizzati da stringenti requisiti di prestazioni e/o di sicurezza, sono rappresentati dalle ruote dentate per la regolazione dei sedili, dagli ingranaggi di riduzione degli azionamenti elettrici che controllano le aperture di ventilazione nei sistemi di condizionamento, dagli ingranaggi dei freni di stazionamento elettrici, sottoposti a carichi elevati e a picchi di temperatura, dagli ingranaggi conici dei servosterzi elettrici. Ai materiali delle ruote dentate sono richiesti elevati valori di resistenza a fatica e le prestazioni del PEEK sono significativamente più elevate di quelli di materiali polimerici più comuni.

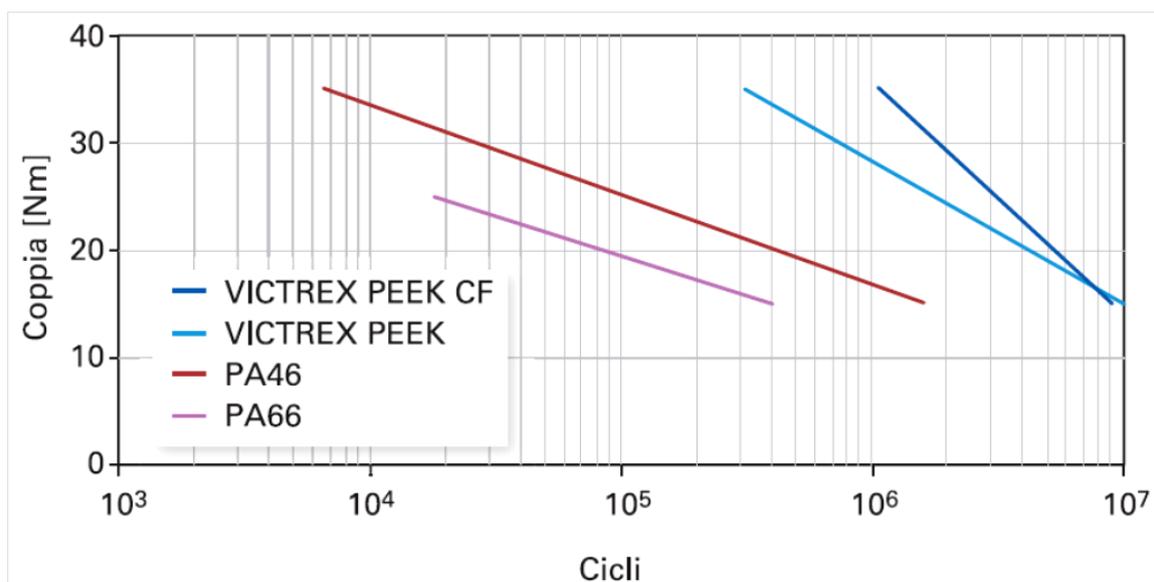


Figura 4.4 - Resistenza a fatica, in termini di coppia trasmissibile, del PEEK e di altri materiali polimerici (risultati a 120° C con lubrificazione a olio).

Nelle auto di ultima generazione è sempre più richiesta la riduzione delle dimensioni dei motori e dei cambi, con un conseguente incremento della densità di potenza e di coppia da trasmettere. In questo contesto il PEEK ha dato prova di poter sostituire egregiamente metalli e altri polimeri in molti componenti della trasmissione. Grazie alla possibilità di essere stampato a iniezione con tolleranze molto strette e senza necessità di trattamenti successivi, il VICTREX® PEEK™ si è imposto in alcune applicazioni tipiche quali gli anelli di tenuta, gli anelli reggi spinta, parti di cuscinetti e valvole di controllo. Il suo principale vantaggio, oltre alle prestazioni meccaniche che è in grado di fornire, è costituito dal ridotto coefficiente di attrito anche nelle applicazioni a secco o

in condizioni di lubrificazione ridotta. Proprio per gli anelli reggispinta, VICTREX<sup>®</sup> ha messo a punto un composito specifico (il 450FC30, con il 10% di fibra di carbonio, grafite e PTFE) in grado di formare un film sulla superficie coniugata con una conseguente significativa riduzione delle condizioni di usura. Nelle trasmissioni automatiche infatti gli anelli reggispinta sono sottoposti a condizioni tribologiche estreme, determinate dalla combinazione di grandi forze assiali ed elevate velocità di rotazione, alle quali si aggiungono gli effetti di temperature del lubrificante (150°C). I volani a doppia massa sono un altro tipico impiego per gli anelli reggispinta nei cambi degli autoveicoli, nel quale si trovano interposti tra le due masse in moto relativo, sono sottoposti a temperature molto elevate e devono garantire un coefficiente d'attrito costante al variare della temperatura fino ai 180°C. Gli anelli reggispinta sono inoltre utilizzati nei rotismi epicicloidali dei cambi automatici, come ad esempio i cambi automatici della GM Powertrain, in cui riescono a sopportare pressioni di circa 4 MPa a 6.500 giri/min e, recentemente, sta prendendo piede il loro utilizzo nelle trasmissioni CVT, dove sono soggetti a velocità di rotazione fino a 10.000 rpm.



Figura 4.5 – Anelli di reggispinta in Victrex PEEK.

Un altro esempio di utilizzo del VICTREX<sup>®</sup> PEEK<sup>™</sup> nell'industria per automotive è la realizzazione di ingranaggi di alberi per bilanciamenti di massa della Metaldyne, società leader nella produzione di alberi di bilanciamento e dei relativi moduli, in quanto desiderava migliorare la propria tecnologia tradizionale utilizzata negli ingranaggi dei moduli degli alberi di bilanciamento di massa, ottimizzando così i consumi dei veicoli. Ha quindi deciso di utilizzare il polimero VICTREX<sup>®</sup> PEEK<sup>™</sup> per sostituire il metallo in un progetto innovativo che garantisce durata, affidabilità e migliore efficienza. Rispetto agli ingranaggi tradizionali realizzati in ferro o in acciaio, il polimero VICTREX<sup>®</sup> PEEK<sup>™</sup> ha consentito di ottenere una diminuzione del 70% a livello di inerzia e di peso. Questi fattori sono particolarmente importanti in quanto, sia il peso inferiore che la minore inerzia,

consentono una riduzione compresa fra il 3 e il 9% di consumo energetico, che si traduce in un risparmio di carburante del veicolo stesso. Inoltre utilizzando il polimero VICTREX® PEEK™ per gli ingranaggi si contribuisce a migliorare l'impatto acustico, le vibrazioni e la performance di robustezza. I moduli dell'albero di bilanciamento di massa sono utilizzati per annullare le forze di oscillazione intrinseca associate ai motori in linea a 4 cilindri: poiché i moduli imprimono un doppio effetto rotatorio al motore, fino a 15.000 giri al minuto, i polimeri non possono essere in genere utilizzati poiché le massime temperature operative in un motore a 4 cilindri si avvicinano ai 155°C e la maggior parte dei polimeri non sopporta queste condizioni. Invece il polimero VICTREX® PEEK™ proprio per la sua capacità unica di sopportare una tale temperatura e riesce a mantenere tutte le sue proprietà compresa la resistenza alla fatica, quella chimica, l'elevata resistenza termica e la forza. Ne deriva pertanto un ingranaggio che può operare ad un livello molto elevato non solo in termini di durata ed affidabilità, ma anche di migliori prestazioni nonostante la presenza di alte temperature. Gli ingranaggi realizzati con il polimero VICTREX® PEEK™ richiedono un capitale di investimento sostanzialmente inferiore rispetto a quelli in metallo e inoltre offrono minori tempi di consegna grazie al fatto che sono stampati ad iniezione e non necessitano di lavorazioni secondarie, eliminando così l'esigenza di macchine rettificatrici. Pertanto si può procedere immediatamente all'assemblaggio degli ingranaggi nei moduli degli alberi di bilanciamento.



Figura 4.6 – Ruota dentata in VICTREX PEEK.



Fig. 4.7 - Ingranaggi per alberi di bilanciamento dimassa Metaldyne

## **CAPITOLO 5: LE FIBRE TRADIZIONALI PER L'AUTOMOTIVE**

### **5.1 LE FIBRE DI CARBONIO**

Il precursore che in realtà ha iniziato l'era delle fibre di carbonio (1960), è la fibra di poliacrilonitrile, PAN, caratterizzata da una composizione chimica adeguata, da un particolare orientamento molecolare e da una certa morfologia; questo è il processo che ricopre attualmente il maggior interesse industriale. La composizione chimica è importante per moderare l'esotermicità della reazione di ciclizzazione dei  $-\text{CN}$  (ossidazione in aria),  $18\text{kcal/mole}$ , condotta a  $220 - 260\text{ }^\circ\text{C}$  per alcune ore. La reazione di ciclizzazione porta ad un materiale ignifugo di colore nero, PAN ossidato, ma con proprietà meccaniche modeste, che viene utilizzato per 50 abbigliamento protettivo, per ovatte ignifughe o in compositi carbonio-carbonio, per freni ad elevate prestazioni (aerei, macchine da corsa e treni ad alta velocità). Il processo successivo di carbonizzazione ( $400-1000\text{ }^\circ\text{C}$ ) è generalmente condotto in atmosfera inerte o sotto vuoto e porta alla rimozione di atomi dalla struttura e allo sviluppo della struttura grafitea. Da  $400$  a  $1000^\circ\text{C}$  si sviluppano  $\text{HCN}$ ,  $\text{NH}_3$  e  $\text{N}_2$ ; possono svilupparsi anche  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$  in funzione della quantità di  $\text{O}_2$  che il precursore ossidato ha legato durante il trattamento a  $220-260\text{ }^\circ\text{C}$  in aria. Dopo il trattamento a  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  la fibra contiene più del 90% di carbonio e circa il 5% di azoto. È molto importante controllare la ritrazione della fibra durante la fase di ciclizzazione a  $220-260\text{ }^\circ\text{C}$ , in quanto in questa fase viene determinato l'allineamento dei segmenti molecolari lungo l'asse della fibra, orientamento da cui dipende il modulo elastico finale. L'orientamento molecolare impartito alla fibra acrilica originale influenza la tenacità ed il modulo elastico della fibra finale. Un eccessivo orientamento è negativo perché introduce difetti superficiali all'interno della fibra. È interessante notare come, nel caso di fibre prodotte da PAN, le proprietà meccaniche siano influenzate dalla temperatura di carbonizzazione: con l'aumentare di detta temperatura il modulo elastico cresce sempre mentre la resistenza raggiunge un massimo a circa  $1500\text{ }^\circ\text{C}$ . Riscaldando il poliacrilonitrile, il calore fa ciclizzare i gruppi laterali ciano delle unità ripetitive e si formano degli anelli. Innalzando la temperatura di riscaldamento, gli atomi di carbonio perdono via i loro idrogeni rendendo gli anelli aromatici. Questo processo libera idrogeno gassoso che dà un polimero a nastro costituito da anelli uniti tra loro; si porta la temperatura da  $600$  fino a  $1300^\circ\text{C}$  facendo sì che nastri appena formati si uniscono tra loro per dare origine a nastri ancora più larghi come in figura 5.1.

