

**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**

FACOLTÀ DI INGEGNERIA  
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA

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

CLASSE 10 INGEGNERIA INDUSTRIALE  
(EX DM 270)

**STUDIO DEI MATERIALI  
PER RACCHETTE DA TENNIS**

*Relatore: ING. ENRICO BERNARDO*

*Laureando: FEDERICO RIZZETTO  
Matricola: 593098 - IMM*

ANNO ACCADEMICO 2010 – 2011



# INDICE

<b>Introduzione</b>	<b>1</b>
<b>1. La racchetta da tennis</b>	<b>3</b>
1.1. Cenni storici	3
1.2. Origine ed Evoluzione	3
1.3. Caratteristiche di una racchetta da tennis	4
1.4. Schema strutturale e aspetti progettuali	7
<b>2. Il telaio</b>	<b>9</b>
2.1. Dimensioni del telaio	9
2.2. Materiali	10
2.2.1. Legno	10
2.2.2. Alluminio	11
2.2.3. Materiali compositi	14
<b>3. Materiali compositi</b>	<b>17</b>
3.1. Generalità sui materiali compositi	17
3.2. Materiali compositi fibro-rinforzati	18
3.3. Ripartizione del carico	20
3.3.1. Fibre lunghe	20
3.3.2. Fibre corte	20
3.4. Tipi di fibre disponibili in commercio	22
3.5. Resistenza meccanica del composito	23
3.5.1. Fibre più deformabili: $\epsilon_{R m} < \epsilon_{R F}$	23
3.5.2. Matrice più deformabile $\epsilon_{R m} > \epsilon_{R F}$	24
<b>4. Composti a matrice polimerica: PMC</b>	<b>27</b>
4.1. Generalità delle matrici polimeriche	27
4.1.1. Matrici polimeriche termoindurenti	29
4.1.2. Matrici polimeriche termoplastiche	31
4.2. Processi di lavorazione dei compositi a matrice polimerica	32
4.2.1. I principali processi produttivi dei compositi fibro-rinforzati	35
4.3. Processo produttivo di un telaio in materiale composito	39

<b>5. Fibre di rinforzo utilizzate nelle racchette da tennis</b>	<b>43</b>
5.1. Multifilamenti	43
5.1.1. Fibra di vetro	43
5.1.2. Fibra di carbonio	45
5.1.3. Nanotubi in carbonio	49
5.1.3.1. Nanotubi a parete singola - SWNT	50
5.1.3.2. Nanotubi a parete multipla - MWNT	51
5.1.3.3. Resistenza meccanica	51
5.1.3.4. Metodi di sintesi	53
5.1.3.5. Problemi di fabbricazione dei compositi con CNT e compositi ibridi (CNT+CF)	55
5.1.3.6. Lunghezza dei CNT	55
5.1.3.7. Costo dei CNT	56
5.1.4. Fibre Aramidiche (Kevlar)	57
5.1.5. Fibre di titanio	58
5.2. Monofilamenti	60
5.2.1. Altri rinforzi usati nella produzione di racchette da tennis: fibre di boro, fibre di SiC, fibre di Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> e filamenti di tungsteno	60
<b>6. Selezione dei materiali con metodo AHP</b>	<b>65</b>
6.1. La nascita e lo sviluppo dell'AHP	66
6.2. La procedura dell'Analytic Hierarchy Process	67
6.2.1. Sviluppo della gerarchia	67
6.2.2. Costruzione della matrice dei confronti a coppie	68
6.2.3. Determinazione dei pesi locali relativi	70
6.2.4. Analisi della consistenza dei giudizi	70
6.2.5. Determinazione dei pesi globali: il principio di composizione gerarchica	72
6.3. Selezione del miglior materiale composito per la realizzazione di racchette da tennis	73
6.3.1. Calcolo delle proprietà meccaniche dei compositi analizzati	74
6.3.2. Analisi costi – prestazioni dei materiali in esame	77
6.3.3. Analisi con in metodo AHP	78
6.4. Osservazioni	93

<b>7. Il piatto corde</b>	<b>95</b>
7.1. Superficie dell'ovale	95
7.2. Le corde	95
7.3. Materiali utilizzati nella realizzazione delle corde	97
7.3.1. Corde in budello naturale	97
7.3.2. Corde in materiale sintetico	99
7.3.2.1. Monofilamenti	100
7.3.2.2. Multi-filamento	100
7.3.2.3. Avvolgimento	101
7.3.2.4. Principali materiali sintetici utilizzati nella produzione di corde per racchette da tennis	101
7.3.3. Incordature ibride	105
<b>Bibliografia</b>	<b>107</b>



# Introduzione

Le prestazioni in molti sport sono influenzate in una certa misura dalle apparecchiature utilizzate. Il tennis è uno di quegli sport, e l'attrezzo fondamentale è la racchetta.

Le moderne racchette da tennis non solo sono le migliori di sempre, ma sono anche più sofisticate e complesse che mai. Le racchette del XXI secolo sono infatti un mix di materiali high tech e di ingegneria. La scienza della racchetta da tennis è un campo complesso in continuo sviluppo: nuovi modelli vengono prodotti e vecchi modelli sono migliorati; vengono progettati in laboratorio dove i progettisti fanno uso di modelli matematici per calcolare i migliori materiali da utilizzare o le modifiche da fare. Fino all'inizio degli anni '60 il solo materiale utilizzato per fabbricare racchette da tennis era il legno.

Negli ultimi decenni si è assistito alla ricerca e alla sperimentazione di materiali innovativi, con caratteristiche meccaniche migliori. La tendenza odierna è di dirigersi verso materiali sempre più leggeri, realizzando racchette più grandi. Tutto ciò è possibile grazie all'impiego di materiali avanzati come i materiali compositi. Nei giorni nostri i materiali compositi vengono sempre più utilizzati poiché consentono di combinare diverse proprietà di materiali differenti in uno unico.

Questi materiali trovano diverse applicazioni, tra cui nel campo delle attrezzature sportive, in quanto, attraverso la combinazione di resistenza, rigidità e leggerezza, garantiscono un livello prestazionale elevato. Le potenzialità di questi materiali sono straordinarie, ma la loro diffusione su larga scala è frenata da considerazioni di carattere economico, poiché il loro costo rimane significativamente più elevato rispetto ai materiali tradizionali.

Con l'utilizzo di questi materiali i miglioramenti sono apparsi subito notevoli: le dimensioni delle racchette sono aumentate, i telai sono diventati più leggeri e si sono sperimentati nuovi tipi di corde per garantire ad ogni giocatore le caratteristiche volute. Il telaio e le corde sono infatti gli elementi di principale importanza per le prestazioni del giocatore.

I materiali utilizzati nelle racchette da tennis saranno l'oggetto della trattazione, che cercherà di dare una panoramica di quello che oggi, rispetto al passato, la tecnologia offre per questo settore in termini sia di prestazioni che di prospettive per il futuro.

La trattazione verrà così articolata: nei primi capitoli si parte con una descrizione generale delle racchette da tennis e della loro evoluzione nella storia arrivando al prodotto diffuso ai giorni nostri. Si descrivono le parti che costituiscono la racchetta e si approfondiscono quindi i materiali utilizzati nel passato e quelli utilizzati tuttora, con una breve trattazione sui materiali compositi a matrice polimerica. Si studia poi il processo utilizzato nella produzione di telai e si procede con un esempio di selezione dei materiali per realizzare il telaio delle racchette con metodo AHP. Infine si passa alla descrizione del piatto corde e dei vari tipi e materiali utilizzati per la realizzazione dell'incordatura.



# CAPITOLO 1

## La racchetta da tennis

### 1.1. Cenni storici:

Il tennis è uno sport che vede opposti due giocatori o quattro a seconda che l'incontro sia singolare o di doppio, divisi da una rete alta 914 mm.

Scopo del gioco è colpire la palla con una racchetta per far sì che l'avversario, posto nell'altra metà del campo da gioco, non possa ribatterla dopo il primo rimbalzo o battendola finisca con il commettere fallo.

Il tennis ha origini antichissime e pare che derivi da un gioco simile praticato all'epoca dei Romani e dei Bizantini dal nome latino *pila trigonalis* (ovvero "palla triangolare"). La racchetta da tennis, la grande protagonista di questo sport, fa il suo debutto nel XVI secolo: fino ad allora infatti, si giocava a pallacorda (versione arcaica del tennis) direttamente con le mani, protette da un guanto specifico. Dai suoi esordi fino agli anni Ottanta, la racchetta da tennis aveva il telaio in legno.

La rigidità e anche il discreto peso dello strumento, presupponeva una elevata preparazione tecnica dei giocatori, se si voleva ottenere la vittoria.

Il primo regolamento del tennis è invece datato 1874, mentre in Italia questo sport approderà soltanto sei anni dopo.

Attualmente questo sport è praticato a buoni livelli in tutto il mondo, nonostante le scuole principali siano in paesi come gli Stati Uniti, l'Australia o la Spagna.

### 1.2. Origine ed evoluzione

La racchetta da tennis è quindi una attrezzatura sportiva, strumento fondamentale nel gioco del tennis, costituita da una serie di corde rigide, ancorate ad un telaio.

La racchetta da tennis nasce utilizzando il legno, ma rigidità precaria e maneggevolezza ridotta, comportavano non poche difficoltà nell'usarla garantendo risultati soddisfacenti solamente a chi possedeva qualche dote innata, e quindi limitando sensibilmente la possibilità d'espansione di questo sport. L'evoluzione tecnologica ha permesso poi l'impiego di materiali più leggeri come leghe metalliche le quali hanno però il difetto di vibrare fortemente dopo ogni colpo diminuendo il comfort dell'atleta, particolare non trascurabile soprattutto nel tennis agonistico.

Oggi, passando per un lento ma inesorabile processo di modernizzazione, le racchette si fabbricano in materiali compositi come le fibre di carbonio, fibre di vetro e polimeri con l'aggiunta di tecnologie particolari che variano da produttore a produttore. Tutto questo per garantire uno "sweet spot" (punto ottimale d'impatto) molto ampio, rendendo le racchette

leggere, potenti ed estremamente confortevoli. Tutta questa tecnologia ed innovazione ha portato le racchette moderne ad avere una semplice ma eccezionale caratteristica, la facilità di gioco. Quest'ultime, ultra leggere, con il piatto corde uniforme, sono indicate anche per quegli atleti non particolarmente perfetti dal punto di vista tecnico poiché queste racchette di nuova generazione sostengono bene anche un impatto non perfetto con la pallina senza poi comportare gravi errori di traiettoria nel rilancio.

Infatti anche la più difficile delle racchette moderne è molto ma molto più semplice (grazie appunto allo sweet spot molto ampio) dei telai di una dozzina di anni fa.

Oggi sul mercato ci sono moltissimi modelli di racchette i quali si differenziano per materiale, configurazione e peso.

### 1. 3. Caratteristiche di una racchetta da tennis

Una racchetta da tennis si può suddividere principalmente in tre parti:

- ✓ *un telaio*: struttura, oggi progettata in materiali compositi, che sostiene il piatto corde e lo collega all'impugnatura;
- ✓ *un piatto corde*: è la parte deputata al contatto con la pallina; è formata da corde incrociate e fissate ad un telaio;
- ✓ *un'impugnatura*: è la parte destinata alla mano.



Figura 1.1 – Le parti che caratterizzano la racchetta da tennis.

Vediamo ora le qualità che una buona racchetta deve possedere per esser definita migliore di un'altra. Innanzitutto bisogna premettere che non esistono racchette perfette o ideali. Esistono soltanto racchette "migliori", ma bisogna sempre verificare che siano adatte al singolo giocatore, alla sua padronanza del tennis e soprattutto alle sue esigenze di gioco.

Una racchetta da tennis deve anzitutto garantire un buon **rendimento**, ossia le perdite di energia durante il colpo devono essere le minori possibili. Alcuni fattori meccanici come l'aumento del peso della racchetta, l'aumento di rigidità del piatto corde e la ripartizione della massa sulla testa della racchetta, possono aumentare il rendimento. La rigidità dell'attrezzo riveste un ruolo importante: ogni perdita di energia dovuta alla deformazione elastica della racchetta va a discapito della velocità della palla. In generale un rendimento elevato è sempre ottenuto a svantaggio della maneggevolezza e della comodità.

Oltre al buon rendimento la racchetta deve avere un buon **controllo**, ossia dev'esser facile piazzare la palla nel punto desiderato della racchetta ("sweet spot") ed eseguire colpi rapidi. Il controllo è favorito da una racchetta molto rigida, a incordatura larga e con telaio profilato.

Per **potenza** si intende la capacità della racchetta di trasferire velocità alla pallina. La potenza della racchetta è direttamente proporzionale alla rigidità del telaio, e quindi alla rigidità del materiale costituente il telaio.

La velocità acquisita dalla palla da tennis dopo il colpo è direttamente proporzionale al peso, alla rigidità della racchetta e a come viene ripartita la massa.

Il **peso** è dunque importante, poiché direttamente in relazione con la spinta data alla pallina. In passato si pensava che maggiore era il peso della racchetta da tennis, maggiore era la spinta. L'energia cinetica è infatti funzione diretta della massa. Tuttavia l'energia cinetica è anche funzione del quadrato della velocità di impatto:  $E_c = \frac{1}{2} m \cdot v^2$ . Diminuendo il peso dell'attrezzo la velocità del braccio aumenta, mentre l'energia cinetica aumenta al quadrato. Si è quindi passati a produrre racchette con il minor peso possibile. E' evidente che vi sono limiti fisici in quanto la velocità del braccio non può essere infinita.