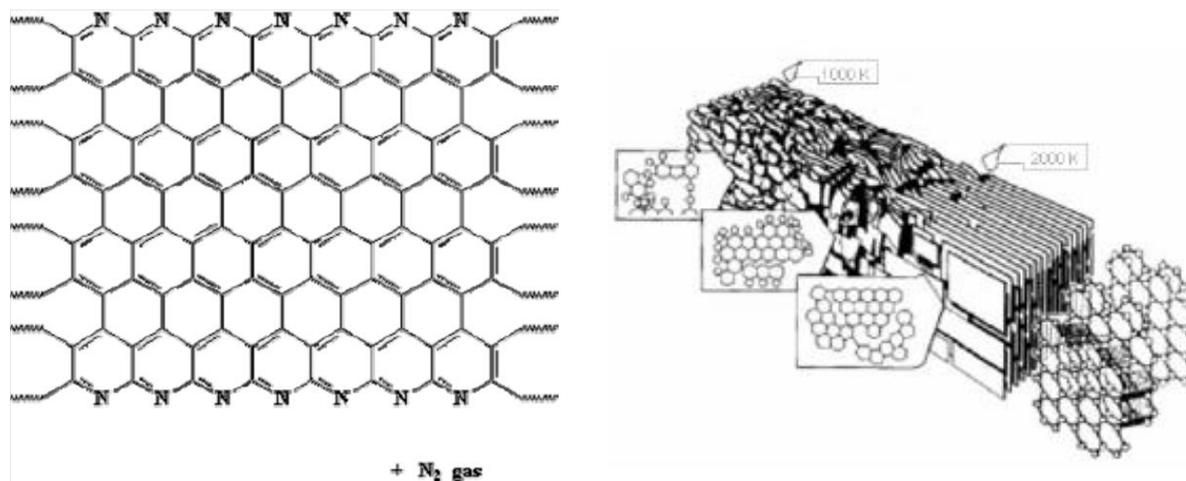


Figura 5.1 – Nastri di fibre di poliacrilonitrile (PAN)

Quando ciò accade si libera azoto gassoso: il polimero che si ottiene ha atomi di azoto lungo i bordi, e questi nuovi larghi nastri possono quindi ancora fondersi per formare nastri ancora più larghi. Tanto più ciò avviene, tanto più viene espulso azoto. Giunti alla fine, i nastri sono molto larghi e gran parte dell'azoto se ne è andato, lasciandoci dei nastri che sono per lo più puro carbonio nella forma di grafite. Ecco perché questi polimeri vengono chiamati fibre di carbonio.

Le elevate prestazioni meccaniche, ottenibili con compositi a fibre continue di carbonio, la loro provata affidabilità, il loro peso ridotto (a parità di proprietà meccaniche) e il loro crescente uso anche nel campo automobilistico.

Una seconda famiglia di fibre di carbonio che si differenzia dalla prima secondo un differente processo produttivo sono le fibre di carbonio da pece. Il pitch, pece o residuo catramoso, è il residuo della distillazione del catrame o del petrolio e consiste di migliaia di idrocarburi aromatici che formano un sistema multi eutettico con temperature di rammollimento tra 50 e 300 °C di gran lunga inferiori alle temperature di fusione dei componenti aromatici puri. Per trattamento termico tra 400 e 450 °C si forma una mesofase, ovvero cristalli liquidi aventi un ordine molecolare intermedio tra quello dei cristalli e quello di un liquido. Per il gradiente di scorrimento, durante l'estrusione dal fuso, si ottiene una fibra precursore di quella di carbonio; le molecole della mesofase vengono orientate lungo l'asse della fibra. Il processo di produzione di fibre di carbonio da mesofase della pece è così riassunto: il precursore pece o catrame viene trattato termicamente sopra 350 °C per essere convertito in mesofase contenente le due fasi isotropa ed anisotropa. Dopo estrusione, a circa 380 °C, la fase isotropa viene resa infusibile per termofissaggio in aria ad una temperatura al di sotto del punto di rammollimento a circa 300 °C. La fibra viene infine carbonizzata a 1000 °C o trattata a temperature superiori a 2000 °C per produrre fibre di grafite ad elevato modulo elastico. I vantaggi principali di questo processo è che non è richiesta alcuna tensione dei filamenti durante la fase di carbonizzazione e di grafitizzazione ed i tempi delle singole

fasi che sono molto più brevi del processo da PAN. Si può notare, confrontando i dati caratteristici dei due tipi di fibre, che quelle ottenute da catrame presentano un elevato modulo elastico a scapito della resistenza, superiore per le fibre ottenute partendo dal poliacrilonitrile.

Ciò nonostante la principale suddivisione dei tipi di fibre di carbonio è fatta in base alle proprietà meccaniche. Esistono infatti quelle a:

- modulo ultra alto (UHM): sono utilizzate con un limitatissimo contributo di resina epossidica in relazione alla quantità di fibra di carbonio utilizzata. Vengono usate in sostituzione alle leghe di alluminio per la loro leggerezza. Questi tipi di fibre possono avere moduli 5 volte superiori a quello dell'acciaio ma possono formare compositi con comportamenti molto fragili;
- modulo alto (HM): presentano maggiore resina in relazione alla quantità di fibra di carbonio utilizzata. Ha un modulo inferiore ma una resistenza maggiore;
- alta resistenza (HS): sono fibre con un alta resistenza a trazione. E' il tipo più utilizzato.

<b>Proprietà</b>	<b>Alta resistenza</b>	<b>Alto modulo</b>	<b>Modulo ultraelevato</b>
Diametro ( $\mu\text{m}$ )	5,5-8,0	5,4-7,0	8,4
Densità ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1,75-1,80	1,78-1,81	1,96
Contenuto di carbonio (%)	92-95	>99	>99
Resistenza a trazione (MPa)	3105-4555	2415-2555	1865
Modulo tensile (GPa)	228-262	359-393	517
Allungamento a rottura (%)	1,3-1,8	0,6-0,7	0,38

Figura 5.2 – Proprietà di fibre di carbonio prodotte da PAN.

### 5.1.1 NANOTUBI DI CARBONIO

Scoperti casualmente nel 1991, i nanotubi di carbonio costituiscono un interessante tipologia di materiale formato esclusivamente da atomi di carbonio disposti in cristalli regolari e simmetrici. Vengono raggruppati nella più ampia classe delle nanostrutture di carbonio. Le nanostrutture di carbonio comprendono tutti quei materiali nanocristallini non planari costituiti da strati grafenici arrotolati. La creazione di tali strutture viene spiegata come una conseguenza dell' elevata reattività dei molti legami "liberi" (dangling-bonds) che caratterizzano i bordi di strati grafenici di dimensioni finite. La formazione di strutture tubolari ricurve comporta la stabilizzazione generale del sistema associata, tuttavia, ad un relativo aumento di energia tensionale. La maniera più semplice per visualizzare la struttura dei nanotubi di carbonio è quella di pensare a piani di grafite arrotolati su loro stessi a formare una serie di cilindri coassiali perfettamente chiusi e senza giunzioni. Le strutture formate da un unico piano di grafite arrotolato assumono il nome di

nanotubi di carbonio a parete singola (SWCNT) o tubi grafenici, mentre quelle formate dall'arrotolamento di più tubi, prendono il nome di nanotubi di carbonio a parete multipla (MWCNT).

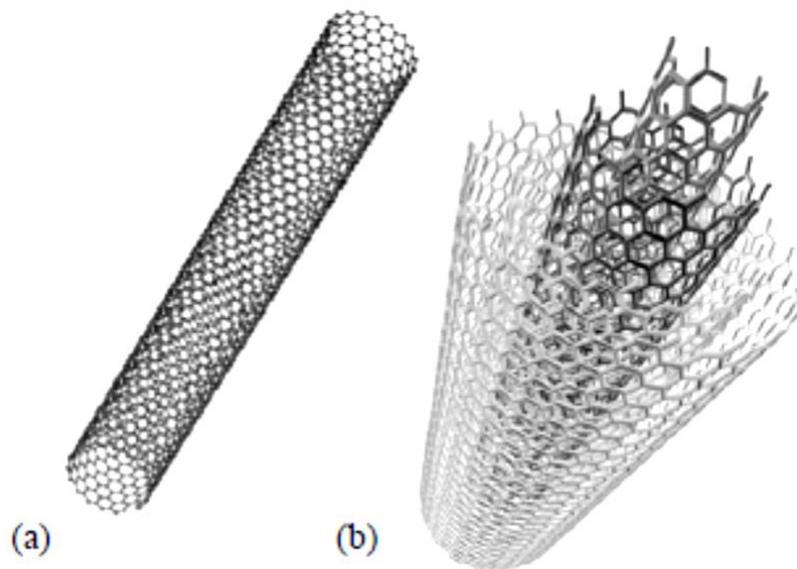


Figura 5.3 - (a) nanotubo a parete singola; (b) nanotubo a parete multipla.

I nanotubi sono materiali ad elevata flessibilità e rigidità: essi possono dar luogo a rigidi sistemi elastici di densità molto bassa, con ineguagliabili proprietà meccaniche di forza tensile e modulo di Young. La forza e la rigidità di tali materiali derivano essenzialmente dalla resistenza del legame carbonio-carbonio distribuito su tutta la lunghezza della nanostruttura. Alcuni studi teorici hanno indicato valori del modulo di Young estremamente elevati, fino a circa 5 TPa. Dati sperimentali, invece, un valore medio di 1.8 TPa. Tale modulo elastico risulta inoltre indipendente dalle dimensioni e del nanotubo. Un'altra proprietà assai interessante è la capacità dei nanotubi di sopportare elevati livelli di deformazione plastica senza fratturarsi. Questa caratteristica, combinata con la loro bassa densità (da 1.33 a 1.40 g/cm<sup>3</sup>), sembra destinata a costituire il vero punto di vantaggio rispetto alle fibre di carbonio oggi disponibili. I nanotubi possono subire deformazioni assiali fino al 16% senza frattura mentre studi di simulazioni hanno previsto la possibilità di sopportare deformazioni reversibili come piegamento, compressione e torsione assiale fino al 30-40% prima della frattura. L'estrema resistenza, unita alla loro flessibilità, li rende ideali per l'uso come fibre di rinforzo nei materiali compositi ad alte prestazioni, in sostituzione delle normali fibre di carbonio, di kevlar o delle fibre di vetro. Diversi sono naturalmente i metodi di produzione rispetto ai classici materiali compositi: a scarica ad arco elettrico, vaporizzazione laser e chemical vapour deposition sono alcune di queste.