Una racchetta deve inoltre garantire **comfort**, ovvero non deve dar luogo a vibrazioni dopo l'esecuzione del colpo. I fattori che possono migliorarlo sono un'impugnatura adatta al giocatore e una grande superficie dell'incordatura. Grande importanza ha anche il materiale di costruzione: una racchetta metallica, ad esempio, vibra di più di una in materiale composito, infatti le racchette costruite con materiale composito assorbono meglio le vibrazioni.

Un'altra caratteristica che una racchetta deve avere è la **maneggevolezza**, ovvero la facilità nel poter spostare la testa della racchetta nello spazio. Le condizioni necessarie sono la leggerezza e un equilibrio dinamico che mantenga il centro di gravità nell'impugnatura. In caso contrario si rischia di incorrere in fastidiosi inconvenienti, come il cosiddetto "gomito del tennista", problema molto diffuso anche in ambito agonistico.

LIVELLO DI GIOCO	CARATTERISTICHE RACCHETTA
Giocatore occasionale	Comfort e Maneggevolezza
Giocatore amatoriale, con movimento del braccio corto e velocità controllata.	Potenza e Rendimento
Giocatore assiduo, con movimenti a tempo e velocità di braccio elevata.	Controllo e Precisione

*Tabella 1.1 - Caratteristiche che la racchetta deve avere in base al livello di gioco.*

I principianti dovranno affidarsi a una racchetta da tennis che garantisca anzitutto comodità ed agio. Un professionista, invece, sarà più attento ad aspetti come la precisione o il rendimento.

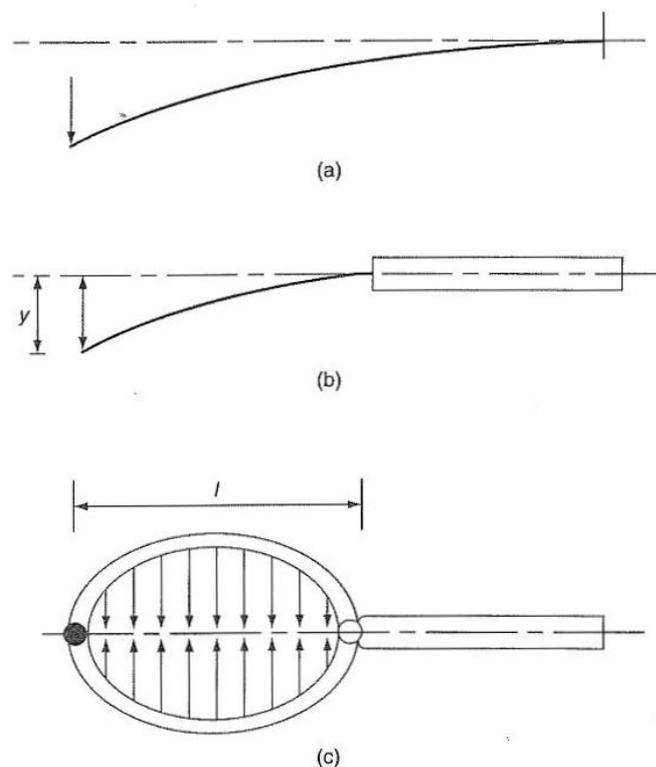
Un elemento decisivo nella valutazione del prodotto sarà anche il materiale utilizzato. Infine, un fattore che può determinare l'acquisto della racchetta, soprattutto per chi ha esperienza, è il *profilo*. Una racchetta cosiddetta "profilata" cioè che non ha lo stesso profilo su tutta la superficie, ha una rigidità superiore anche del 15% rispetto alle racchette non profilate.

Oltre alle caratteristiche sopraelencate una racchetta da tennis è caratterizzata anche dalle seguenti proprietà:

- ✓ **Inerzia:** a parità di massa, la racchetta che da migliori prestazioni è quella che ha il momento di inerzia più elevato: la massa cioè è ripartita in modo che il centro di gravità sia spostato verso la testa della racchetta. Un momento di inerzia alto favorisce il controllo della palla; uno più basso la maneggevolezza.
- ✓ **Rigidità in torsione:** più la racchetta è rigida, meno girerà intorno al proprio asse quando la palla non colpisce il centro del piatto corde. Il controllo della palla è dunque migliore anche se il comfort ne risente.
- ✓ **Elasticità in flessione:** nel momento in cui si colpisce la palla, una racchetta elastica si deforma con conseguente perdita di energia e diminuzione della velocità della palla (vedi Paragrafo 1.4). Tale racchetta ha dunque un rendimento minore, ma è più comoda in quanto assorbe maggiormente le vibrazioni.
- ✓ **Scarto geometrico:** si tratta della differenza tra lo sweet spot ed il centro geometrico. Dev'essere il più basso possibile. Lo sweet spot, o centro di percussione, è il punto centrale della racchetta, in cui la palla acquisisce più velocità e colpendo il quale il giocatore risentirà meno delle vibrazioni nel momento in cui la colpisce. Quanto al centro geometrico, si tratta semplicemente del punto dell'incordatura nel quale il giocatore cercherà istintivamente di colpire la palla.

### 1.4. Schema strutturale e aspetti progettuali

Dal punto di vista dell'analisi delle sollecitazioni, la racchetta da tennis può essere modellata come una mensola in quanto si può approssimare la presa del giocatore con un incastro. La racchetta si comporta quindi come una trave a sbalzo caricata con una forza che sarà pari a quella generata nell'impatto palla-piatto corde (Figura 1.2). La deformazione della racchetta dopo l'impatto con la palla è inversamente proporzionale alla rigidezza del telaio; tale caratteristica risulta essere molto importante e determinerà la potenza della racchetta. Più rigido è il telaio meno energia di deformazione questo è in grado di assorbire, convertendo tutta l'energia cinetica della racchetta sottoforma di energia cinetica della palla. La deformazione massima avverrà quando la palla è colpita nel punto più lontano dall'impugnatura, cioè nella testa della racchetta. Dato che l'area della sezione trasversale e la dimensione della testa della racchetta sono in genere molto più piccoli di quelli del manico, si può presumere che la maggior parte della deformazione si ha nella testa, come mostrato nella Figura 1.2 (b).



*Figura 1.2 – Semplificazione di una racchetta da tennis come una trave a sbalzo incastrata ad un estremo. (a) Deformazione di una trave a sbalzo di sezione trasversale uniforme sotto un carico concentrato che agisce all'estremità libera, (b) deformazione di una racchetta da tennis nel colpire la palla con la punta, e (c) forze che agiscono sulla testa della racchetta come a causa della tensione delle corde.*

La deformazione massima è data da:

$$y = \frac{Fl^3}{3EI} \quad (1.1)$$

\Dove:

- F = forza che nasce nel momento in cui si colpisce la pallina e che agisce sull'estremità della racchetta; è assunta essere una costante per tutti i progetti di racchette;
- l = lunghezza della testa della racchetta;
- E = modulo di Young del materiale della racchetta;
- I = momento d'inerzia della sezione trasversale della testa della racchetta in direzione della forza applicata.

La sezione trasversale del telaio della racchetta può essere complessa, soprattutto nel caso di profilati cavi. Per semplicità di analisi, sarà considerata come una sezione rettangolare con dimensioni esterne del H e B e dimensioni interne h e b costanti per tutti i materiali.

Dalla Figura 1.3,

$$I = \frac{BH^3 - bh^3}{12} \quad (1.2)$$

Dall'Equazione 1.1 si nota che la deformazione aumenta in maniera cubica con la lunghezza della testa della racchetta; teste più grandi significa grande punto ottimale e un miglior controllo. Le racchette con lunghezze di testa più grandi però soffrono maggiormente la deformazione. Bisogna trovare quindi un compromesso tra i due.

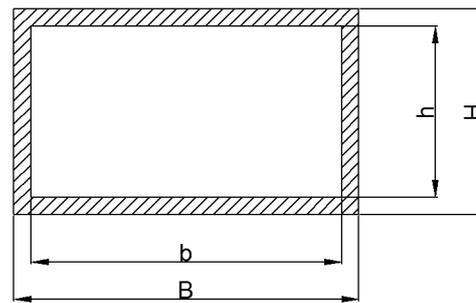


Figura 1.3 – Semplificazione della sezione trasversale del telaio della racchetta.

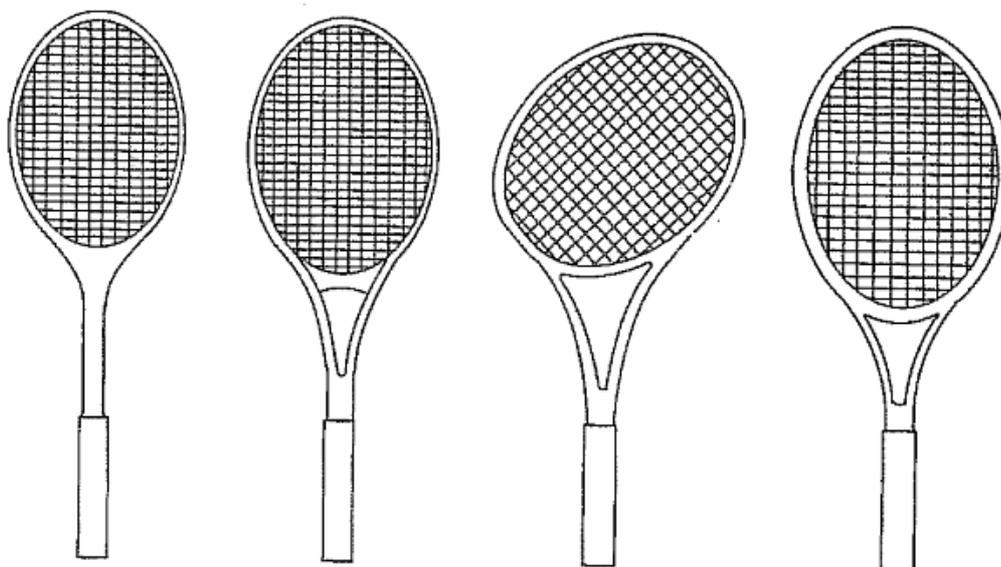
Un altro parametro che entra in gioco nella deformazione è il modulo elastico del materiale E: maggiore è il modulo elastico utilizzato nella fabbricazione della racchetta, minore è la deformazione della stessa. Infine l'ultimo parametro che influenza la deformata a flessione è il momento d'inerzia I: la freccia è inversamente proporzionale ad esso. Cambiare le dimensioni della testa della racchetta implica il modificarsi della posizione del baricentro. Ciò significa che la densità del materiali deve essere presa in considerazione quando si progetta la forma della racchetta. La densità influisce anche sul bilanciamento della racchetta. L'utilizzo di materiali più leggeri consentirà l'uso del bilanciamento con dei pesi nei punti appropriati della testa senza aumentare il peso totale del racchetta. Combinando rigidità e leggerezza, si può concludere che i materiali con una maggiore rigidità specifica ( $E/\rho$ ) consentiranno la realizzazione di racchette con una maggiore potenza e un miglior controllo. Dal punto del vista dello smorzamento delle vibrazioni, i materiali con basso modulo elastico forniscono una migliore ammortizzazione del colpo.

## CAPITOLO 2

### Il telaio

Anche nel tennis, come in qualsiasi altro campo, la rincorsa della tecnologia a supporto delle performance sarà sempre la prerogativa di ogni casa costruttrice, la quale si dedica giorno dopo giorno alla ricerca di materiali e innovazioni applicabili agli attrezzi da usare, in modo da garantire prestazioni sempre migliori ai tennisti. Inoltre, viene sfruttata la biomeccanica per comprendere maggiormente il corpo umano in modo da poter lavorare sulla racchetta per aumentare il comfort del giocatore e per ottimizzare le prestazioni della stessa. Nel tempo quindi, la forma ed i materiali utilizzati nella fabbricazione delle racchette da tennis hanno subito un notevole cambiamento.

Le racchette, oggi, sono disponibili in varie forme e dimensioni, come mostrato nella Figura 2.1.



*Figura 2.1 – Esempi di differenti forme di racchette da tennis.*

#### **2.1. Dimensioni del telaio**

La prima limitazione che viene fatta sulle racchette da tennis è sulla dimensione del telaio, cioè la sua lunghezza. Nel 1985, il regolamento della Federazione Internazionale di Tennis, ha stabilito che la lunghezza della racchetta non deve superare i 32 pollici (pari a 81,28 cm.) Le racchette tradizionali in legno avevano una lunghezza di 27 pollici (68,6 cm).

La scelta del telaio in base alla sua lunghezza viene effettuata in maniera proporzionale a fattori come l'età del giocatore o la sua statura.

Una maggiore lunghezza del manico avvantaggia i giocatori di bassa statura, ma rende più difficile il controllo dei colpi.

In seguito vengono elencate le principali categorie:

- **Mini:** lunghezza fino a 57,9 cm
- **Cadet:** lunghezza da 58 a 61,9 cm
- **Junior:** lunghezza da 62 a 65,9 cm
- **Senior:** lunghezza da 66 a 81,28 cm

## 2.2. Materiali

Un elemento particolarmente rilevante nella progettazione della racchetta è il materiale. Se, come abbiamo visto, non può esistere una racchetta da tennis perfetta, è tuttavia dimostrato che l'utilizzo di un determinato materiale possa influire pesantemente sulle prestazioni della stessa, contribuendo ad esaltare certe caratteristiche piuttosto di altre. In passato, i telai erano prevalentemente in legno e questo favoriva un gioco piuttosto tecnico, tuttavia comportava un notevole peso della racchetta. Oggi i produttori hanno decisamente imboccato la strada della sperimentazione, cercando di soddisfare le esigenze di numerosi professionisti i quali richiedono soluzioni tecniche in grado di migliorare le prestazioni delle racchette da tennis in modo da renderle adatte alle caratteristiche del giocatore.

Ecco dunque comparire le fibre composite, che hanno consentito di ottimizzare ed aumentare la superficie dell'incordatura e produrre racchette dalle elevate prestazioni. Va ricordato che la tipologia della fibra cui si ricorre ed il modo in cui è utilizzata per il telaio determinano una serie di fattori quali il peso, la rigidità della racchetta, ecc., che cambiano completamente le caratteristiche della racchetta.

Vediamo in base ai materiali quali sono le caratteristiche principali che ne risultano:

### 2.2.1. Legno

Inizialmente le racchette da tennis vennero create in legno in quanto era l'unico materiale facilmente reperibile disponibile a basso costo, basso peso specifico e facilmente lavorabile. Il legno principalmente usato nella produzione di racchette era il frassino (*Fraxinus excelsior*), un tipo di legno robusto e nello stesso tempo leggero e flessibile, facilmente lavorabile, semiduro, con fibratura diritta e tessitura piuttosto grossolana. Si curva anche molto bene e quindi trovava impiego nella realizzazione del telaio della racchetta e in tutti quegli oggetti in cui questa caratteristica viene valorizzata. Le racchette erano prodotte sovrapponendo 6-7 strati di legno ben incollati tra di loro con colle animali. Furono realizzate in legno fino agli anni Ottanta.

Caratteristiche meccaniche del legno di frassino:

- Modulo di elasticità:  $E= 12,5 \text{ GPa}$
- Densità:  $0,65\text{-}0,72 \text{ kg/dm}^3$
- $E/\rho=17,3$
- Carico di rottura a trazione:  $120 \text{ MPa}$
- Carico di rottura a flessione:  $105 \text{ MPa}$



*Figura 2.2 – Racchette da tennis in legno degli anni Sessanta.*

**2.2.2. Alluminio**

Il suo impiego nelle racchette da tennis risale agli anni Settanta; oggi è stato quasi totalmente abbandonato; un telaio in lega di alluminio non consente un buon controllo della palla ed è soggetto a vibrazioni, ma grazie al basso costo può essere un buon materiale per le racchette di principianti e bambini.

Dal punto di vista industriale questo metallo leggero (la sua densità è di  $2,71 \text{ g/cm}^3$ ) viene prodotto a partire dalla bauxite, una roccia diffusa soprattutto negli USA, e in alcuni paesi dell'est.

Le proprietà più importanti dell'alluminio sono il basso peso specifico, pari a circa un terzo di quello dell'acciaio, l'elevata resistenza alla corrosione, l'atossicità, l'elevata plasticità e l'eccellente duttilità e malleabilità.

L'utilizzo dell'alluminio in sempre più settori è dovuto in particolar modo dal favorevole rapporto  $E/\rho$  che permette il raggiungimento di alta rigidità specifica.

La presenza dell'alluminio nel mercato è vasta: solitamente si trova sottoforma di lega, mentre raramente è utilizzato sottoforma di metallo puro

Le leghe di alluminio si dividono in due categorie:

- leghe da fonderia: per fabbricazione di getti
- leghe da deformazione plastica per la produzione di laminati estrusi e forgiati.

Le *leghe da deformazione plastica* sono la categoria di maggior importanza dal punto di vista delle applicazioni. Tali leghe sono disponibili in commercio sotto forma di lamiere, estrusi, piatti, tubi, barre e fili; tali prodotti derivano da placche o billette alle quali vengono applicate delle lavorazioni primarie e secondarie che fanno loro conferire una struttura completamente ricristallizzata o frammentata, tipica di ogni lega e prodotto, e influenzano così le proprietà meccaniche e fisiche della stessa.

La classificazione internazionale (Alluminium Association) delle leghe da deformazione plastica prevede un sistema di quattro cifre in cui:

$$Xxxx T_n$$

dove:

- il primo numero indica la famiglia di leghe;
- il secondo indica le eventuali varianti rispetto alla lega originaria, alla quale è riservata a cifra 0;
- Le due cifre finali gli elementi secondari;
- $T_n$  indica il tipo di trattamento subito.

<b>SERIE</b>	<b>Leghe</b>
1xxx	Alluminio con purezza minima 99.00%
2xxx	Leghe Al-Cu
3xxx	Leghe Al-Mn
4xxx	Leghe Al-Si
5xxx	Leghe Al-Mg
6xxx	Leghe Al-Mg-Si
7xxx	Leghe Al-Zn
8xxx	Leghe Al con altri elementi
9xxx	Serie sperimentale

*Tabella 2.1 - Classificazione delle leghe di alluminio per lavorazioni plastiche.*

*Trattamenti:*

T<sub>3</sub> Invecchiamento naturale, lavorazione meccanica

T<sub>4</sub> Invecchiamento naturale

T<sub>6</sub> Invecchiamento artificiale

T<sub>7</sub> Overaging

T<sub>8</sub> Invecchiamento artificiale, overaging

Le *leghe da fonderia* sono presenti nel mercato con uno svariato numero di famiglie. Queste leghe sono particolarmente adatte alla realizzazione di getti e quindi ad essere colate e a solidificare nello stampo che riproduce l'oggetto da realizzare. La Figura 2.3 presenta l'attuale classificazione di tali leghe, secondo le norme EN 1706 e 1780. La designazione statunitense è costituita invece da una serie di codici a due o tre cifre che individuano le famiglie di leghe in base agli alliganti principali, come si può vedere in Tabella 2.2.

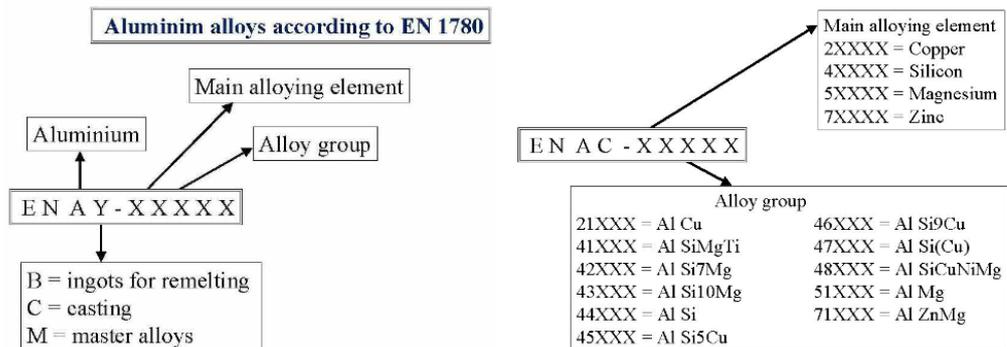


Figura 2.3 - Classificazione delle leghe di Alluminio da fonderia secondo EN 1780 e EN 1706.

Serie	Famiglia di leghe	Serie	Famiglia di leghe
Da 1 a 99	Al-Si	4xx	Al-Mn
1xx	Al-Cu	5xx	Al-Ni
2xx	Al-Mg	6xx	Al-Zn
3xx	Al-Si	7xx	Al-Sn

Tabella 2.2 - Sistema di designazione delle leghe da fonderia in uso negli USA.

La lega di alluminio utilizzata per la produzione di racchette da tennis è la serie 7xxx.

Il principale elemento di lega è lo zinco, l'elemento che ha la solubilità più elevata nell'alluminio, e con esso forma un eutettico alla temperatura di 382 °C: così, per quasi tutte le composizioni, si ha solidificazione di una soluzione solida primaria; al calare della temperatura il suo campo di stabilità crolla e si ha precipitazione di zinco. Generalmente le leghe binari Al-Zn non vengono usate, ma vengono preferite leghe Al-Zn-Mg. Si tratta di leghe da trattamento termico; queste sviluppano le caratteristiche meccaniche più elevate tra le leghe di alluminio; lo zinco aumenta la resistenza e la durezza, oltre a favorire l'autotemperabilità della lega. Le leghe Al-Zn-Mg, trattate termicamente, hanno la più elevata resistenza a trazione di tutte le leghe di alluminio.



Figura 2.4 – Racchetta in lega di Al.

Le principali caratteristiche dell'alluminio sono:

- modulo elastico:  $E=70$  GPa
- densità:  $\rho = 2,7$  g/cm<sup>3</sup>
- $E/\rho=26$
- tensione di rottura:  $\sigma_R = \sim 470$  MPa
- allungamento a rottura:  $\epsilon = 6-12\%$
- costo basso

### **2.2.3. Materiali compositi**

In rapporto a quelle progettate con materiali tradizionali, le racchette in materiali compositi godono di proprietà formidabili: si possono ottenere telai con elevata resistenza e rigidità, ma con un peso decisamente inferiore. Inoltre le proprietà dei materiali compositi permettono di disegnare il prodotto finale in modo tale da aumentarne le caratteristiche di resistenza e rigidità solo nei punti maggiormente sottoposti a sollecitazione, una prerogativa resa possibile dal tipo di rinforzo e dall'orientamento delle fibre. Il loro utilizzo è iniziato attorno agli anni Ottanta.

Va ricordato comunque che quanto più la fibra utilizzata sarà sofisticata, tanto più vedremo lievitare il costo della nostra racchetta.

Le fibre utilizzate nella produzione delle racchette sono:

- **Fibra di vetro:** leggera ed economica ha una sola controindicazione: avendo un basso modulo elastico non consente di impartire alla palla elevate velocità, quindi è sconsigliata per quei tennisti già di buon livello o che giocano nell'agonismo.
- **Fibra di carbonio:** questo materiale dà vita ad una racchetta molto rigida anche se leggerissima. Il difficile controllo della palla è compensato da un buon rendimento.
- **Kevlar:** viene utilizzato in piccole quantità in aggiunta alle fibre di carbonio, combinando la loro elevata resistenza a trazione con l'elevata resistenza ad impatto e a trazione del Kevlar; oppure in aggiunta alle fibre di vetro, combinando la loro buona resistenza a trazione ed il basso costo con la bassa densità e l'elevata resistenza ad impatto e a trazione del Kevlar.
- **Fibre di titanio:** sono utilizzate in aggiunta alle fibre di carbonio (leggere) per incrementare la resistenza del composito. In questo modo è possibile ridurre il peso pur mantenendo la rigidità e la potenza. Migliorano la maneggevolezza della racchetta.
- **Fibre di boro, SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e tungsteno:** sono le cosiddette fibre di qualità superiore; sono aggiunte alle fibre di carbonio contribuendo ad aumentare la rigidità della racchetta, la resistenza agli urti e ammortizzare le vibrazioni. Sono però molto costose.

In linea di massima, chi gioca occasionalmente ha bisogno di comfort e maneggevolezza e quindi può scegliere racchette in alluminio; chi gioca con frequenza regolare ma ha ancora un movimento del braccio corto e la velocità controllata, ha bisogno di una racchetta che consenta grande potenza e rendimento; chi ha una frequenza di gioco intensiva, un movimento del braccio medio o ampio e una rapida velocità del braccio ha bisogno di una racchetta che garantisca precisione e controllo, quindi rigida in fibre.



# CAPITOLO 3

## Materiali compositi

### 3.1. Generalità sui compositi

I materiali compositi risultano particolarmente interessanti in quanto offrono particolari combinazioni di diverse proprietà che non possono essere contemporaneamente presenti nei materiali tradizionali come le leghe metalliche, i ceramici ed i polimeri. Un materiale composito è infatti un materiale multifase creato artificialmente e diverso da quelli che si trovano in natura: in base al principio delle azioni combinate, l'ottimizzazione di una proprietà viene ottenuta mediante l'attenta e studiata combinazione di due o più materiali differenti a costo anche di peggiorarne alcune altre. I materiali compositi sono solitamente costituiti da quattro fasi:

- **la matrice:** è una fase continua e che avvolge la seconda, detta fase di rinforzo; assicura il trasferimento di carico;
- **fase di rinforzo:** è il costituente che migliora le proprietà della matrice; è costituito da *particelle* oppure più di frequente da *fibre* che possono essere: *continue* se lunghe quanto l'oggetto considerato, oppure *discontinue* se più corte; *allineate* secondo una determinata direzione oppure *disposte in ordine casuale* o *ordinatamente* su due o tre dimensioni.
- **fase di interfaccia:** rappresenta la zona di contatto tra matrice e fibra; è la sede di particolari interazioni chimico-fisiche che sono decisive per il trasferimento di carico tra matrice e rinforzo.
- **porosità:** è un difetto dovuto all'incompleta infiltrazione della matrice negli spazi tra le fibre; è derivante dal fatto che l'assemblaggio tra matrice e fibra avviene meccanicamente. Se è diffusa, porta a un minore trasferimento di carico; di conseguenza nei processi produttivi si cerca sempre di favorire la massima compattazione per evitare concentrazioni di tensione.