## 5.1.2 APPLICAZIONI

Grazie alle sue elevate proprietà meccaniche, le fibre di carbonio sono molto utilizzate nell'industria automobilistica, specie nell'élite dell'automotive in quanto capace di garantire elevatissima rigidità e allo stesso tempo ottenere automobili leggere, fattori che portano ad ottenere prestazioni eccellenti. Ragion per cui furono le monoposto da Formula Uno per la prima volta ad adottare la fibra di carbonio per la propria monoposto, nel 1981 quando la scuderia Mc Laren realizzò un telaio in materiale composito. Da qui ben presto tutte le altre scuderie realizzarono il telaio e altri componenti (come i vari spoiler, appendici aerodinamiche, etc.) della proprio monoposto in materiale composito in fibra di carbonio e resina epossidica. Attualmente infatti, circa il 60% del peso di una vettura da Formula Uno è fatta da materiali compositi (principalmente fibre di carbonio in una matrice costituita da resina epossidica, per realizzare componenti quali la monoscocca, il musetto, parti delle sospensioni, scatola del cambio etc.). Riferendosi alla monoposto della Ferrari del 2007, la F2007, per garantire il peso minimo di 600Kg stabilito dal regolamento della FIA era stato necessario aggiungere circa 80kg di zavorra in lega di tungsteno, il che fa capire come l'impiego di materiali compositi da come risultato un'automobile estremamente leggera e performante.



Figura 5.4 – Monoposto di Formula Uno, Ferrari F2007.

Dalla lunga esperienza in Formula Uno, la Ferrari decise di applicare l'eccellenza tecnologica in termini di prestazioni e innovazione dei materiali sulla realizzazione nel 2002 della Ferrari Enzo: la carrozzeria realizzata in fibre di carbonio e Nomex, in pannelli sandwich che hanno così consentito di realizzare una scocca molto leggera, oltre che rigida e sicura. Per estremizzare il concetto di leggerezza, gli interni sono stati realizzati in gran parte in fibra di carbonio come i sedili e le principali superfici a vista dell'abitacolo.

Quando si parla di fibra di carbonio nell'automotive, non può non essere menzionata la Lamborghini in quanto l'unico costruttore automobilistico che gestisce in proprio l'intero processo

della fibra di carbonio, dalla progettazione 3D alla simulazione computerizzata, produzione, collaudo e controllo qualità, portate avanti con un modernissimo processo industriale di altissimo livello qualitativo.

Lamborghini affronta le sfide del futuro sposando con risolutezza l'ingegneria della costruzione leggera, basata fundamentalmente sull'utilizzo mirato di materiali compositi in fibra di carbonio nella realizzazione di supersportive estremamente dinamiche e nel tempo stesso sostenibili in termini di consumi ed emissioni. Uno dei suoi nuovi modelli, la Aventador LP 700-4, riflette esattamente questa scommessa sul carbonio, presentandosi con una innovativa monoscocca, ideata e prodotta interamente dalla Casa di Sant'Agata. La scocca prodotta in serie della supersportiva di punta della Lamborghini è realizzata interamente in fibra di carbonio, nonché progettata con una struttura unica. Ciò significa che la scocca della vettura si presenta come un guscio unico, che agisce fisicamente come un singolo componente, traendo il massimo vantaggio dall'estrema rigidità dei materiali rinforzati in fibra di carbonio (CFRP) e quindi offrendo una maggiore sicurezza in caso di incidente, agendo come una gabbia estremamente sicura. Il concetto della monoscocca quindi offre vantaggi che altri metodi, quali ad esempio quello che prevede la sola parte inferiore in struttura unica con il tetto in metallo attaccato in modo convenzionale, non rende possibili. L'intera monoscocca pesa soltanto 147.5kg mentre l'intero telaio 229.5Kg, tutt'al più offrendo una rigidità torsionale eccellente.



Figura 5.5 – Telaio della Lamborghini Aventador LP 700-4.

Un altro esempio di utilizzo di fibra di carbonio nella produzione di componenti per l'automotive sono sicuramente le automobili realizzate per il campionato DTM 2012 da Audi, Mercedes-Benz e BMW. La nuova Audi A5 DTM, come regolamento impone, ha rinforzati tutti gli standard di sicurezza. Sempre maggiore è la resistenza della monoscocca in fibra di carbonio che si combina perfettamente con la gabbia di metallo. Le fiancate della vettura sono caratterizzate da un design ibrido realizzato con fibra di carbonio, Zylon (l'aggiunta di fibre di Zylon aumenta la resistenza all'impatto) e Rohacell (espanso rigido polimetacrilimmidico a struttura cellulare), il tutto rinforzato da pioli. Nel complesso la monoscocca è stata irrobustita per tutta la sua lunghezza. In caso di impatto laterale, la struttura deve essere capace di assorbire un urto ben quattro volte superiore rispetto all'anno precedente (360KN contro gli 80KN del regolamento dell'anno precedente). Inoltre la prevenzione del possibile innesco delle fiamme in caso di incidente viene ampliata ulteriormente. Le nuove generazioni di vetture DTM prevedono infatti che il serbatoio, esattamente come l'Audi R18 TDI che ha vinto la 24 Ore di Le Mans 2012, sia integrato all'interno della monoscocca in fibra di carbonio, tutto ciò a vantaggio della riduzione di rischi di incendio.



Figura 5.6 – Audi A5 DTM 2012.

Invece per quanto riguarda la produzione di autovetture in grande serie con componenti in materiale composito in fibra di carbonio (CFRP), per via degli elevati costi del composito e la lavorazione non sufficientemente flessibile, dopo oltre dieci anni di intenso lavoro di ricerca e competenza nella produzione, BMW con SGL Automotive Carbon Fibres, oggi sviluppa e produce fibre di carbonio e lastre in fibra di carbonio. Uno stabilimento per la produzione di fibra di carbonio ultra moderno e alimentato con energie rinnovabili è stato costruito a Moses Lake, negli Stati Uniti, e operativo dall'inizio del 2011. Dopo un periodo di test di tre mesi, a metà luglio del

2011 è iniziata la produzione di fibre di carbonio per la lavorazione presso lo stabilimento in joint-venture della BMW di Wackersdorf (Germania), realizzando anche modelli come la BMW i3 e la i8.

## 5.2 LE FIBRE DI VETRO

Certamente quando si parla di fibre di vetro non si può fare a meno di ricordare l'uso più diffuso e praticato e cioè la vetroresina. Materiale composito formato da fibra di vetro e resina plastica, in genere a base di poliestere, vinilestere o epossidica. Le fibre si ottengono con un processo abbastanza rapido ed economico: il vetro fuso ad alta temperatura viene dapprima omogeneizzato per eliminare eventuali impurità gassose, dopodiché stirato a elevata velocità attraverso una filiera e bruscamente raffreddato per aumentarne la densità del fuso. Il vetro viene fatto passare attraverso trafilie di platino-iridio riscaldate (contengono dai 400 ai 8000 fori). Le fibre così ottenute, dette bavelle, hanno un diametro compreso tra i 5 e i 15 micron e vengono immediatamente riunite in un filato continuo. Quest'ultimo subisce poi una serie di trattamenti speciali di finitura che serviranno a proteggerlo durante la manipolazione futura e a facilitarne l'impregnazione in fase di laminazione (aggiunta del sizing come lubrificante, e capace di dare maggior adesione nell'interfaccia fibra-matrice). Era il primo materiale plastico composito, stampabile a freddo, senza pressione e che, adeguatamente rinforzato, migliorava notevolmente le caratteristiche di resistenza meccanica. Per simili motivi ha avuto molte applicazioni nell'industria automobilistica oltre che per altri settori come aeronautico, aerospaziale e per la realizzazione di serbatoi. Presenta le seguenti caratteristiche:

- Resistenza a flessione: superiore a qualsiasi altro prodotto utilizzato per la costruzione di carrozzerie in genere;
- Resistenza all'urto: grazie alla elevata flessibilità assorbe notevolmente gli urti riducendone gli effetti negativi sulla struttura e riducendo altresì i rischi per gli occupanti dell'abitacolo;
- Resistenza tecnica: una carrozzeria in vetroresina possiede un'ottima climatizzazione. In climi freddi la struttura ha una bassissima dispersione di calore interno. In climi caldi protegge dalle radiazioni solari.

Da evidenziare che a seconda della purezza si possono ottenere diversi tipi di vetro, tra quelli più usati i vetri E, S e R. Il vetro E, originariamente sviluppato come isolante per cavi elettrici, successivamente sviluppato perché facilmente formabile sotto forma di fibre, ed ora usato quasi esclusivamente la fase di rinforzo. E' il più usato, sia nell'industria tessile sia nei materiali compositi (circa il 90%, per il suo basso costo abbinata alla sua velocità di produzione e elevata resistenza seppur con modulo elastico basso). Il vetro S è l'evoluzione del vetro E in quanto presenta migliori

proprietà meccaniche sia di resistenza che di modulo. E' composto da 65% circa di  $\text{SiO}_2$ , 25% di  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e un 10% circa di  $\text{MgO}$ . Avendo caratteristiche migliori rispetto il vetro E, ha di conseguenza un costo maggiore. Il vetro R ad alto rendimento meccanico invece è un tipo di filato creato per settori d'élite come l'aerospaziale e rispetta i requisiti in materia di resistenza alla fatica, alle variazioni termiche e all'umidità. Grazie al suo alto rendimento tecnico è utilizzato nel settore dei trasporti anche in componenti sottoposti a forti sforzi, in particolare pale di elicotteri.

Fibra	Densità ( $\text{g/cm}^3$ )	Modulo a trazione (GPa)	Resistenza a trazione (MPa)	Diametro ( $\mu\text{m}$ )
E – Glass	2.54	72	2400	10 - 20
S – Glass	2.49	86	4300	10 - 20

Tabella 5.1 – Caratteristiche fibra di vetro E a confronto con la fibra di vetro S.

### 5.2.1 APPLICAZIONI

Per le spiccate proprietà meccaniche di resistenza all'urto e a flessione, oltre alla facilità di lavorazione e una bassa densità, le fibre di vetro e quindi la vetroresina venne impiegata in campo automobilistico principalmente per la realizzazione di carrozzerie, rendendo automobili molto più leggere in peso e una contemporanea migliore facilità realizzativa da parte dei costruttori. Nel 1953 venne prodotta la prima automobile con la carrozzeria e scocca interna interamente in vetroresina: la Chevrolet Corvette.



Figura 5.7 – Chevrolet Corvette Convertible (1953).

Un marchio automobilistico che nella sua storia ha prodotto celebri automobili sportive con carrozzeria in vetroresina è la inglese Lotus, dove la filosofia del suo fondatore Colin Chapman era ed è tutt'ora "meno massa a beneficio delle prestazioni". Da questo principio che nel 1957 venne prodotta la Lotus Elite Type 14 disegnata per mano dello stesso Chapman, che debuttò al Salone dell'Automobile di Londra del 1957 era una piccola coupé 2 posti caratterizzata dall'innovativa soluzione della scocca portante interamente in fibra di vetro, con inserito all'interno una struttura in acciaio. Le componenti da assemblare erano sei, la carrozzeria in vetroresina consentiva di assemblare più facilmente e più rapidamente la vettura rispetto alle lamiere in acciaio oltre che alle già citati vantaggi. L'intento era quello di produrre una vettura sportiva che fosse leggera e in effetti il peso era di soli 585 Kg. I finestrini non si potevano abbassare ma solo asportare e riporre in vani dietro ai sedili, entrare nell'abitacolo non era semplice e in alcuni casi bisognava prodursi in contorsioni fisiche. Aveva la trazione posteriore, cambio manuale a 4 marce, sospensioni a 4 ruote indipendenti e freni a disco su tutte le ruote, era spinta da un piccolo 4 cilindri in linea monoalbero in testa tutto in alluminio di 1.216 cm<sup>3</sup> da 72 cavalli: raggiungeva, una velocità di punta di 180 km/h. La produzione di questa terminò nel 1963, successivamente dal 1974 al 1982 venne prodotta una seconda serie della Elite, sempre in vetroresina la carrozzeria (Type 75).