Le proprietà finali del composito dipendono strettamente dalle proprietà delle fasi costituenti, dalle loro quantità relative e dalla geometria delle fasi disperse ma dipendono anche in maniera significativa sia dall'interfaccia che dalla porosità. Per geometria delle fasi disperse s'intende, in questo contesto, la forma e la dimensione delle loro particelle, la loro distribuzione ed orientamento.

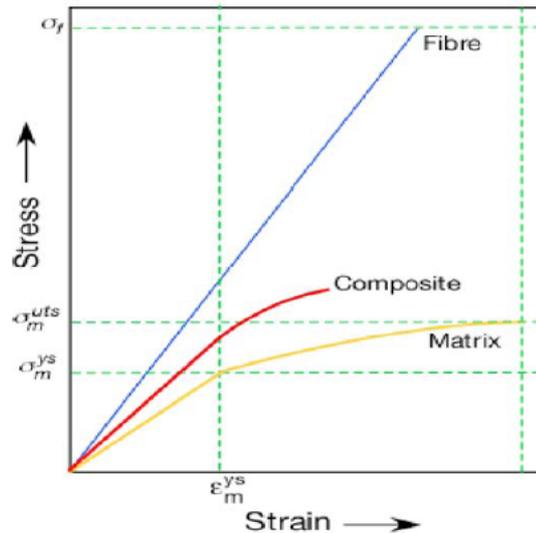


Figura 3.1 - Illustrazione del principio delle azioni combinate per la resistenza.

I compositi possono essere **distinti in base alla matrice** in:

- *compositi a matrice polimerica*, PMC: si tratta di materiali dotati di una buona combinazione tra resistenza, rigidità e leggerezza;
- *compositi a matrice metallica*, MMC: resistenza migliorata ad alta temperatura;
- *compositi a matrice ceramica*, CMC: sono caratterizzati da un'elevata tenacità e un'ottima resistenza alle alte temperature.

Oppure possono essere **distinti in base al tipo di rinforzo**:

- *compositi rinforzati da particelle*: la fase dispersa è in genere equiassica e le dimensioni delle particelle sono approssimativamente le stesse lungo tutte le direzioni;
- *compositi fibro-rinforzati*: la fase dispersa è composta da fibre, che hanno un alto rapporto lunghezza-diametro;
- *compositi strutturali*: possono essere considerati come una combinazione di materiali compositi e materiali omogenei.

I materiali compositi di cui noi ci occuperemo e con i quali vengono realizzate le racchette da tennis appartengono alla famiglia dei fibro-rinforzati a matrice polimerica (PMC).

### 3.2. Materiali compositi fibro-rinforzati

Questi particolari materiali sono realizzati con fibre e matrici a bassa densità, i quali offrono eccellenti valori della resistenza e del modulo specifici. La matrice può essere metallica, polimerica o ceramica. Nei primi due casi la fibra ha il compito principale di rinforzare il materiale, specie nei polimeri; nell'ultimo caso, invece, le fibre migliorano le proprietà meccaniche e hanno tuttavia l'effetto predominante di incrementare la tenacità. In base alla

natura e al diametro, le fibre sono suddivise in tre gruppi principali: whisker, fibre e filamenti. I whisker sono monocristalli molto sottili che 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. I filamenti 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.

### 3.3. Ripartizione del carico

Se sussiste un'interfaccia adeguatamente forte si attua un trasferimento di carico tra fibre e matrice.

In seguito viene analizzato il diverso comportamento nei casi di fibre corte o lunghe.

#### 3.3.1. Fibre lunghe

Nel caso in cui il materiale composito con fibre lunghe, allineate e continue lungo la direzione di sollecitazione, è soggetto a un carico di trazione, la deformazione della matrice e delle fibre risulta essere identica. Inoltre vale l'equazione della regola delle mescolanze:

$$\sigma_C = \sigma_F \cdot V_F + \sigma_M \cdot V_M \quad (3.1)$$

secondo cui lo sforzo a cui è soggetto il composito è determinato dalla somma tra quello assorbito dalle fibre e dalla matrice, rispettivamente moltiplicato dalla frazione volumetrica del costituente.

Applicando la legge di Hooke, si ricavano altre due equazioni:

- Equazione di ripartizione dei carichi:

$$\frac{P_F}{P_M} = \frac{E_F}{E_M} \cdot \frac{V_F}{V_M} \quad (3.2)$$

- Equazione di ripartizione degli sforzi:

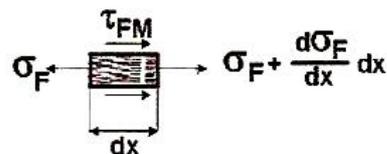
$$\frac{\sigma_F}{\sigma_M} = \frac{E_F \cdot \varepsilon_F}{E_M \cdot \varepsilon_M} = \frac{E_F}{E_M} \quad (3.3)$$

In definitiva, lo sforzo si ripartisce in base alla diversità dei moduli elastici ed è quindi indipendente dalla frazione volumetrica delle fibre; mentre il carico è fortemente dipendente da essa.

#### 3.3.2. Fibre corte

Nel caso delle fibre corte, la lunghezza delle fibre è un parametro molto importante, poiché la singola fibra non sopporta l'intero carico su tutta la sua lunghezza.

La tensione effettiva sulle fibre, in funzione della lunghezza, si ricava con l'equilibrio dinamico di un elemento infinitesimo della fibra:



$$\frac{d\sigma_F}{dx} \cdot dx \cdot r_F^2 \cdot \pi + 2\pi \cdot \tau_{FM} \cdot r_F \cdot dx = 0 \quad (3.4)$$

e quindi:

$$\sigma_F = \frac{2}{r_F} \cdot \tau_{FM} \cdot \left[ \frac{2}{r_F} - x \right] \quad (3.5)$$

dove:

- $r_F$  = raggio della fibra
- $\tau_{FM}$  = tensione di taglio (forza di legame) all'interfaccia fibra/matrice

la lunghezza critica della fibra vale:

$$l_C = \frac{\sigma_F \cdot d_F}{2 \cdot \tau_{FM}} \quad (3.6)$$

dove:

- $d_F$  = diametro delle fibre,
- $\sigma_F$  = è il carico di rottura a trazione della fibra.

allora la tensione effettiva sulle fibre risulta essere:

$$\sigma_{F,eff} = \eta \cdot \sigma_F \cdot \left( 1 - \frac{l_C}{2 \cdot l_m} \right) \quad (3.7)$$

dove:

- $l_m$  = lunghezza media delle fibre
- $\eta$  = efficienza della fibra (numero positivo inferiore di 1)

Di conseguenza possono essere considerati tre casi:

**1.  $l_m > l_C$**

$$\sigma_C = \eta \cdot C \cdot V_F \cdot \sigma_F \cdot \left( 1 - d_F \frac{\sigma_F}{2 \cdot l_m \cdot \sigma_m^*} \right) \quad (3.8)$$

dove:

- $C$  è un fattore legato all'orientazione delle fibre  
(orientate  $C=1$ ; irregolari  $C=0,2$ ; ortotropia  $C= 3/8$ );
- $\sigma_m^*$  corrisponde alla tensione di snervamento della matrice.

**2.  $l_m = l_C$**

$$\sigma_C = \frac{1}{2} \cdot \eta \cdot C \cdot V_F \cdot \sigma_F + (1 - V_F) \cdot \sigma_m^* \quad (3.9)$$

**3.  $l_m < l_C$**

$$\sigma_C = \eta \cdot C \cdot \sigma_m^* \cdot \frac{l_m}{2 \cdot d_F} + (1 - V_F) \cdot \sigma_m^* \quad (3.10)$$

Dalle relazioni ricavate si nota che l'effetto rinforzante è tanto più marcato quanto più sono elevati il contenuto e la lunghezza delle fibre, che devono essere disposte preferibilmente lungo una certa orientazione.

### 3.4. Tipi di fibre disponibili in commercio

Le fibre sono costituite da filamenti continui molto sottili e quindi comportano non poche difficoltà nella singola manipolazione. Per tale motivo vengono raggruppate in fasci, disponibili commercialmente in varie forme, di cui le più comuni sono riportate in seguito:

- *monofilamento*: elemento base con dimensioni di circa 10  $\mu\text{m}$  di diametro;
- *strand*: è il prodotto della macchina di filatura ed è costituito da un fascio formato da un gran numero di filamenti (dell'ordine delle migliaia), non ritorti, destinato ad essere filato, ritorto o strappato per l'utilizzazione sotto forma di fibra discontinua;
- *yarn*: consiste in un insieme di fibre o strand. Il più semplice yarn è un unico fascio di fibre, chiamato comunemente single yarn. Yarns più pesanti sono formati da più strands torti ed uniti a trefolo. Variando il processo produttivo di yarns e trefoli si variano la resistenza, il diametro, e la flessibilità degli yarns;
- *roving*: è praticamente un gruppo di fasci paralleli e non ritorti di fibre, uniti in un gomitolo o avvolti su un tubo cilindrico.

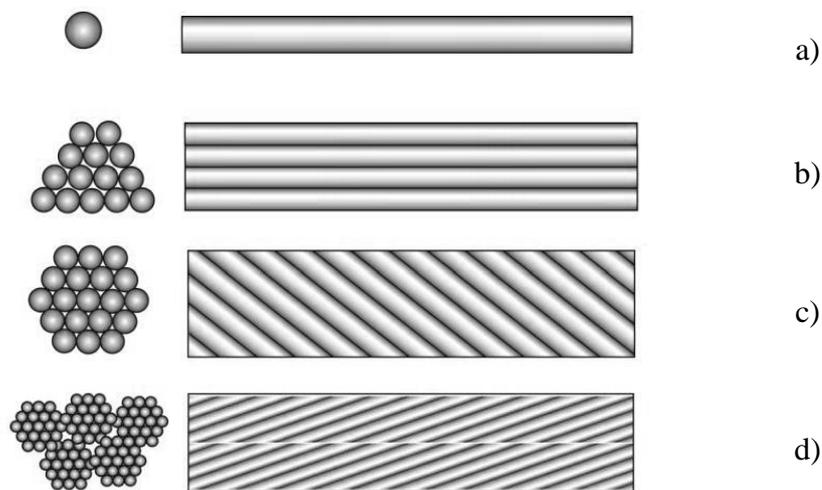


Figura 3.2 – Tipologie di fibre. a) monofilamento; b) strand; c) yarn; d) roving

### 3.5. Resistenza meccanica del composito

Per quanto riguarda il carico di rottura del composito, è necessario distinguere due casi, corrispondenti a matrici con deformazione massima a rottura più limitata di quella delle fibre e viceversa.

#### 3.5.1. Fibre più deformabili: $\epsilon_{Rm} \leq \epsilon_{Rf}$

Questo primo caso è tipico dei composti con matrice polimerica termoindurente, utilizzati anche per la realizzazione delle racchette da tennis. In questo caso, in un primo momento, fibre e matrice collaborano. In seguito, quando la matrice raggiunge la sua deformazione massima e comincia a fessurarsi, il composito continua a sopportare il carico attraverso l'azione dell'interfaccia che trasferisce una parte della tensione alle fibre ( $\sigma_{fMC}$ ); così si manifesta nel materiale una sorta di snervamento, ossia una deviazione della linearità sforzo-deformazione che avvisa l'avvicinarsi delle condizioni di rottura. A questo punto, se le fibre introdotte non sono in elevata quantità, il composito raggiunge la rottura completa quando si rompono le fibre. La tensione di rottura sarà:

$$\sigma_C = \sigma_{fMC} \cdot V_F + \sigma_m^* \cdot (1 - V_F) \tag{3.11}$$

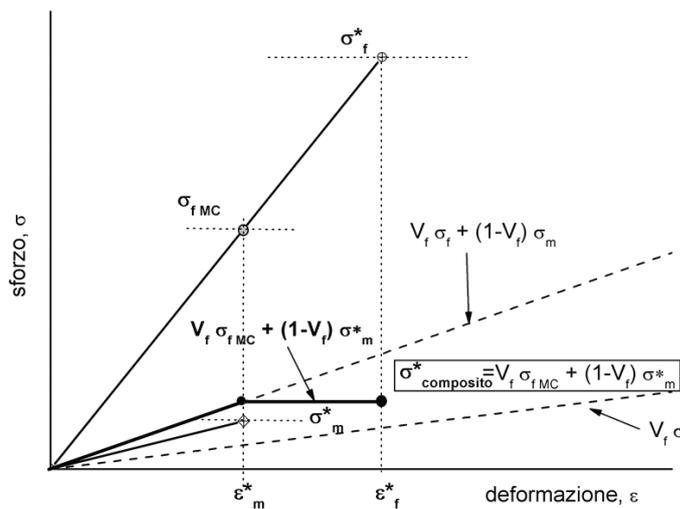


Figura 3.3 – Composito con poche fibre. Fibre più deformabili.

Invece se le fibre presenti sono numerose, sono in grado di sostenere da sole uno sforzo maggiore di quello della matrice, perciò la rottura del componente avverrà quando si sarà raggiunto lo sforzo di rottura delle fibre pari a:

$$\sigma_C = V_F \cdot \sigma_F^* \tag{3.12}$$

In ogni caso l'introduzione di fibre è vantaggiosa in quanto si migliora sempre la resistenza, rispetto a quella della matrice.

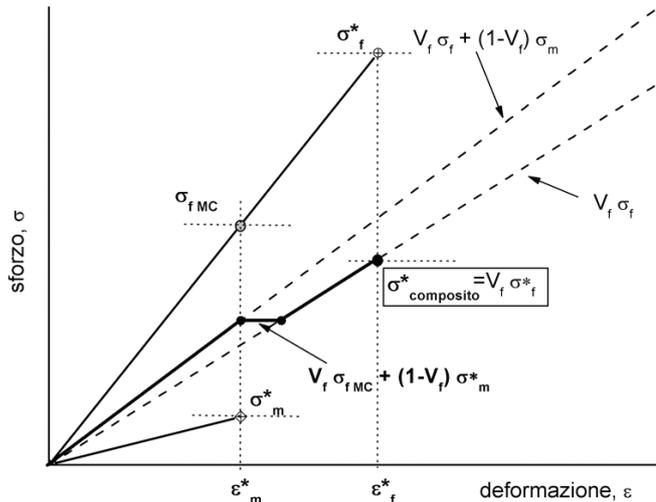


Figura 3.4 – Composito con molte fibre. Fibre più deformabili.

**3.5.2. Matrice più deformabile  $\epsilon_{Rm} \geq \epsilon_{Rf}$**

In questo caso le fibre si rompono per prime e comunque sostengono ancora una parte dello sforzo in quanto si assiste a fratture multiple, con fibre ridotte in pezzi sempre più piccoli, con lunghezza limite pari a quella critica. In corrispondenza della massima deformazione delle fibre avviene una deviazione di linearità. Le fibre si mantengono sollecitate la loro sforzo di rottura,  $\sigma_f^*$ , e la matrice allo sforzo corrispondente all'inizio della frattura delle fibre,  $\sigma_{mFC}$ . Se la quantità di fibre è limitata, anche per alti  $\sigma_f^*$  lo sforzo sostenibile è basso: le fibre si fratturano continuamente finché, raggiunta la dimensione critica, lo sforzo a loro assegnato si riduce; la resistenza del composito diventa pertanto dipendente esclusivamente dalla resistenza della matrice, e la rottura arriverà alla deformazione massima della matrice allo sforzo:

$$\sigma_C = \sigma_m^* \cdot (1-V_f) \tag{3.13}$$

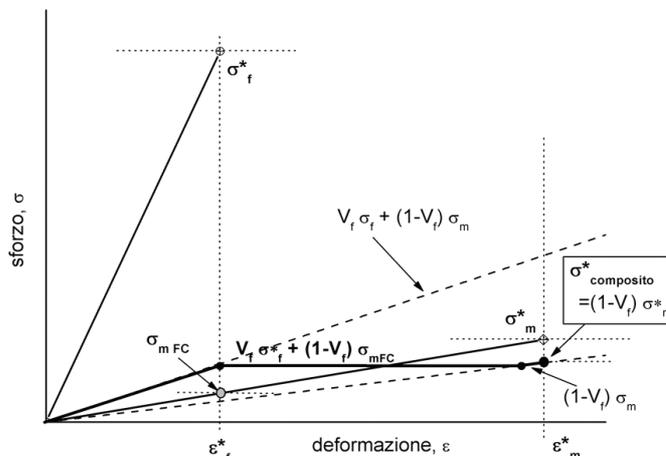


Figura 3.5 – Matrice più deformabile con poche fibre (lo sforzo è più basso della resistenza della matrice, quindi le fibre non rinforzano, ma indeboliscono la matrice).

Se le fibre sono in grande quantità sono effettivamente sfruttabili nella loro resistenza: la maggior parte del carico è ripartito su di esse e quando le fibre si rompono i frammenti sono comunque rinforzanti. La rottura arriva al carico:

$$\sigma_C = \sigma_f^* \cdot V_F + \sigma_{mFC}^* \cdot (1-V_F). \quad (3.14)$$

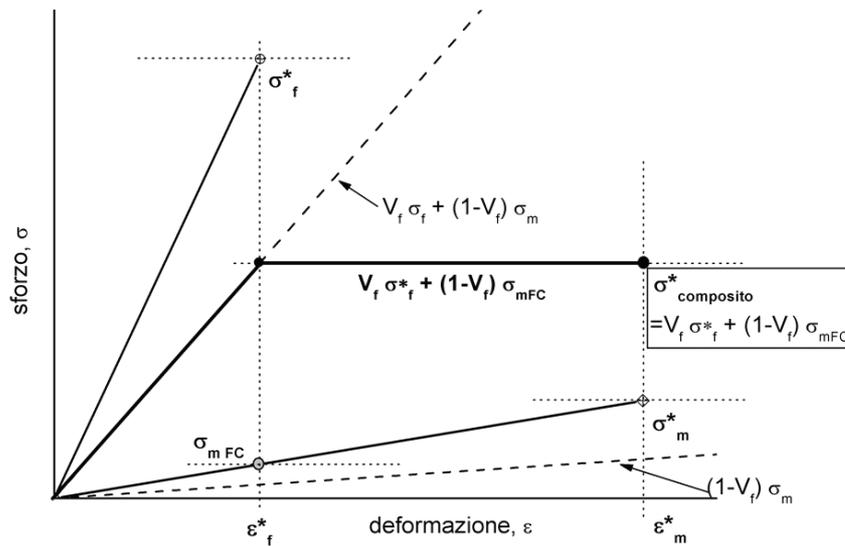


Figura 3.6 – Matrice più deformabile con fibre numerose.

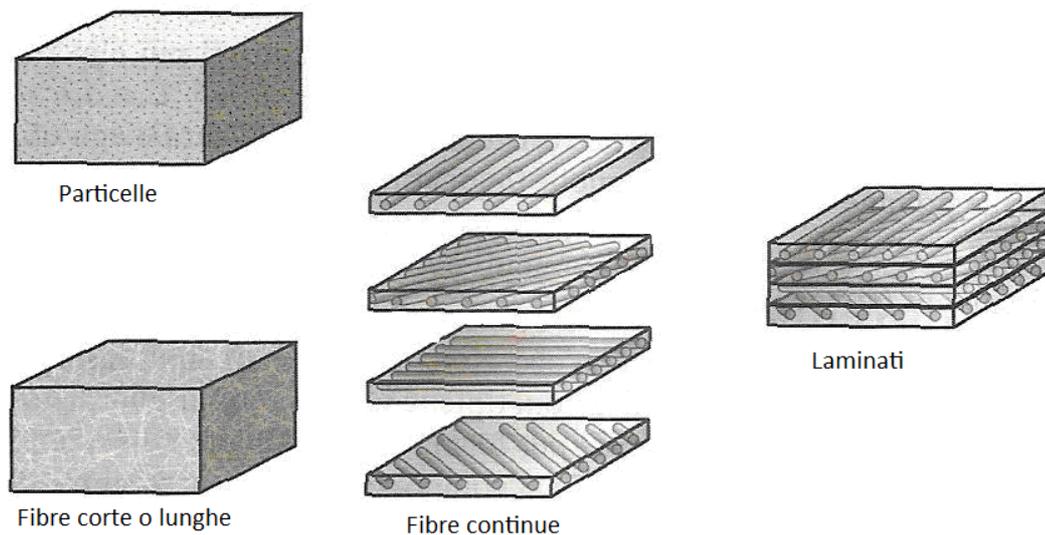


# CAPITOLO 4

## Composti a matrice polimerica: PMC

### 4.1. Generalità delle matrici polimeriche

All'interno del gruppo dei materiali di maggiore rilevanza vi sono i compositi a matrice polimerica. Questi materiali ingegneristici sono definiti come una combinazione di due o più fasi chimicamente distinte e insolubili. Le loro proprietà e le loro prestazioni strutturali sono superiori a quelle dei singoli costituenti considerati separatamente. Sebbene le materie plastiche posseggano proprietà (particolarmente in termini di resistenza, rigidità e resistenza al creep) che sono generalmente inferiori a quelle dei metalli e delle loro leghe, queste proprietà possono essere migliorate incorporando rinforzi di vario tipo nella matrice polimerica.



*Figura 4.1 – Rappresentazione schematica delle tipologie di compositi a matrice polimerica.*

I compositi a matrice polimerica sono costituiti da fibre disposte all'interno di una matrice di polimero, come si può vedere nella Figura 4.1. Questi materiali sono forti e rigidi e hanno valori elevati di resistenza specifica (rapporto tra resistenza e peso) e modulo specifico (rapporto tra modulo e peso), come riportato nella Figura 4.2.

Tuttavia, le fibre sono generalmente fragili, abrasive e scarsamente tenaci. Pertanto, prese singolarmente, hanno scarso valore come elementi strutturali.

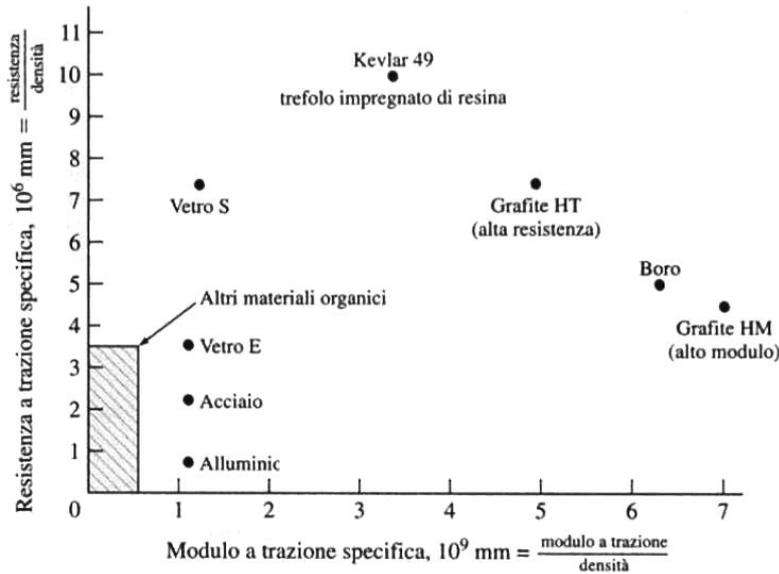


Figura 4.2 – Resistenza specifica a trazione vs modulo specifico a trazione per diversi tipi di fibra impegnati nei compositi a matrice polimerica.

La matrice polimerica ha senz'altro una resistenza e una rigidità inferiori, ma è più tenace delle fibre; i compositi riuniscono così i vantaggi di ciascuno dei due costituenti. Avviene quindi una coazione tra i 2 componenti (fibre e matrice).

Oltre ad avere resistenza specifica e modulo specifico elevati, le strutture in composito presentano anche valori maggiori di resistenza a fatica, tenacità e resistenza al creep rispetto alle plastiche non rinforzate. La percentuale di fibre (in volume) nei compositi varia di solito tra il 10 e il 60%. Nella pratica il massimo contenuto di fibre è pari al 65%; percentuali più elevate comportano generalmente una riduzione delle proprietà strutturali. Quando un materiale composito contiene più di un tipo di fibra, viene chiamato ibrido, e generalmente possiede proprietà migliori di quelle dei compositi contenenti un solo tipo di fibra.

I compositi a matrice polimerica hanno oggi una grande varietà di applicazioni anche nella produzione di attrezzature sportive, come nelle racchette da tennis.

Hanno oggi soppiantato altri materiali in una vasta gamma di applicazioni, anche se non sempre vengono utilizzati in elementi strutturali veri e propri; spesso ne vengono quindi limitate le possibilità di impiego e non viene ottenuto il massimo rendimento delle loro proprietà meccaniche.

Si possono classificare le matrici di possibile uso nei compositi polimerici in due tipi fondamentali:

- matrici termoindurenti;
- matrici termoplastiche.

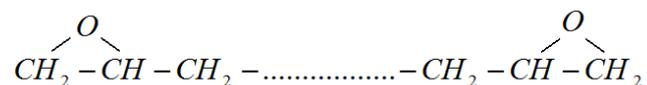
#### **4.1.1. Matrici polimeriche termoindurenti**

Con il nome di termoindurenti si indicano una vasta schiera di materiali plastici che hanno in comune la proprietà di divenire infusibili ed insolubili dopo essere stati portati a fusione e successivamente raffreddati. Tale caratteristica deriva dalla formazione a livello molecolare, dopo la prima fusione, di un reticolo tridimensionale tenuto insieme da forti legami covalenti i quali rendono irreversibile il processo. Il punto chiave dell'applicazione di tali polimeri sta nell'impregnazione di fibre con pre-polimeri liquidi, che si trasformano in una matrice solida successivamente per azione dell'induritore (ammine, stirene). L'irrigidimento della matrice segnala anche la fine della formatura del composito. A seconda del peso molecolare del pre-polimero, della lunghezza e della densità di legami di reticolazione, si ottengono matrici con diverse proprietà meccaniche.

La reticolazione può essere ottenuta a temperatura ambiente, ma è comune anche l'utilizzo di un trattamento termico, al fine di assicurare il completamento delle reazioni tra pre-polimero e induritore.