Figura 5.8 – Lotus Elite Type 14 (1957-1963).

Anche di recente le automobili della casa anglosassone sono prodotte con carrozzeria in vetroresina, come la Lotus Elise: spyder a due posti, trazione posteriore, concepita all'inizio del 1994 e realizzata nel settembre 1996. L'auto ha una carrozzeria in vetroresina su un telaio di alluminio che offre, a beneficio delle sospensioni, una notevole rigidità torsionale. Una delle caratteristiche principali di questo telaio è l'assenza di saldature. Le varie componenti dello stesso sono unite tramite l'uso di collanti epossidici. Questa soluzione innovativa permette un migliore controllo delle tolleranze e di preservare le proprietà meccaniche del metallo in corrispondenza dei

giunti. Questo permette di ottenere, nonostante la potenza del motore relativamente contenuta, performance elevatissime con un ottimo piacere di guida. Il risultato è un'auto sportiva con un peso inferiore ai 680Kg, a tutto beneficio dell'accelerazione, della tenuta di strada e dei consumi. Nonostante il motore abbia una potenza di soli 89KW (120CV), il rapporto peso/potenza è migliore di quello di tante blasonate supersportive.



Figura 5.9 – Lotus Elise (1996).

Questi sono alcuni esempi di automobili che hanno adottato componentistica in fibra di vetro, tra queste da ricordare la Ferrari 308 GTB, anche se ora la vetroresina trova spazio nel settore camper/roulotte, in quanto per le supersportive il carbonio garantisce al meglio le richieste dei costruttori. Per contro, le fibre di vetro sono utilizzate anche per lo sviluppo di componenti come le balestre adottate per assali e sospensioni; permettono di alleggerire sensibilmente la vettura (la sospensione posteriore pesa quasi 15kg meno di una in acciaio), non sono attaccabili dalla ruggine e quindi hanno una durata cinque volte superiore, grazie all'ottima resistenza a fatica.



Figura 5.10 – Esempio sospensioni in fibra di vetro per Taxi londinesi.

# **CAPITOLO 6: LE FIBRE VEGETALI NELL'AUTOMOTIVE**

## **6.1 CARATTERISTICHE E PROPRIETA'**

Le fibre naturali vengono distinte in due tipologie principali sulla base della loro origine: vegetali ed animali. Tra le fibre animali due delle più famose sono la lana e la seta, ampiamente diffuse nel settore tessile e quindi di scarso interesse nel campo dell'automotive. Per l'applicazione nei materiali compositi le fibre vegetali sono le più interessanti e diffuse. L'utilizzo di queste fibre vegetali è spiegato dalla crescente attenzione verso l'ambiente e le nuove specifiche richieste legislative riguardo alla salvaguardia ambientale e il riciclo dei materiali, essendo essi materiali provenienti da fonti rinnovabili e facilmente recuperabili o degradabili a fine uso.

Rispetto ai rinforzi tradizionali, quali fibre di vetro e di carbonio, le fibre vegetali presentano numerosi vantaggi:

- sono meno costose (cfr. Tabella 6.1);
- sono facilmente reperibili ed abbondanti;
- causano meno problemi respiratori e dermatologici per gli addetti alla lavorazione;
- sono biodegradabili e biocompatibili, combustibili e riciclabili con varie matrici;
- il bilancio tra CO<sub>2</sub> catturata in fase di crescita ed emessa in fase di combustione è nullo;
- sono meno abrasive per le apparecchiature di lavorazione;
- hanno una densità minore (rispetto alle fibre di vetro e alle aramidiche) o uguali (rispetto al carbonio) delle fibre convenzionali;
- grazie alla loro natura cellulare e cava, incrementano l'isolamento acustico e termico dei compositi;
- possono essere utilizzati come isolanti acustici e termici;
- sono una fonte importante di reddito per i produttori agricoli.

<b>Fibre</b>	<b>Prezzo (\$/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Densità (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Prezzo (\$/Kg)</b>
<b>Lino</b>	600	1500	0.40
<b>Fibre di vetro</b>	4850	2600	1.87

Tabella 6.1 - Confronto tra il costo di alcune fibre vegetali (lino) e di alcune fibre convenzionali (vetro).

Considerando le proprietà meccaniche delle fibre convenzionali e confrontandole alle fibre vegetali si può concludere che la resistenza e il modulo a trazione delle fibre vegetali sono minori rispetto alle prime. Però la differenza tra le proprietà meccaniche viene notevolmente ridimensionata se si prendono in considerazione le proprietà relative (rapportate alla densità). Sebbene sono stati evidenziati molti vantaggi a favore dell'impiego delle fibre vegetali rispetto a quelle convenzionali, il vantaggio principale delle fibre vegetali è legato alla bassa energia richiesta per la loro coltivazione (figura 6.1).

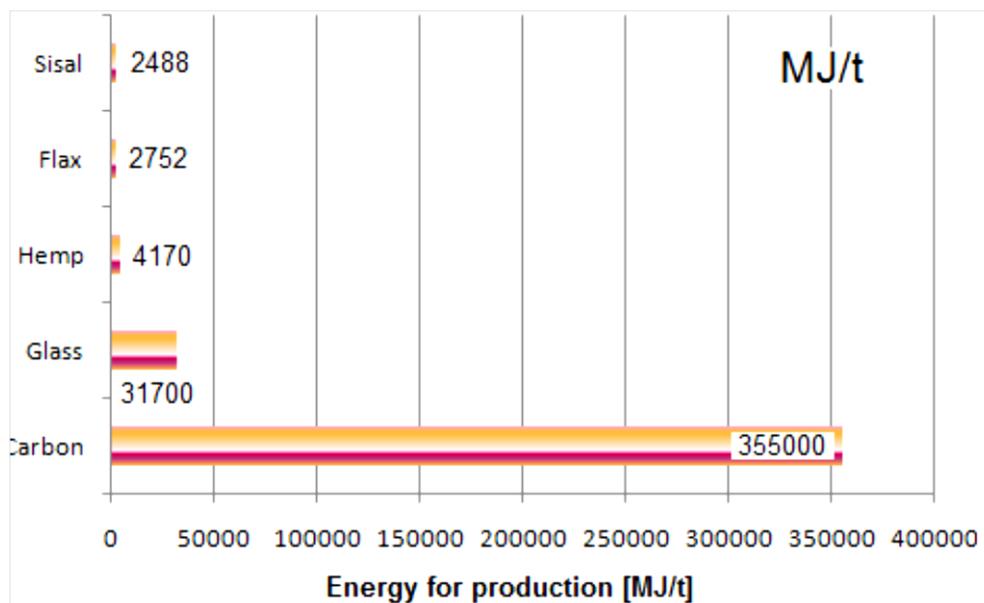


Figura 6.1 - Energia richiesta per la coltivazione di alcune fibre vegetali in confronto all'energia richiesta per ottenere alcune fibre convenzionali.

Per quanto riguardano le caratteristiche chimiche delle fibre vegetali, esse dipendono dalle condizioni di crescita, dal tipo di terreno, dal clima e dalle condizioni di invecchiamento. I componenti chimici principali delle fibre vegetali contengono cellulosa, emi-cellulosa, lignina, pectina, cere, sostanze solubili in acqua e volatili.

La cellulosa è l'elemento comune a tutte le fibre vegetali ed è un polimero lineare (non ramificato) ottenuto per policondensazione del monomero glucosio ( $C_6H_{12}O_6$ ). Polisaccaride, incolore, inodore, insapore, di struttura fibrosa, si decompone per riscaldamento intorno ai 250-300°C. La sua formula bruta è:  $(C_6H_{10}O_5)_n$ , in cui  $n$  può assumere il valore di 14000 nella cellulosa grezza, 2500 circa in seguito al processo di raffinazione. Il grado di polimerizzazione della cellulosa varia col tipo di fibra, mentre le proprietà meccaniche dipendono dal tipo di cellulosa in esse contenuto, nella fattispecie dipende dalla geometria della cellula elementare. Le catene di cellulosa sono disposte parallelamente le une alle altre, formando fasci contenenti ognuno 40 o più macromolecole cellulosiche connesse tra loro per mezzo di legami ad idrogeno e tramite legami

con lignina amorfa ed emicellulosa, detti microfibrille. Le unità ripetitive adiacenti nella stessa catena formano angoli di  $180^\circ$ . Più microfibrille si intrecciano per formare strutture simili ad una fune.

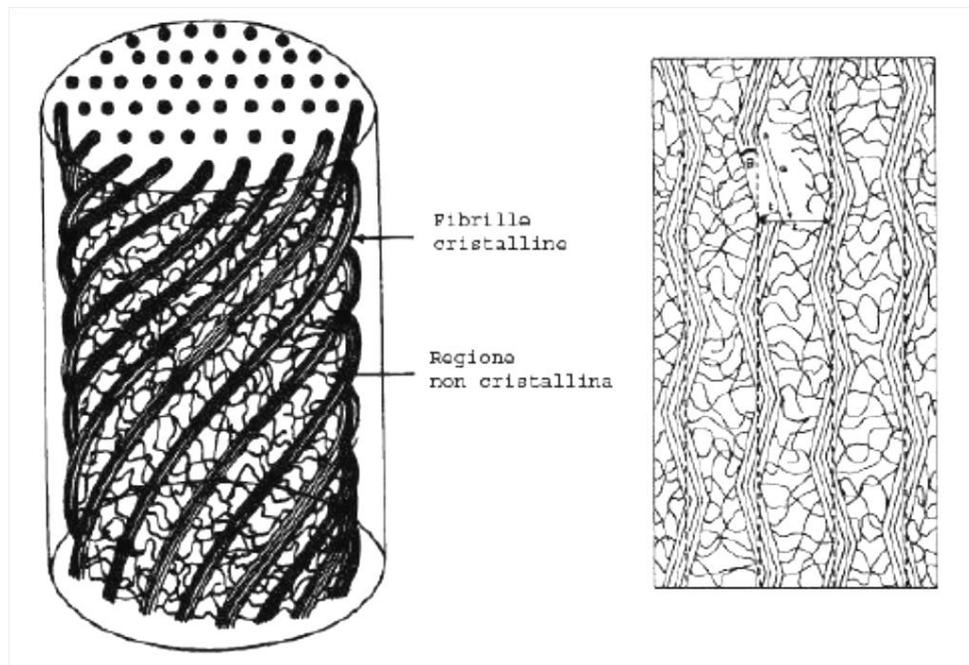


Figura 6.2 – Struttura delle microfibrille.