Le matrici termoindurenti hanno una limitata deformabilità. Sono infatti materiali fragili, e non danno deformazione plastica apprezzabile.

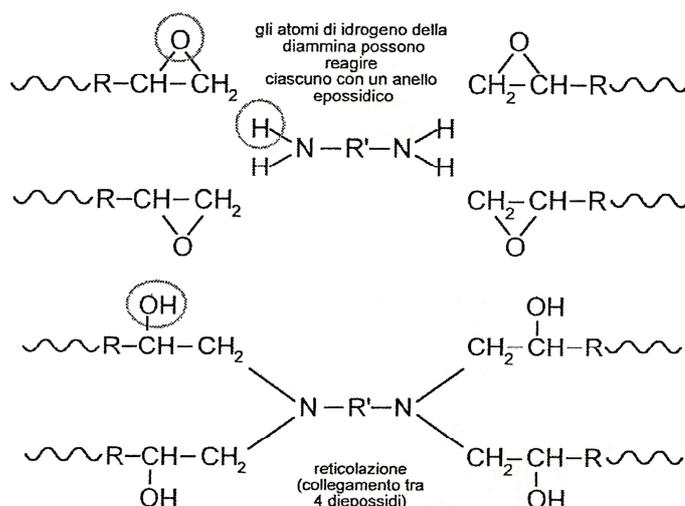
Una classificazione di tali matrici può essere fatta in base al campo di temperature alle quali le matrici dovranno lavorare. Per temperature minori di 250°C si utilizzano le *resine epossidiche* che sono le più importanti dato che risultano avere proprietà meccaniche migliori degli altri polimeri, ottima adesione alle fibre, buona resistenza chimica, basso ritiro e quindi bassi valori di sollecitazioni residue, associate ad una notevole stabilità termica. Queste risultano le migliori per l'impiego con le fibre di carbonio. Le resine epossidiche sono allo stato vetroso a temperatura ambiente; costituiscono la matrice della maggior parte dei materiali compositi. La sostanza di base di una resina epossidica è un polimero lineare a catena piuttosto corta, quindi generalmente liquido a temperatura ambiente, contenente due terminazioni epossidiche, ovvero con due strutture cicliche C-C-O in testa e in coda:



Gli anelli epossidici sono molto reattivi, e possono ad esempio essere aperti per reazione con un induritore. Se l'induritore è una diammina:



I quattro atomi di idrogeno reagiscono ciascuno con un anello epossidico, secondo lo schema:



La reattività degli epossidi con le ammine è tale da determinare una reazione significativa anche a temperatura ambiente (formulazioni a freddo “bicomponente”). Ricorrendo ad altri composti, rispetto alle diammine, si può avere reticolazione solo per riscaldamento: in questo caso il precursore epossidico e l’induritore possono essere miscelati, dando luogo alle formulazioni a caldo (“monocomponente”). Naturalmente la formatura può essere effettuata solo prima della reticolazione.

Seguono le **resine poliestere** che trovano un'ottima applicazione in unione alle fibre di vetro; le poliestere sono caratterizzate da un basso costo, da un breve tempo di polimerizzazione e da buone caratteristiche meccaniche. Le resine epossidiche, però, rispetto alle resine poliestere hanno in generale una tenacità a frattura più elevata, che tra l'altro può essere modificata agendo sulle formulazioni chimiche; in secondo luogo le resine epossidiche sono apprezzabili per l'alta temperatura di distorsione e per il ridotto ritiro indotto dalla reticolazione. Con le resine epossidiche si può decidere di interrompere la reticolazione dopo l'impregnazione di fibre formando delle lamine "pre-impregnate" che pervengono alla reticolazione completa dopo l'assemblaggio e magari l'applicazione di un certo trattamento termico; il ridotto ritiro da reticolazione è vantaggioso per la stabilità dimensionale.

Per temperature oltre i 250°C si utilizzano le **resine fenoliche** che assicurano le stesse proprietà delle resine epossidiche anche ad alte temperature. Gli svantaggi principali, di queste ultime, sono legati alla elevata pressione necessaria durante la polimerizzazione, all'alto contenuto di vuoti ed al caratteristico colore nero. Si ricordano le **resine viniliche**, che presentano le stesse peculiarità delle resine poliestere ma con un legame fibra-matrice più forte; ed i **polimeri poliammidici**, che mantengono buone proprietà meccaniche nonostante le alte temperature di esercizio.

### 4.1.2. Matrici polimeriche termoplastiche

Si definiscono termoplastiche le resine a struttura molecolare lineare che durante lo stampaggio a caldo non subiscono alcuna modificazione chimica e non sono reticolate. Il calore provoca la fusione e la solidificazione avviene durante il raffreddamento. È possibile ripetere il ciclo per un numero limitato di volte poiché troppi riscaldamenti possono degradare le resine. Le loro caratteristiche sono una conseguenza di pesi molecolari elevati e di particolari gruppi chimici nelle catene polimeriche, che massimizzano i legami intermolecolari. I rinforzi devono essere introdotti in polimeri già formati, allo stato fuso. La viscosità di un polimero termoplastico allo stato fuso è una caratteristica legata al suo peso molecolare.

Dato che un polimero termoplastico ha un peso molecolare molto più elevato di quello di un pre-polimero di una resina termoindurente, sussiste un problema di viscosità piuttosto elevata, che può essere ovviato predisponendo l'iniezione delle matrici negli spazi tra fibre, lungo brevi distanze e applicando pressioni elevate. Inoltre la viscosità diminuisce all'aumentare della temperatura ma anche all'aumentare della velocità di scorrimento e dello sforzo di taglio (Figura 4.3). Nella Figura 4.4 è riportata la variazione della viscosità con il tempo.

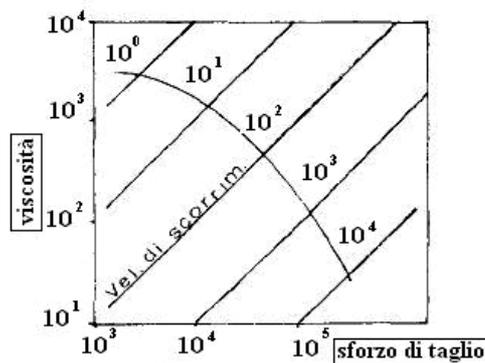


Figura 4.3- Variazione della viscosità in funzione dello sforzo di taglio.

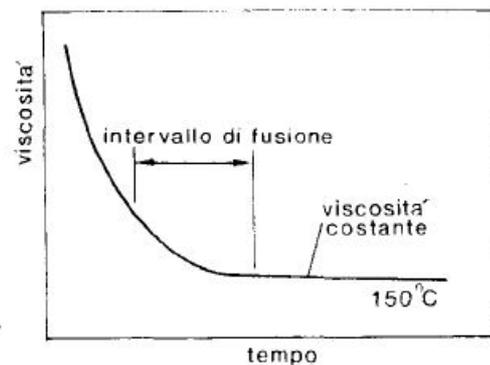


Figura 4.4 - Variazione della viscosità in funzione del tempo.

Le matrici termoplastiche più moderne coincidono con alcuni tecnopolimeri per alte temperature, quali il **polieter-eter-chetone (PEEK)**, i polisolfoni e i polisolfuri, le poli-immidi; una alternativa economica è rappresentata dalle **poliammidi (Nylon)**.

Per le matrici termoplastiche la deformazione massima è molto elevata, e il comportamento generale è elasto-plastico; non vengono quindi usate nella realizzazione di racchette da tennis in quanto il basso modulo elastico va a influire sul rendimento della racchetta.

Nella tabella seguente sono riportate alcune caratteristiche di matrici polimeriche.

Proprietà	Termoindurenti		Termoplastiche		
	Resine epossidiche	Resine poliesteri	Nylon 6,6	PP	PEEK
Densità (g/cm <sup>3</sup> )	1.1-1.4	1.2-1.5	1.14	0.90	1.26-1.32
Modulo elastico (GPa)	3.6	2.0-4.5	1.4-2.8	1.0-1.4	3.6
$\sigma$ rott (MPa)	35-100	40-90	60-70	20-40	170
$\epsilon$ rot (%)	1-6	2	40-80	300	50
Temperatura di fusione (°C)	-	-	265	164	334
Temperatura di distorsione (°C)	50-200	50-110	120-150	80-120	150-200
Ritiro alla reticolazione (%)	1-2	4-8	-	-	-
Assorbimento d'acqua, dopo 24 h a 20 °C (%)	0.1-0.4	0.1-0.3	1.3	0.03	0.1
Resistenza chimica	Buona, salvo contro acidi forti	Attacco da acidi forti e da alcali	Buona, attacco da acidi forti	Eccellente	Eccellente

*Tabella 4.2 - Caratteristiche di alcune matrici polimeriche a temperatura ambiente.*

## 4.2. Processi di lavorazione dei compositi fibro-rinforzati a matrice polimerica

A causa della loro struttura e delle caratteristiche individuali dei loro componenti, i compositi fibro-rinforzati a matrice polimerica richiedono speciali tecniche di formatura. La cura richiesta e le numerose fasi in cui si articola la produzione di compositi a matrice polimerica fanno sì che i costi di processo siano elevati. Pertanto, per minimizzare i costi mantenendo l'integrità del prodotto e gli stessi ritmi produttivi, è essenziale un'attenta valutazione e integrazione dei processi di progettazione e di produzione.

Le plastiche rinforzate possono essere lavorate tramite le tecniche descritte in seguito. Le fibre corte vengono comunemente aggiunte ai termoplastici nello stampaggio a iniezione; le fibre macinate possono essere utilizzate nello stampaggio a iniezione reattivo; fibre tagliate a pezzi di lunghezza maggiore vengono impiegate principalmente nello stampaggio a compressione. Al fine di ottenere un buon legame tra le fibre e la matrice polimerica e di proteggere le fibre nel corso delle fasi successive del processo, queste ultime subiscono precedentemente un trattamento superficiale di impregnazione.

Quando l'impregnazione viene eseguita in una fase separata, i fogli parzialmente reticolati che si ottengono vengono identificati con vari termini:

1. *Preimpregnati (prepreg)*

Le fibre continue sono allineate ( Figura 4.5) e sottoposte a un trattamento superficiale che ne migliora l'adesione alla matrice polimerica. Esse vengono poi rivestite per immersione in un bagno di resina fino a ottenere un foglio o un nastro (Figura 4.6b).

Infine, i singoli pezzi di foglio vengono assemblati in una struttura laminata. I prodotti realizzati in questa maniera sono gli elementi strutturali che richiedono una buona capacità di mantenere le proprietà meccaniche e la resistenza a fatica quando vengono sottoposti a diverse condizioni ambientali.

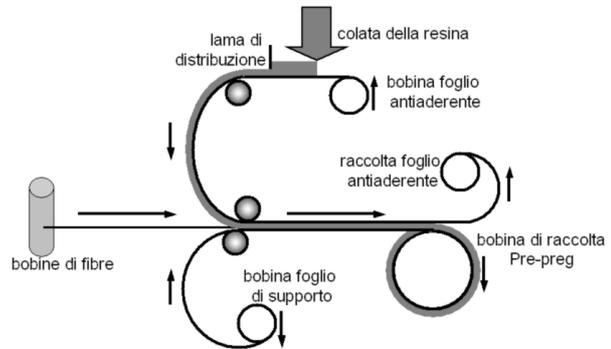


Figura 4.5 – Preparazione di semilavorati prepreg.

I processi produttivi a mezzo di lamine preimpregnate (o prepreg) sono molto diffusi e molto flessibili; si parte dai semilavorati costituiti da fibre incorporate all'interno nastri di matrice non completamente polimerizzata. Tipici valori dello spessore dei nastri vanno da 0,08 a 0,25 mm, con larghezze tra 25 e 1500 mm; il contenuto di resina varia tra il 35 e il 45% in volume.

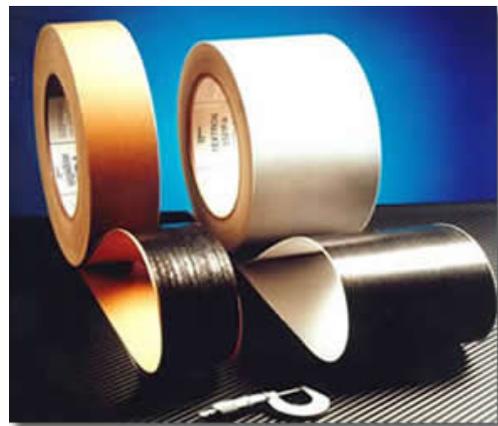
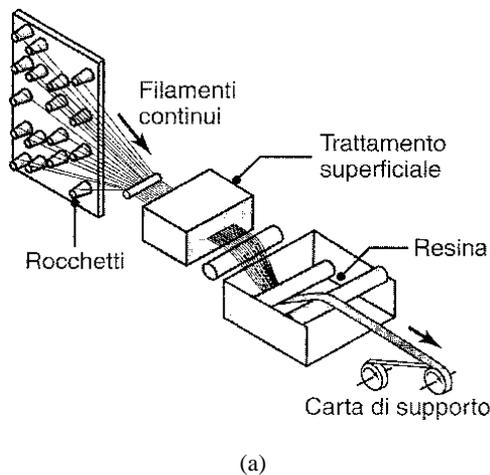


Figura 4.6 – a) Processo produttivo di un composito a matrice polimerica.  
b) Nastri preimpregnati.