L'emicellulosa è costituita da un gruppo di polisaccaridi, ad esclusione della pectina, e differisce dalla cellulosa per tre aspetti fondamentali:

- contiene molti tipi di zuccheri diversi dal glucosio, a differenza della cellulosa che ne contiene solo un tipo.
- la struttura delle catene è ramificata per l'emicellulosa, lineare per l'altra.
- il grado di polimerizzazione dell'emicellulosa è dalle dieci alle cento volte inferiore a quello della cellulosa.

La lignina è un complesso polimero di idrocarburi con gruppi alifatici e aromatici i cui legami ancora oggi non sono molto noti. Con proprietà meccaniche più basse della cellulosa, la sua struttura interna varia al variare della fibra di appartenenza. È la sostanza che conferisce rigidità alla struttura.

La pectina è essenzialmente un eteropolisaccaride solubile in acqua dopo una parziale neutralizzazione con idrossido d'ammonio.

Le cere infine fanno parte della composizione delle fibre e possono essere estratte tramite soluzioni di acidi organici.

%	Juta	Lino	Canapa	Kenaf	Sisal
<b>Cellulosa</b>	61 - 71	71 - 75	70.2 - 74.4	53 - 57	67 - 78
<b>Emicellulosa</b>	13.6 - 20.4	18.6 – 20.6	17.9 – 22.4	15 - 19	10 - 14.2
<b>Lignina</b>	12 – 13	2.2	3.7 – 5.7	5.9 – 9.3	8 – 11
<b>Pectina</b>	0.2	2.2	0.9	-	10
<b>Altro</b>	-	3.8	6.1	7.9	1
<b>Cere</b>	0.5	1.7	0.8	-	2
<b>Acqua</b>	12.6	10	10.8	-	11

Tabella 6.2 – Composizione tipica di alcune specie vegetali.

Le prestazioni e proprietà dei materiali compositi sia a rinforzo naturale che sintetico dipendono non solo dai singoli componenti, ma anche dalla loro compatibilità. Il comportamento interfacciale tra fibre e matrice polimerica è stato da sempre riconosciuto come un fattore chiave che influenza le proprietà del composito. Per avere una buona adesione tra matrice e rinforzo bisogna che le fibre posseggano una sufficiente bagnabilità. In genere, per raggiungere tale scopo si ricorre a speciali trattamenti chimici e fisici. I trattamenti fisici come la calandratura, lo stiramento, il termotrattamento e la produzione di filati ibridi non modificano la composizione chimica, ma solo le proprietà superficiali e strutturali, influenzando allo stesso tempo i legami meccanici.

Come già accennato, si può fare una semplice distinzione tra le varie fibre vegetali, ovvero da quale parte viene ricavata la fibra:

- Fibre da stelo, come per la juta, lino, canapa, kenaf.
- Fibre da seme, come per il cotone e il kapok.
- Fibre da frutto, che sono le fibre prodotte da noci di varie palme (una su tutte, il cocco).

- Fibre dalle foglie, prodotte dalle foglie di ananas, di banana o da palma.

### 6.1.1 LE FIBRE DI CANAPA

La canapa è una delle più antiche piante da fibra coltivata dall'uomo. Originaria dell'Oriente, grazie al suo ciclo vegetativo breve ed alle molte varietà esistenti, la canapa è ubiquitaria, praticamente coltivata o potenzialmente coltivabile in tutto il mondo. In passato, in Italia, era coltivata dai mille metri d'altitudine in Piemonte fino alla zona mediterranea del sud dell'Italia. La coltivazione della canapa è stata gradatamente ridotta dagli anni '60, anche in seguito ad accordi internazionali. Le tipiche colture a canapa del Piemonte, della Campania, dell'Emilia o della Valnerina sono state trasformate in altre colture per uso alimentare o abbandonate.

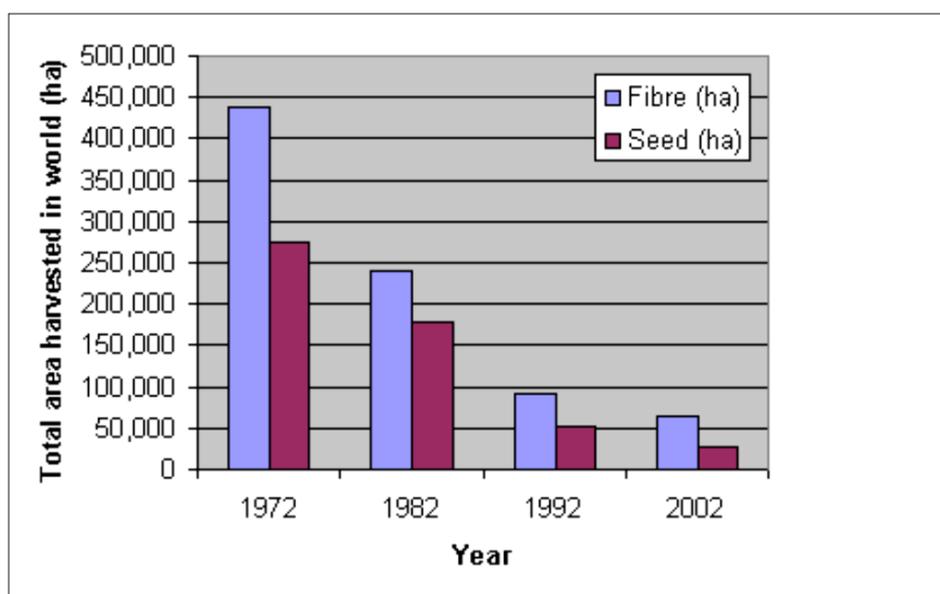


Figura 6.3 – Produzione mondiale di canapa.

La scelta della varietà è funzione del tipo di prodotto desiderato e della qualità richiesta. Attualmente, dalla canapa, si possono ricavare quattro principali prodotti semilavorati, dai quali, a loro volta, può essere derivato un gran numero di prodotti finali: fibra lunga, fibra corta, canapulo e semi. Quando il prodotto richiesto è la fibra di buona qualità (fibra lunga) occorre disporre di piante molto alte, caratteristica che appartiene alle varietà dioiche (il contenuto in fibra oscilla tra il 15-20%), mentre se si desidera produrre fibra corta o seme, le varietà da preferire sono le monoiche.



Figura 6.4 - Coltura di canapa da fibre.

La canapa appartiene alla famiglia delle Cannabinacee: questa pianta erbacea è caratterizzata da abbondante biomassa e raggiunge notevoli produzioni di sostanza secca in un ciclo colturale relativamente breve (in Europa si possono superare le 20 t di sostanza secca per ettaro).

La fibra di canapa è una delle migliori fibre vegetali conosciute: resiste al calore, alle muffe, agli insetti e non viene danneggiata dalla luce. Le fibre della canapa più interessanti dal punto di vista commerciale sono le fibre liberiane (tiglio) primarie. Le fibre si trovano lungo una circonferenza che circonda i tessuti conduttori nel fusto.



Figura 6.5 - Sezione trasversale di una cellula di canapa, con le fibre che circondano il fusto.

La fibra primaria è costituita da cellule allungate riunite in fascetti (bundles), fortemente saldati tra di loro, formati durante il periodo di intenso accrescimento in altezza della pianta. La lunghezza delle fibre primarie varia dai 5 ai 55 mm con un valore medio di 20-28 mm. Il loro diametro, molto

variabile, è in media di circa 32-34  $\mu\text{m}$ . I filamenti sono lunghi da 1 a 3 metri. Nella pianta sono presenti anche fibre secondarie, molto più corte, circa 2 mm, con un diametro di circa 17 $\mu\text{m}$ , deposte durante l'accrescimento. Oltre ad essere più corte, le fibre secondarie sono più lignificate ed hanno quindi uno scarso interesse dal punto di vista industriale.

Alcuni indici per determinare la qualità della fibra a livello della pianta sono: percentuale di taglio, rapporto tra fibre primarie e fibre secondarie, lunghezza della fibra, diametro delle fibre, grado di lignificazione, la maturità delle fibre e la metodologia di raccolta.

Rilevante fattore, la tecnologia di estrazione della fibra di canapa molto semplice (rispetto ad altri vegetali).



Figura 6.6 – Macerazione della canapa.



Figura 6.7 – Fibre di canapa.

### 6.1.2 LE FIBRE DI LINO

Il lino è la fibra tessile che si ricava dal fusto dell'omonima pianta erbacea appartenente alla famiglia delle linacee. Le fibre sono i vasi conduttori che trasportano l'acqua dalle radici alle foglie, sottili come capelli e lunghi dai 60 ai 120 cm circa, come lo stelo. Il lino è una fibra composta ricavata dal *Linum usitatissimum* (lino) composta per circa il 70% da cellulosa. Come tutte le fibre liberiane, il lino ha una lunghezza media delle fibre elementari che varia dai 20 ai 30 mm; la sua finezza si aggira dai 20 ai 30 micron e presenta una sezione poligonale. Il numero di fibre presenti nella corteccia di una singola pianta può variare da 20 a 50. Originaria dell'Asia Minore, sin

dall'epoca dei Babilonesi e gli Egiziani, che usavano corde di lino per innalzare i blocchi di pietra per le loro costruzioni e di lino erano anche le bende in cui erano avvolte le mummie dei Faraoni. Il lino si coltiva oggi in regioni a clima temperato umido, soprattutto in Europa (Francia, Olanda e Romania) e nelle repubbliche europee dell'ex Unione sovietica. Il lino è una pianta annuale, con un ciclo vegetativo di circa quattro mesi. Le piante sono seminate molto fitte, così durante la successiva crescita non avranno possibilità di prendere vigore e resteranno quindi esili. In questo modo anche i vasi conduttori resteranno sottili e le fibre saranno fini e morbide. Dopo circa tre mesi le piante hanno già un stelo alto circa 1 metro, con foglie sparse e strette. Il fiore può essere bianco o azzurro, a seconda della qualità. Alla fine del quarto mese gli steli verranno raccolti con una macchina che li sradica da terra senza tagliarli. Così facendo la fibra non viene accorciata e conserva la lunghezza della pianta. Inoltre la pianta viene raccolta prima della maturazione dei semi, per evitare la lignificazione, ossia un irrigidimento delle cellule che si impregnano di lignina, che danneggerebbe la finezza della fibra stessa.



Figura 6.8 – Piante di lino; Steli e fibre grezzo di lino.