Dato che la matrice non è allo stato di completa reticolazione, bisogna aver cura di fare in modo che il completamento della reazione avvenga solo in fase di formatura dei compositi e non nelle precedenti fasi di stoccaggio e trasferimento dei semilavorati. Tipicamente i prepreg sono conservati ad una temperatura non superiore a 0°C, e sono mantenuti a temperatura ambiente per tempi molto brevi prima della definitiva utilizzazione. La produzione di compositi corrisponde alla stratificazione di diversi nastri, realizzando

laminati o manufatti con fibre unidirezionali a seconda che si realizzi un orientamento di fibra diverso ad ogni strato, o meno. Si possono utilizzare, in luogo di fasci di fibre parallele, anche dei tessuti.

Il consolidamento del manufatto avviene per applicazione di calore e pressione (ad esempio in un'autoclave), finalizzati al completamento della reticolazione e alla rimozione di bolle d'aria tra i vari strati. Con la tecnologia pre-preg si può operare anche su matrici termoplastiche: nella fase di consolidamento non si ha reticolazione, bensì semplice rammollimento della matrice (che si consolida al raffreddamento). I processi pre-preg possono essere semimanuali (con operatori dedicati al taglio dei nastri e alla loro stratificazione) o completamente automatizzati.

## 2. Sheet-molding compound (SMC)

Filamenti continui di fibra di rinforzo vengono tagliati a pezzi per produrre fibre corte (Figura 4.7). Queste sono depositate su uno strato di pasta di resina, di solito una miscela di poliesteri, che viene trasportata su un film polimerico, ad esempio di polietilene. Un secondo strato di pasta di resina gli viene posto sopra e il foglio che ne risulta viene compresso passando attraverso alcuni rulli. Il prodotto è quindi raccolto su bobine, o posizionato a strati sovrapposti all'interno di contenitori, e immagazzinato fino a che non abbia completato un periodo di maturazione, al termine del quale avrà raggiunto la viscosità di stampaggio desiderata. Il processo di maturazione è caratterizzato da un controllo della temperatura e dell'umidità e di solito dura un giorno.

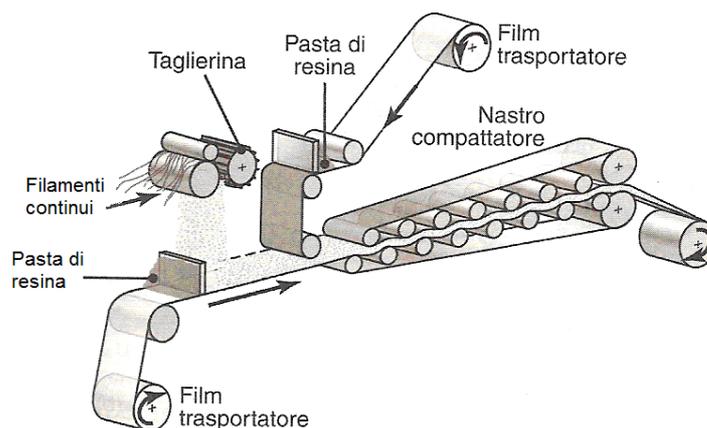


Figura 4.7 – Processo di produzione di fogli in composito a matrice polimerica.

Lo SMC maturato, che al tatto sembra pelle, ha una durata di scaffale di circa 30 giorni e deve essere utilizzato entro questo periodo. Alternativamente, la resina e le fibre possono essere mescolate soltanto nell'istante in cui devono essere posizionate nello stampo.

### 3. Bulk-molding compound (BMC)

Questi composti hanno la forma di billette, generalmente con un diametro che può raggiungere 50 mm; sono realizzati in modo analogo agli SMC. Quando vengono lavorati, i BMC hanno caratteristiche di flusso simili a quelle di un impasto; per questo sono anche indicati come dough-molding compound (DMC).

### 4. Thick-molding compound (TMC)

Questo composto unisce le caratteristiche dei BMC (costo inferiore) a quelle degli SMC (maggiore resistenza); esso viene solitamente stampato a iniezione, utilizzando fibre spezzettate di varia lunghezza.

#### **4.2.1. I principali processi produttivi dei compositi fibro-rinforzati**

I principali processi produttivi per compositi fibro-rinforzati sono:

- Pultrusion;
- Filament winding;
- Pulforming;
- Stampaggio.

#### **Pultrusion**

Parti che presentano elevati rapporti tra la lunghezza e l'area della sezione e diversi profili costanti, come aste, profili strutturali e tubazioni, sono realizzati mediante il processo di pultrusion. Con pultrusion si designa un processo di estrusione combinata ad una trazione. I processi di estrusione solitamente si realizzano forzando un polimero fluido attraverso una trafila, realizzando una pressione dall'interno, prima dell'uscita; nella pultrusione, al contrario, si sollecita dopo la trafila. Per i compositi fibrosi, attraverso la trafila passano fibre, sotto forma di fasci, con un movimento continuo, con tre fasi:

1. prima della trafila le fibre raccolgono matrice allo stato fluido (pre-polimero), dal passaggio entro una vasca di impregnazione;
2. la trafila compatta tra loro le fibre, parallelizzandole, forzando il polimero a riempire gli interstizi;
3. le fibre avvolte dalla matrice passano all'interno di una seconda trafila che conferisce la geometria di sezione definitiva e realizza la reticolazione, essendo adeguatamente riscaldata; il prodotto viene poi tagliato a misura.

Si ottengono manufatti di lunghezza continua (barre, tubi, travi a T, H ecc.), da tagliare secondo convenienza, di sezione trasversale a configurazione costante; le forme tubolari derivano dall'utilizzo di un mandrino centrale o di un'anima cava. La pultrusione è un processo continuo (Figura 4.8), facilmente automatizzabile e poco costoso; i prodotti finali sono però molto validi, dato che il processo realizza un allineamento pressoché perfetto delle fibre in direzione longitudinale e le frazioni volumetriche di fibra possono essere molto elevate.

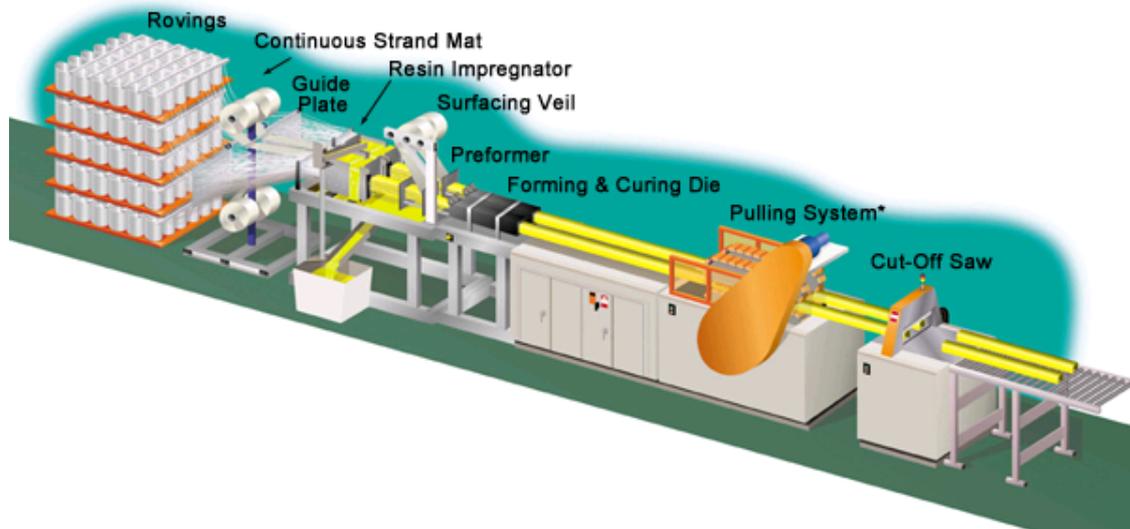


Figura 4.8 – Processo di pultrusione.

### Filament winding

Il filament winding è un importante processo in cui la resina e le fibre sono combinate nel momento della reticolazione. E' una seconda tecnica facilmente automatizzabile, molto efficace nel determinare compositi ad alta frazione volumetrica di fibre, adatto per la produzione di componenti assial-simmetrici, generalmente cilindrici come tubi e serbatoi, caratterizzati da un elevato rapporto resistenza/peso.

Il filamento, nastro o roving di rinforzo viene avvolto continuamente attorno a un mandrino o a una forma rotante. I rinforzi vengono impregnati passando attraverso un bagno polimerico. Dopo un sufficiente numero di strati, ovvero dopo un certo numero di giri,

si procede alla reticolazione della resina, in forno o a temperatura ambiente, e infine alla rimozione del mandrino. I prodotti realizzati mediante filament winding sono molto resistenti grazie alla loro struttura altamente rinforzata. L'orientazione delle fibre può essere variabile, adottando modalità di avvolgimento diverse: a elica, circonferenziale, polare (Figura 4.9); le fibre possono ad esempio essere orientate in direzione delle tensioni principali. Vista

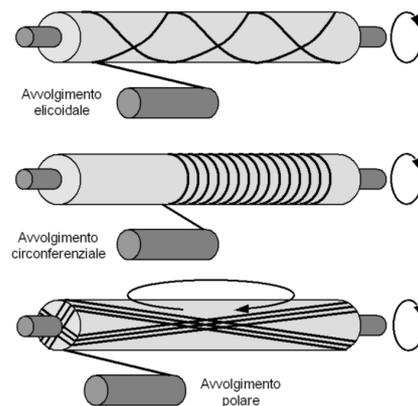


Figura 4.9 – Processo di filament winding.

l'economicità del processo, gli ultimi avanzamenti tecnologici riguardano la produzione di manufatti da filament winding con forme non limitate alla simmetria assiale.

### **Pulforming**

I prodotti con rinforzo continuo e sezione costante sono realizzati mediante pulforming. Dopo essere stato tirato attraverso il bagno polimerico, il composito viene afferrato tra le due metà di una matrice e reticolato fino a diventare un prodotto finito. Le matrici si spostano e formano i prodotti in successione.

### **Stampaggio**

Vi sono cinque metodi di base impiegati per stampare i compositi a matrice polimerica.

1. *Stampaggio a compressione*. In questo processo, il materiale viene posizionato tra le due metà di uno stampo e viene loro applicata una certa pressione. A seconda del materiale, gli stampi sono a temperatura ambiente o sono riscaldati per accelerare l'indurimento. Il materiale può essere in forma massiva (BMC), che è un miscuglio viscoso e adesivo di polimeri, fibre e additivi. Esso viene generalmente formato in un tronco per poi essere tagliato a misura prima di essere posizionato nello stampo. Nello stampaggio a compressione si possono utilizzare anche sheet-molding compound (SMC); questi miscugli sono simili ai BMC, ad eccezione del fatto che la miscela di resina e fibre viene depositata tra due fogli di plastica per realizzare un sandwich che può essere maneggiato con facilità. I fogli vengono rimossi dopo che lo SMC è stato posizionato all'interno dello stampo.
2. *Stampaggio con sacca a vuoto (vacuum-bag molding)*. Nello stampaggio con sacca a vuoto alcuni preimpregnati vengono depositi in uno stampo e la pressione necessaria per realizzare la forma e sviluppare un buon legame è ottenuta coprendo lo strato con una sacca di plastica e facendo il vuoto. Se si rendesse necessario utilizzare temperature e pressioni superiori, l'intero insieme può essere posizionato in un'autoclave. Nel caso in cui si desideri una specifica orientazione si deve prestare una certa cura per mantenere l'orientazione delle fibre. Per impedire alla resina di incollarsi alla sacca a vuoto, numerosi fogli di vari materiali (tela di rilascio) sono posizionati sopra i fogli di preimpregnato. Sebbene gli stampi possano essere realizzati in metallo, di solito alluminio, molto spesso sono ottenuti a partire dalla stessa resina (con rinforzo) che viene reticolata nel processo. Questa condizione elimina qualsiasi problema derivante da differenze di dilatazione termica tra lo stampo e il pezzo.

3. *Stampaggio per contatto (contact molding)*. Questo processo viene impiegato per realizzare prodotti con rapporti elevati tra l'area della superficie e lo spessore. Esso utilizza un unico stampo, realizzato con materiali come compositi a matrice polimerica, legno o gesso. Il processo di stampaggio per contatto è una tecnica a umido, perché il rinforzo viene impregnato con la resina al momento dello stampaggio. Il metodo più semplice viene chiamato stratificazione manuale (hand lay-up). I materiali vengono posizionati e formati nello stampo a mano e l'azione di schiacciamento espelle ogni trappola d'aria e compatta il pezzo. Lo stampaggio può anche essere effettuato mediante spruzzatura. Soltanto la superficie dal lato dello stampo è liscia e la scelta dei materiali è limitata.
4. *Stampaggio a trasferimento di resina (RTM, resin transfer molding)*. In questo processo, che si basa sullo stampaggio a trasferimento, una resina miscelata con un catalizzatore, avendo una bassa viscosità, viene iniettata a pressioni relativamente basse nella cavità di uno stampo con una pompa volumetrica a pistoncini. Nella cavità la resina impregna una struttura di fibre di rinforzo, precedentemente posizionata. La reticolazione avviene all'interno dello stampo riscaldato. Quest'ultimo è di solito di metallo, in quanto ha un'elevata conducibilità termica e dura per molte operazioni di stampaggio. Per una finitura superficiale ottimale, un gel viene applicato sulla superficie dello stampo prima dello stampaggio. Con questo metodo vengono prodotti pezzi di elevata qualità.