Dopo il raccolto, le piante vengono raccolte in fasci e le cime vengono battute per recuperare il seme. Le fibre del lino sono contenute nella parte interna della corteccia, chiamata comunemente tiglio. Per ricavarla occorre quindi separare le fibre della pianta, saldate tra loro dalla pectina, che costituisce quindi un collante naturale. Ciò si ottiene con la macerazione dei fusti in acqua stagnante o, più modernamente e rapidamente, in cisterne piene d'acqua riscaldata a circa 30° per 4-14 giorni, allo scopo di sciogliere la pectina, per separare, grazie all'azione dei batteri, la fibra dalla foglia. Dopo l'essiccazione al sole dei fasci macerati, altri trattamenti meccanici (stigliatura) separano la parte fibrosa dalla parte legnosa e da altre impurità : con la maciullatura, il materiale viene fatto passare tra due serie di rulli, per separare le sostanze legnose ed estranee dalla fibra vera e propria, chiamata filaccia. Successivamente le fibre sono sottoposte alla pettinatura che permette la separazione delle fibre troppo corte e spezzate (stoppe) dalle fibre

lunghe che quindi vengono disposte parallelamente tra loro per poi comporre in matasse ed avviarle alle successive operazioni di filatura e tessitura. Il lino più pregiato è quello raccolto non ancora maturo. Il colore dipende in parte dal tipo di macerazione subito dagli steli e varia dal bianco al giallognolo al grigio; il più pregiato è un bianco-argenteo lucente, serico. Le stoppe, fibre corte e spezzate, costituiscono un sottoprodotto della lavorazione del lino e sono utilizzate come materia prima nell'industria cartaria e nella preparazione di cordami. Dai semi del lino si ottiene l'olio, utilizzato nell'industria delle vernici e del linoleum ed in farmacia come emolliente e lassativo.

Le fibre del lino, ricavate dal fusto, sono lunghe 50-60 cm: ciò conferisce loro resistenza meccanica superiore a quella del cotone e migliore attitudine ad essere filate. Poiché le fibre contengono, oltre alla cellulosa, grassi e cere, il lino possiede una brillantezza e un aspetto sericeo molto apprezzati in campo tessile. La presenza dei grassi e delle cere, invece, è non gradita nel campo dei materiali compositi. L'elevata conducibilità termica e la conseguente sensazione di freschezza che trasmette quando viene indossato è una ulteriore proprietà che fa del lino una fibra tessile pregiata e dal costo piuttosto elevato. Sebbene ancora oggi gli impieghi della fibra di lino sono quasi esclusivamente tessili, in particolare la fibra è ricercata nella produzione di capi d'abbigliamento per la stagione estiva, risultano numerose ricerche sul suo impiego anche nel settore della produzione dei materiali compositi a matrice polimerica. Le fibre di lino provengono dai vasi liberiano delle piante, ossia dal tessuto vascolare che si trova a ridosso della corteccia. Le cellule base sono delle fibre elementari aventi lunghezza media di 2-5 cm e un diametro compreso tra 7 e 30 micron. Le cellule sono costituite da pareti spesse e lignificate che racchiudono un piccolo canale centrale vuoto, ossia il lumen. Le pareti delle fibre sono stratificate e attraversate da fini canicoli, in parte ramificati, in cui la parete cellulare è più sottile: tali formazioni consentono gli apporti nutrizionali quando le cellule sono in vita.

La parete cellulare può essere suddivisa in strati concentrici in cui si distinguono:

- una cuticola esterna, costituita da cere pectine e proteine;
- una parete cellulare primaria(0,2 micron);
- tre pareti secondarie che racchiudono il lumen (5-15 micron), successione di strati a diversa composizione in cui le fibrille di cellulosa, altamente cristalline e a diversa orientazione, sono incapsulate in una matrice amorfa di emicellulosa e lignina;

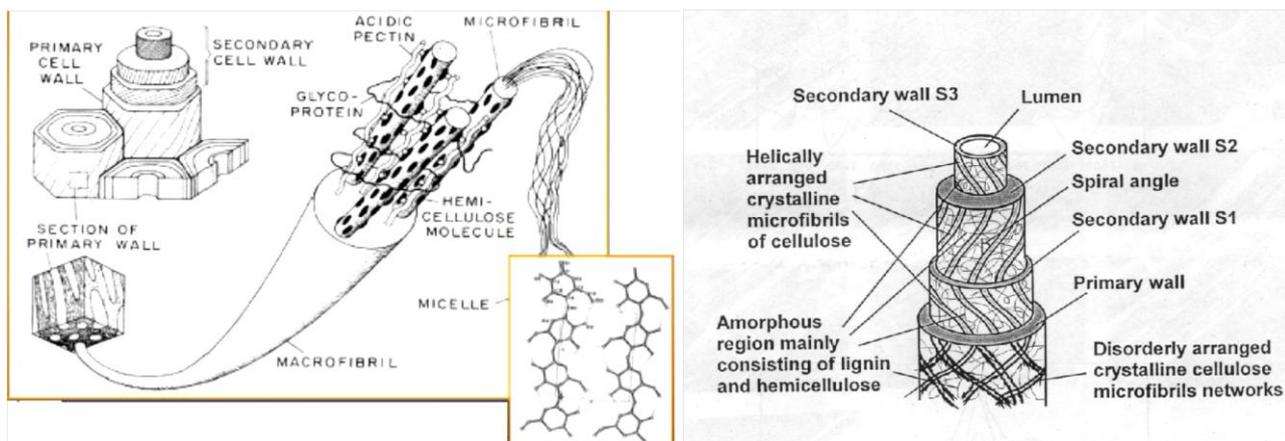


Figura 6.9 – Struttura di una fibra di lino.



Figura 6.10 – Spaghi di lino.

### 6.1.3 LE FIBRE DI JUTA

La juta è la fibra tessile naturale ricavata dalle piante del genere *Corchorus* della famiglia delle Malvaceae. Come nel lino e nella canapa, la materia tessile per la produzione si ricava dal fusto della pianta. La produzione di juta presenta, rispetto alla media delle altre fibre una maggiore variabilità dei volumi di produzione. In questo decennio è oscillata ampiamente tra i 2.3 e i 3 milioni di tonnellate. Misurata in quantità la juta è la seconda fibra naturale dopo il cotone. La produzione di juta è concentrata per circa l'85% nel delta del fiume Gange, in quanto è la migliore area produttiva, con l'India produce il 60% dell'offerta mondiale di Juta seguita dal Bangladesh. Altri Paesi asiatici come Cina, Thailandia, Pakistan, Myanmar e il Nepal, sono anch'essi produttori ma di quantità decisamente inferiori come nella zona amazzonica del nord del Brasile. Nel 1930 la

pianta è stata introdotta in Brasile dal Sig. Ryota Oyama essendo inizialmente coltivata da immigrati giapponesi per la produzione di beni artigianali ma che in seguito divenne la fonte di reddito più importante per le comunità locali. Dalla coltivazione della pianta alla raffinazione in fibra, e quindi tutte le operazioni relative alla produzione di juta, sono completamente basate sul lavoro manuale di diversi agricoltori della comunità lungo il Rio delle Amazzoni. Pertanto le varie fasi come la coltivazione, raccolta, mercerizzazione, essiccazione e la raffinazione delle fibre sono svolte a impatto zero verso l'ambiente. Inoltre i campi di juta non necessitano di irrigazione qualora la precipitazione annuale supera i 2200 mm. Dopo la raccolta i gambi devono essere sgusciati per estrarre le fibre: questo viene fatto per macerazione nel fiume per circa 8-10 giorni a causa del clima caldo della regione, che promuove una facile fermentazione dei gambi, quindi, l'estrazione delle fibre. L'estrazione naturale per macerazione permette infatti la rimozione della pectina dalle fibre. Dopodiché, le fibre vengono essiccate sotto tettoie al sole senza sostanze chimiche. La fibra grezza ottenuta viene poi cardata in tessuti di juta (bi assiale o multi assiale).



Figura 6.11 – Fasi della produzione della juta.

La juta è altamente igroscopica, di colore bianco, giallognolo o bruno. Le fibre sono ruvide e tenaci e il filato risulta essere anch'esso rigido e molto resistente. Il risultato è di una fibra naturale con riflessi lucenti e dorati (motivo per cui è chiamata anche la fibra d'oro), 100% biodegradabile e riciclabile ed è la più economica fibra vegetale, procurata dalle fibre di tiglio e dalla scorza del fusto delle piante.



Figura 6.12 – Tessuti in juta.

Una fibra molto simile alla Juta e che è utilizzata per la stessa tipologia di consumo è il Kenaf con una produzione mondiale di circa 500mila tonnellate distribuite tra diversi Paesi, quasi tutti in Asia. Altre fibre dure come il sisal sono prodotte per circa 300mila tonnellate, in particolare in Africa Kenya, Tanzania, Madagascar e in America latina.

Fiber	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Elastic Modulus (GPa)	Specific Elastic modulus (E/ρ)	Tensile Strength (GPa)	Specific Tensile Strength (σ/ρ)	Elongation at break (%)
E – Glass	2.6	73	28.07	1.8 – 2.7	0.69 – 1.04	2.5
Carbon (PAN)	1.8	260	144.44	3.5 – 5.0	1.94 – 2.78	1.4 – 1.8
Aramid	1.45	130	89.66	2.7 – 4.5	1.86 – 3.10	3.3 – 3.7
Jute	1.45	10 – 32	6.89 – 22.07	0.45 – 0.55	0.31 – 0.38	1.1 – 1.5
Sisal	1.45	26 – 32	17.93 – 22.07	0.58 – 0.61	0.40 – 0.42	3 - 7
Coir	1.33	4 – 6	3.01 – 4.511	0.14 – 0.15	0.11	15 - 40

Tabella 6.3 – Proprietà meccaniche di varie tipologie di fibre.

### 5.3.4 LE FIBRE DI COCCO

La fibra di cocco è prodotta in quantità molto piccole e difficilmente quantificabili, in molti Paesi, soprattutto in Asia. Utilizzando le informazioni sulle esportazioni di fibra è possibile stimare che il gruppo dei maggiori esportatori (India, Sri Lanka, Thailand, Malaysia, Indonesia) produca circa 450mila tonnellate annue di fibra di cocco.

Le fibre estratte dalla noce di cocco presentano una serie di vantaggi: sono molto vicine al legno come composizione, non richiedono macerazione per l'estrazione, sono inserite in una filiera industriale che dà anche altri prodotti ed inoltre sono state utilizzate tradizionalmente per millenni in alcuni paesi (es. Sri Lanka, Kerala nell'India meridionale)



Figura 6.13 – Fasi di separazione, estrazione, tessitura delle fibre di cocco.

## 6.2 APPLICAZIONI

L'applicazione di materiali vegetali nell'industria automobilistica risale già dagli anni '30 con Henry Ford, sperimentò l'uso di cantalupi, carote, mais, cavoli e cipolle come base per la realizzazione di macchine con corpo organico. Il modello T della Ford, realizzato tra il 1908 e il 1927, aveva alcune parti realizzate con matrici derivate dalla soia, dimostrando la resistenza di questo materiale colpendo con una mazza il prototipo (1941). Henry Ford dichiarava che l'innovativo composito aveva una resistenza all'impatto 10 volte superiore al metallo.



Figura 6.14 – Celebre immagine che ritrae Henry Ford colpire con una mazza la carrozzeria di un suo modello.

L'interesse verso i materiali naturali diminuì con l'affermarsi di materiali più durevoli, come i metalli, e sino agli anni '40 le fibre naturali non tornarono in auge. Nel 1950 il corpo della Trabant, la nota vettura della Germania dell'Est di quell'epoca, fu paradossalmente uno dei primi veicoli a essere costruito in fibra naturale: venivano utilizzati gli scarti dell'industria tessile (cotone), impregnandolo con resina fenolica, ottenendo un composito con fibre naturali molto economico.



Figura 6.15 - La Trabant.

Negli anni '90, la Daimler Chrysler iniziò a utilizzare fibre di lino e agave per i rivestimenti interni dei suoi veicoli. L'interesse per questi materiali continuò sino alla realizzazione dei pannelli degli sportelli della Mercedes Classe E (1996), con 17 componenti installati nella vettura, contenenti

fibre di lino, cotone, sisal e noce di cocco: dallo sportello posteriore (cotone) alle finiture interne della portiera (lino e sisal) ai sedili.



Figura 6.16 – Mercedes-Benz Classe E (1996).

Nel 2000 la direttiva Europea 2000/53/EC ha promosso l'uso di prodotti compatibili con l'ambiente e che riducano il conferimento in discarica. La direttiva stabiliva che la frazione conferita per veicolo fosse pari al 15% nel 2005 e si riducesse, gradualmente, al 5% nel 2015. Questa direttiva e altre simili pubblicate in USA, hanno spinto diverse case automobilistiche a proseguire e sviluppare l'utilizzo di materiali compositi con fibre naturali. Oggi esistono svariati modelli di automobili che utilizzano diversi componenti basati su fibre naturali; essi si possono trovare in un'automobile:

- negli interni, in particolare nella tappezzeria. In questo caso non si è in presenza di veri e propri materiali compositi, e il loro uso non è particolarmente spinto. Tuttavia, si riutilizzano anche veri e propri compositi con fibre vegetali che sono giunti a fine vita con questo scopo;
- nei pannelli interni, ad esempio delle portiere, più leggeri, insonorizzati e dotati di una resistenza all'urto superiore rispetto ad alcuni materiali tradizionali. Oltre ai vantaggi di minor costo e di smaltimento, tali pannelli in fibre vegetali presenterebbero un ulteriore vantaggio in termini di sicurezza in quanto, a differenza dei materiali in fibra di vetro, in caso di rottura a seguito di un forte urto non si frantumano e non formano schegge taglienti. Questi compositi hanno rinforzi di fibre di lino e sisal, e matrici che possono essere epossidiche o poliuretatiche. In particolare, il poliuretano, gioca un ruolo fondamentale nello sviluppo dei compositi con fibre vegetali;
- nei paraurti;

I produttori Tedeschi Mercedes, BMW, Audi e Volkswagen sono i più attivi nel definire e qualificare materiali a base di fibre naturali rispetto a produttori di massa. Tuttavia, poiché i fornitori di componenti di questi produttori sono gli stessi dei produttori di massa si è verificato e continua a verificarsi un trasferimento di competenze tra queste aziende. Oggigiorno, tutti i modelli BMW e Mercedes usano fibre naturali per alcuni componenti quali: fodere, rivestimenti e cappeliere. Altre case automobilistiche come Ford, Opel, Renault, Peugeot, Citroen e FIAT lavorano meno alla definizione dei materiali ma li utilizzano ugualmente.

Automotive manufacturer	Model and application
Audi	A2,A3,A4, A4 Avant, A6, A8, Roadstar, Coupe: Seat back, side and back door panel, boot lining, hat rack, space tire lining
BMW	3,5 and 7 series and others: door panels, headliner panel, boot lining, Seat back
Daimler/Chrysler	A, C, E, S class: Door panels, windshield/dashboard, business table, pillar cover panel; A class, Travego bus: exterior under body protection trim; M class: instrumental panel (Now in S class: 27 parts manufactured from bio fibres, weight 43kg)
Fiat	Punto, Brava, Marea, Alfa Romeo 146, 156
Ford	Mondeo CD 162, Focus: Door panels, B-pillar, boot liner
Opel	Astra, Vectra, Zafira: Headliner panel, door panels, pillar cover panel, instrumental panel
Peugeot	New model 406
Renault	Clio
Rover	Rover 2000 and others: Insulation, rear storage shelf/panel
Saab	Door panels
SEAT	Door panels, seat back
Volkswagen	Golf A4, Passat Variant, Bora: Door panel, seat back, boot lid finish panel, boot liner
Volvo	C70, V70
Mitsubishi	Space star: Door panels; colt: Instrumental panels

Figura 6.17 – Modelli automobili con elementi realizzati in fibra naturale.

Johnson Controls, uno dei principali fornitori di pannelli di sportelli di FIAT e tra i maggiori fornitori mondiali, presenta una vasta gamma di materiali compositi a base di fibre naturali sviluppati internamente. Un esempio è il Fibrowood, composito con matrice acrilica e fibre derivate dal legno che può essere trasformato per stampaggio a compressione in stampi ad alta temperatura. Il contenuto di fibra nel Fibrowood è del 70%. E' utilizzato per la copertura di sportelli, coperture per pannelli di strumentazione e come coperture per sedili. Fibrowood è in produzione dal 1998 ed è utilizzato da Ford, Kia, Mercedes-Benz, Opel e Hyundai.

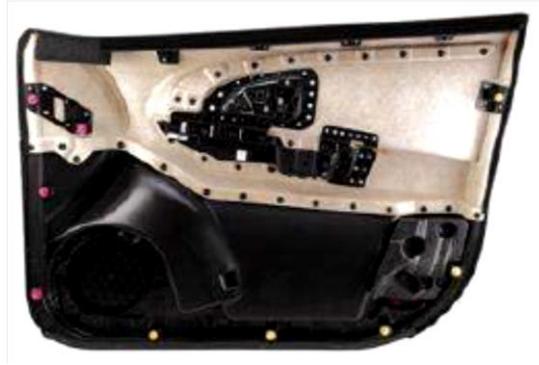


Figura 6.18 - Pannello per sportello in Fibrowood.

Fibrit è un altro prodotto composito con fibre naturale, realizzato con processi simili alla produzione della carta. Il contenuto di fibra è pari al 94%: questo alto contenuto assicura al prodotto stabilità di prezzo rispetto alle variazioni delle risorse da combustibile fossile, in quanto è basato su fibre derivate dal legno e un legante acrilico. Fibrit è in produzione dal 1954 ed è utilizzato da Opel. La figura seguente mostra un pannello per sportello realizzato in Fibrit.



Figura 6.19 – Pannello per sportello realizzato in Fibrit.

Johnson Controls produce anche compositi con fibra naturale (lino o canapa) impregnati con resina epossidica. Questi pre-impregnati sono lavorati per stampaggio in presse ad alta temperatura. Il contenuto di fibra naturale è del 70%. Il composito è in produzione dal 2003 ed è utilizzato da BMW.



Figura 6.20 - Pannello realizzato con fibre naturali e resina epossidica.

Johnson Controls inoltre ha fatto passi avanti considerevoli introducendo anche cicli virtuosi di utilizzo del materiale in produzione. Ad esempio, gli scarti del processo di punzonatura dei materiali naturali, quali il Fibrowood, vengono lavorati e legati con PP per produrre dei granuli di Polipropilene rinforzato. I granuli prodotti sono lavorati per stampaggio ad iniezione per produrre fermi, ganci e braccioli. Questo materiale è in produzione dal 2006.



Figura 6.21 - Prodotto realizzato con fibre naturali riciclate e PP.

Fornitori come Johnson Control focalizzano la loro attenzione anche su prodotti interamente realizzati con materiali naturali. Ad esempio, Fasertec è una linea di prodotto basata su fibre da noce di cocco e latex naturali. Le proprietà del Fasertec permettono ottime performance per sedili e poggiatesta. Questo prodotto composito è al 100% naturale ed è in commercio dal 2002, utilizzato da Maybach, Mercedes-Benz e Volkswagen.



Figura 6.22 – Componente in Fasertec.

WOOD-STOCK è un altro prodotto diffuso nel mercato automobilistico. Questo prodotto è un foglio estruso in termoplastico costituito da una matrice poliolefinica e fibra naturale. Nella fase di trasformazione il materiale è preriscaldato in un forno a infrarossi e poi stampato in uno stampo a bassa temperatura. Questo prodotto è sul mercato dal 1982 ed è utilizzato dai marchi italiani FIAT, Lancia e Alfa Romeo.



Figura 6.23 – Pannello per sportello realizzato in Wood-Stock.

Un altro prodotto disponibile per i produttori di automobile è il pre-impregnato Acrodur della Basf, basato su un copolimero acrilico che permette di ottenere contenuti di fibra dal 70 al 90%. La chiave del prodotto è la realizzazione di un preimpregnato con struttura porosa che ha permesso al produttore Dräxlmaier Group di eliminare le fasi di punzonatura laser necessari con i termoplastici convenzionali necessari per l'applicazione del vuoto durante la laminazione. Con questa tecnica vengono realizzati gli sportelli della BMW serie 7.



Figura 6.24 – Pannello per sportello della BMW serie 7, in Acrodur.

Faurecia, un altro fornitore mondiale, ha sviluppato una linea denominata Lignoflex, che utilizza il 70% di fibra derivata dal legno un 20% di PET e un 10% di legante basato su resina

fenolformaldeide. Questo prodotto presenta pesi e costi ridotti rispetto ai compositi termoplastici rinforzati in vetro e migliori caratteristiche di assorbimento acustico. I pannelli sono più leggeri di quelli convenzionali in composito termoplastico e con aspetto simile alla radica.

Anche il produttore Giapponese Toyota ha continuato ad investire nelle bioplastiche lanciando nel 2010 sulla Lexus HS250h dei componenti in tessuto-non tessuto forniti da Toyota Boshoku e Toray Industries.

L'utilizzo di materiali compositi a base di fibre naturali pertanto è una realtà consolidata nel settore automobilistico. Questo trend è confermato da progetti come l'uso di tali compositi per macchine ad alte prestazioni come la Lotus Eco Elise: dalla carrozzeria, i cui pannelli e gli spoiler sono in fibra di canapa e verniciati ad acqua; e sempre la canapa è stata impiegata per la struttura dei sedili rivestiti poi di lana grezza. Queste modifiche orientate a migliorare l'impatto ambientale dell'Elise, ne hanno ridotto anche il peso di ben 32 kg (rispetto agli 828 kg della Lotus Elise), il che significa, prestazioni sportive ancora superiori.



Figura 6.25 – Lotus Eco Elise.

Per quanto riguarda gli sviluppi futuri, essi saranno indirizzati all'ottimizzazione delle prestazioni meccaniche dei compositi a fibra naturale. Molte ricerche sono focalizzate sullo sviluppo di tessuti ottimizzati come, ad esempio, i tessuti basati su fili ritorti. Questi tessuti innovativi (Biotex e Envirotexile) mirano a superare le limitazioni dei materiali compositi con fibre naturali standard attraverso la tessitura di fili continui ben orientati. I miglioramenti in prestazioni meccaniche sono evidenti. Ulteriori miglioramenti sono attesi dagli studi sulla interfaccia tra fibra e matrice e dalla standardizzazione della qualità delle fibre.

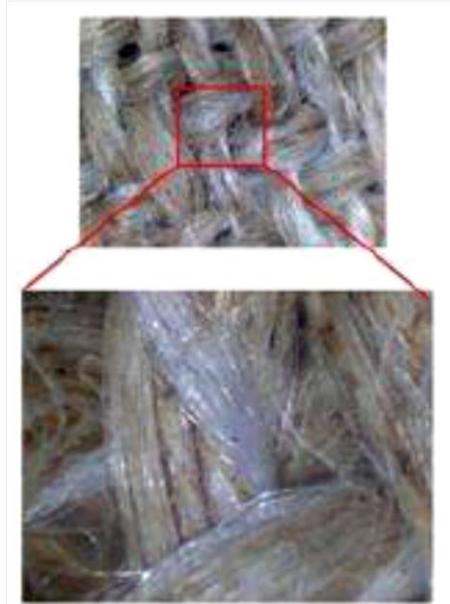


Figura 6.26 – Tessuti Biotex.

### 6.3 I BIO-COMPOSITI

Come già detto nel paragrafo precedente, l'impiego delle fibre naturali è diventato relativamente comune nelle automobili europee grazie alle buone proprietà e in particolare alla possibilità di ottenere veicoli più leggeri (che si traduce in una riduzione del consumo di carburante). Però è solo a partire dal 1994 con la Mercedes Classe E, i cui interni sono rinforzati con fibre di juta, gli autoveicoli di numerose case automobilistiche sono stati costruiti con interni rinforzati con fibre naturali. Anche dal punto di vista normativo si ha avuto un impulso a tale diffusione, infatti, a partire dal 2005 la Comunità Europea ha imposto la produzione di autovetture riciclabili almeno per l'85% di cui l'80% recuperabili sotto forma di materiali da riciclo e il resto sotto forma di recupero energetico.

L'ostacolo principale alla riciclabilità delle automobili è rappresentato soprattutto dai pannelli di rivestimento interni, fabbricati per lo più con materiali polimerici e fibre di vetro che non sono degradabili né combustibili, quindi, non si può attuare alcun recupero energetico.

La tendenza attuale dell'industria automobilistica è perciò quella di utilizzare compositi preparati attraverso stampaggio a compressione di poliolefine (PP e PE) con fibre naturali medio-lunghe (80-90 mm) in forma di feltri o di tessuto non tessuto, come componenti per gli interni: pannelli di porte anteriori (che contengono in media 1.2-1.8 Kg di fibre naturali), di porte posteriori (0.8-1.5 Kg), di portabagagli (1.5-2.5 Kg), cappelliere (oltre 2 Kg).

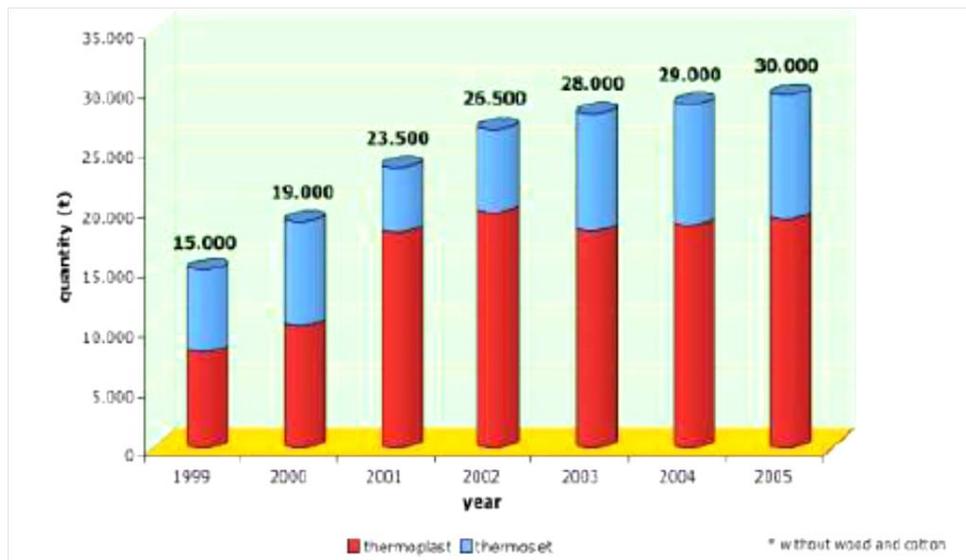


Figura 6.27 - Utilizzo delle fibre naturali nel settore auto motive in Germania.

La scelta di un certo tipo di fibra vegetale da utilizzare come rinforzo, dipende dal prezzo e dalla possibilità di coltivare la pianta da cui si ricava la fibra nel paese produttore dell'automobile. Per esempio diverse parti dei veicoli commerciali della Mercedes prodotti in Brasile utilizzano fibre di cocco, sisal e lino, mentre in Italia nel 1999 la Fiat è stata coinvolta in un progetto che sperimentava l'introduzione di fibre di ginestra in matrici termoplastiche.

Le matrici utilizzate per i compositi in ambito automobilistico sono varie: il polipropilene (PP) è largamente utilizzato per applicazioni ad alto volume nelle quali la velocità di produzione è un requisito; i poliesteri termoplastici sono preferiti al PP se è richiesta resistenza a temperature superiori; i poliesteri insaturi sono utilizzati per applicazioni a piccolo e medio volume; i poliuretani per applicazioni a medio-alto volume; le resine epossidiche in quelle applicazioni che necessitano di elevate prestazioni meccaniche. Tutte queste matrici sono utilizzate con fibre di vetro e possono essere applicate alle fibre vegetali.

Borealis, Sabic, Dow e Lyondell Basell sono tra i produttori leader nella vendita di PP per il settore automobilistico. Bayer ha lanciato sul mercato un preimpregnato innovativo denominato Baypreg<sup>®</sup>F che è caratterizzato da una matrice poliuretana. Baypreg<sup>®</sup>F è progettato per la produzione di interni automobilistici tramite stampaggio a compressione. Rivestimenti interni a parete sottile e fodere leggere possono essere prodotte con questo prodotto con un processo a minor impatto ambientale essendo il rinforzo in fibre vegetali. Altri prodotti simili ma con matrice a base di PP sono venduti da FlexForm Technologies.

Recentemente, l'aumento di pressione sulle questioni ambientali ha spinto molti produttori di resine a sviluppare e lanciare sistemi che contengono determinati quantitativi di monomero da fonte rinnovabile. Per esempio, Reichold propone un sistema denominato ENVIROLITE<sup>®</sup> 31325-00.

Questa resina è un sistema mediamente reattivo con bassa viscosità basata sulla chimica poliesteri insatura. Nello specifico, questo prodotto è basato su olio di soia e ha un contenuto di monomero "verde" di circa il 25%.

DSM ha introdotto due resine bio per l'industria automobilistica: una resina termoindurente per produrre pannelli per il corpo macchina e, un termoplastico adatto all'utilizzo nel vano motore. La resina termoindurente, Palapreg<sup>®</sup> ECO P55-01, è progettata per essere usata nei processi SMC e BMC in applicazioni che vanno dai pannelli non a vista a pannelli esterni in classe A. Questo sistema contiene un 55% di monomeri da fonte rinnovabile. La seconda resina bio, denominata EcoPaXX<sup>™</sup>, è basata su una poliammide (PA410) ad alte prestazioni, basso assorbimento di umidità e eccellente resistenza a sostanze chimiche. Circa il 70% dei materiali è derivato da olio di ricino. Le applicazioni in campo automobilistico includono componenti nel vano motore in cui la resistenza chimica e idrolitica è essenziale. Altre resine commercializzate come bio sono il sistema Envirex della Ashland e la Super Sap della Entropy Resins. Componenti sotto il cofano, strutturali e pannellature possono essere prodotti con le resine della Entropy Resins. L'impatto ambientale delle resine della Entropy è ridotto utilizzando olio di pino ottenuto come sottoprodotto della lavorazione della polpa di legno e oli vegetali ottenuti dagli scarti della lavorazione dei biocombustibili.

Come sostituti naturali alle matrici termoplastiche derivate dal petrolio la scelta è, per lo più, tra il PLA e le matrici derivate dalla cellulosa. Diversi produttori offrono questi sistemi ma, al momento, il loro uso è limitato dai costi più alti rispetto alle matrici tradizionali.

## **BIBLIOGRAFIA**

- Enrico Bernardo (2009), slide del corso "Scienza e Tecnologia dei Materiali" – Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica e Meccatronica, Università degli studi di Padova.
- Franco Bonollo (2012), slide del corso "Prodotti metallici multi-funzionali e innovativi" – Corso di Laurea in Ingegneria dell'Innovazione e del Prodotto, Università degli studi di Padova.
- Amedeo Maddalena (2013), "Appunti Materiali compositi" del corso di Tecnologia dei Materiali – Corso di Laurea in Ingegneria dell'Innovazione e del Prodotto, Università degli studi di Padova.
- Federico Coin (2010), "Applicazioni di materiali compositi a matrice metallica nel campo automotive".
- Gianluca Cicala, Giuseppe Recca, Alberta Latteri, Giuseppe Cristaldi, "Panoramica sull'impiego industriale delle fibre eco-compatibili" – [www.portalecompositi.it/Articoli/Fibre-naturali-per-il-settore-automobilistico/4-13-1.html](http://www.portalecompositi.it/Articoli/Fibre-naturali-per-il-settore-automobilistico/4-13-1.html).
- C. Alves, P.M.C. Ferrão, A.J. Silva, L.G. Reis, M. Freitas, L.B. Rodrigues, D.E. Alves, (2009), "Ecodesign of automotive components making use of natural jute fiber composites" – [www.elsevier.com/locate/jclepro](http://www.elsevier.com/locate/jclepro).
- P. Malnati (2010), "Composites Technology" – [www.compositesworld.com/articles/interior-innovation-the-value-proposition](http://www.compositesworld.com/articles/interior-innovation-the-value-proposition).
- Antonio Liciulli, "Le fibre di vetro nel campo dell'automotive".
- Andrea Pipino, "Utilizzo della fibra nel campo dell'automotive".
- Theplac (2011), "International Workshop on Thermoplastic Composite Materials".
- Paolo Vannucci (2008), "Materiali compositi" – Cap.1.

- Carlo Gorla (2011), "Polimeri per l'automobile".
- Federico Grasso e Carmelo Calabretta, "I materiali compositi nei mezzi di trasporto".
- Giuseppe Cristaldi (2011), "Sviluppo di materiali compositi rinforzati con fibre naturali per l'ingegneria civile" – Dipartimento di Ingegneria Industriale e Meccanica, Università degli Studi di Catania.
- Carlo Santulli, "Utilizzo delle fibre naturali per la produzione di materiali sostenibili".
- Sergio Oltolini (2006), "Un polimero per le automobili".
- "Lamborghini Sesto Elemento: quando la fibra di carbonio fa miracoli" - [www.omniauto.it/magazine/13612/lamborghini-sesto-elemento](http://www.omniauto.it/magazine/13612/lamborghini-sesto-elemento).