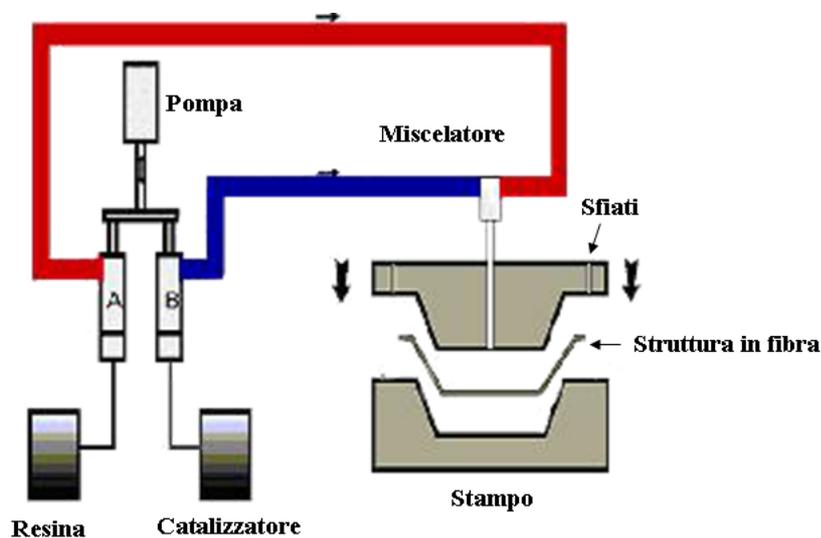


Figura 4.10 – Schema dell'impianto di stampaggio a trasferimento di resina.

5. *Stampaggio a iniezione/trasferimento*. Questa è un'operazione automatica che combina i processi di stampaggio a compressione, stampaggio a iniezione e stampaggio a trasferimento. Di conseguenza, sfrutta i vantaggi di ciascun processo e produce pezzi con proprietà migliori.

### 4.3. Processo produttivo di un telaio in materiale composito

Per produrre il telaio di una racchetta da tennis viene utilizzata la tecnica dello stampaggio a trasferimento di resina (RTM). Prima di tutto si deve creare una preforma in fibra; questa fase può essere fatta con 2 diverse tecniche:

#### 1. Filament winding

Con questa prima tecnica si avvolge un filamento in maniera elicoidale su un mandrino rotante allungato in modo da formare un tubo di fibre.

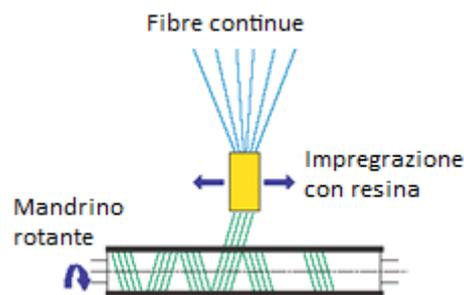


Figura 4.11 – Realizzazione del tubolare in fibra con filament winding.

Il filamento, proveniente da un rowing continuo, viene mosso da un carrello che si sposta in direzioni opposte parallelamente all'asse longitudinale del mandrino. Vengono fatti più avvolgimenti con diversa direzione delle fibre e con diverso passo tra una spirale e l'altra in modo da conferire al composito migliori proprietà meccaniche. Il tubo è quindi formato da fibre continue. Terminato l'avvolgimento si rimuove il tubo dal mandrino.

#### 2. Con laminati

Sovrapponendo più strati di pre-preg, con orientazioni prefissate delle fibre che si vogliono utilizzare nella realizzazione del telaio, si ottiene il cosiddetto laminato, il quale a differenza dei singoli strati fortemente anisotropi, è ortotropo. Questa procedura viene fatta manualmente dall'operatore.

Il foglio laminato viene poi arrotolato intorno ad un tubo di gomma in grado di poter essere successivamente pressurizzato con l'aria compressa. In questo modo si otterrà poi una struttura tubolare.

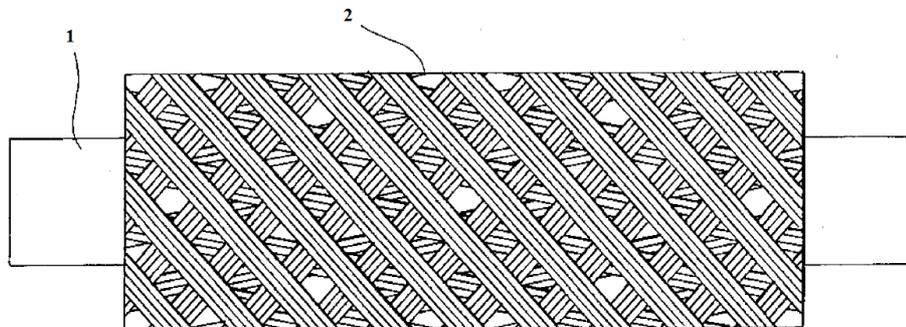


*Figura 4.12 – Realizzazione del tubolare con pre-pregs avvolti.*

La Figura 4.13 illustra la struttura di un tubo (2) in fibre dopo che è stato rimosso dal mandrino. Il tubo può essere formato nei due modi sopraelencati. Le fibre utilizzate per formare il tubo possono essere di materiali diversi così da sfruttare le proprietà migliori di ogni singolo materiale.

Vediamo ora come avviene la formatura del telaio.

Una sacca gonfiabile tubolare (1) in materiale elastomerico è posizionata all'interno del tubo. La sacca può essere inserita nel tubo dopo che questo è stato rimosso dal mandrino, o può essere inserita sopra il mandrino in modo che il tubo venga realizzato sopra la sacca.



*Figura 4.13 – Rappresentazione della struttura in fibre avvolte su una sacca elastomerica tubolare.*

La Figura 4.14 illustra la metà di uno stampo utilizzato nello stampaggio a trasferimento di resina per realizzare racchette da tennis (3).

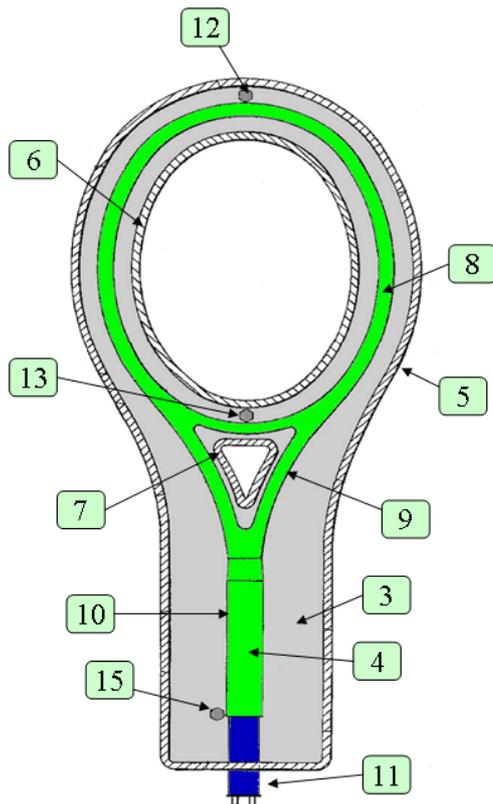


Figura 4.14 – Disegno di uno stampo per telaio.



Figura 4.15 – Foto di uno stampo per telaio.

Lo stampo include una cavità (4), una guarnizione in elastomero esterna (5) che circonda la cavità, e le guarnizioni in elastomero interne (6) e (7).

La cavità dello stampo ha la forma del telaio della racchetta che si vuole realizzare e include un anello avente la forma dell'ovale (8), una porzione della gola (9), e il manico (10). Il fondo del manico è costituito da un tubo cavo. Un collettore (11) permette di collegare con l'esterno la sacca attorno alla quale sono avvolte le fibre. Un raccordo di aspirazione per la resina (12) comunica con la cavità dello stampo ed è posizionato nella testa della racchetta. Un primo raccordo di uscita per la resina (13) è collocato nella parte bassa dell'ovale, mentre il secondo raccordo è posizionato alla fine del manico (14).

Le parti di tubo sconnesse vengono collegate con dei pezzi di pre-preg, i quali, una volta iniettata la resina, formano un tutt'uno. Se necessario si vanno a rinforzare le zone più critiche con altre fibre, quindi si va a inserire il tubo nello stampo avente la forma del telaio che si vuole realizzare. Il tubo (2) è situato nella cavità dello stampo (4) in modo che le due estremità del tubo si trovino lungo la porzione di manico (10) mentre la restante parte centrale del tubo è disposta a formare l'ovale (8).

La Figura 4.16 mostra le due metà dello stampo dopo che lo stampo è stato chiuso. Il tubo di aspirazione della resina (16) è collegato al raccordo di ingresso (13), e tubi di scarico della resina (17) e (18) sono collegati ai raccordi di uscita (14) e (15). Il tubo dell'aria compressa (19)

è collegato all'estremità della sacca (1) in modo che, gonfiandola, il tubo in fibre precedentemente posizionato all'interno della cavità dello stampo sia costretto ad adagiarsi sulle pareti dello stampo. La sacca viene gonfiata prima dell'iniezione della resina epossidica ad una pressione di circa 3,5 atm, e rimane a tale pressione durante tutta l'iniezione. La resina viene iniettata sotto pressione nella cavità dello stampo attraverso il tubo di ingresso (16) ed il raccordo di ingresso (13).

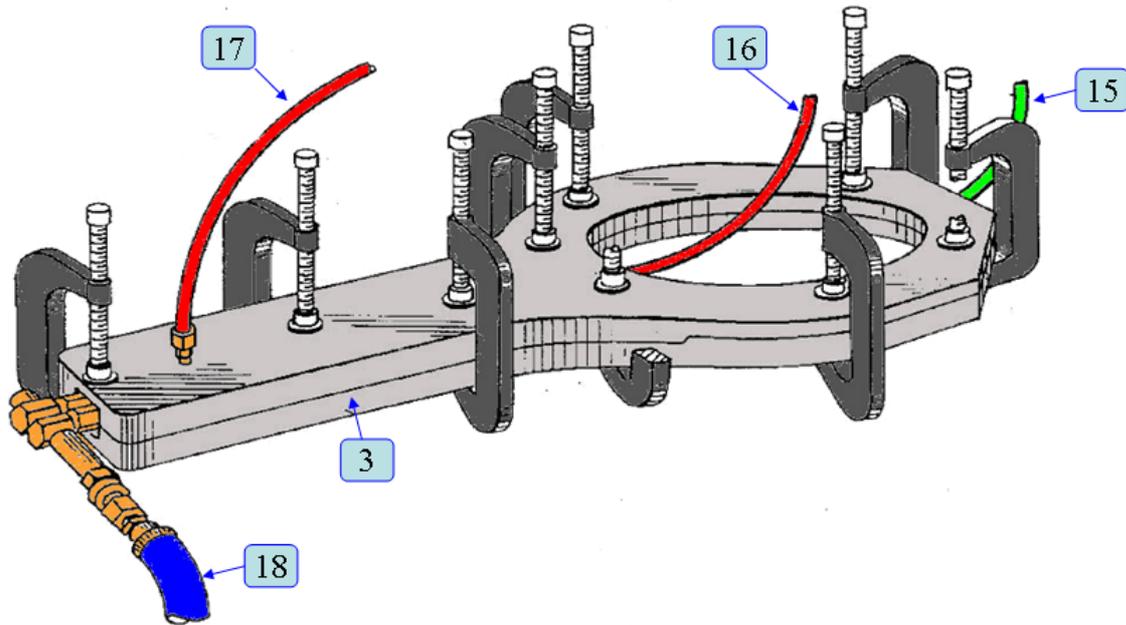


Figura 4.16 – Schema dello stampo chiuso.

La pressione della resina, necessaria per impregnare le fibre durante l'iniezione, dipende dalla viscosità della resina. La resina scorre sotto pressione tra le spire del tubo di fibre ed esce attraverso i raccordi di uscita (14) e (15) e i corrispondenti tubi (17) e (18). Il flusso della resina attraverso gli avvolgimenti può essere agevolato applicando una pompa a vuoto ai tubi di uscita (17) e (18). L'applicazione del vuoto durante l'iniezione della resina aiuta anche nella rimozione di aria dalla cavità dello stampo che può provocare la comparsa di bolle d'aria all'interno del telaio. Lo stampo viene riscaldato a 150°C per diversi minuti (sempre con la sacca pressurizzata) fino a quando la resina è completamente reticolata. In alternativa, il tubo vuoto può essere riempito con schiuma di poliuretano. La schiuma, quando lo stampo viene riscaldato, si espande consolidando i materiali.

Dopo aver estratto il telaio dallo stampo, la parte finale dell'impugnatura viene tagliata alla giusta misura, e vengono eseguiti i fori per permettere il fissaggio delle corde sul telaio. Dopo la foratura, la racchetta viene spazzolata e posta in un essiccatore. La superficie del telaio deve poi essere levigata per rimuovere la resina in eccesso e per produrre una superficie liscia. Infine il telaio viene verniciato.

## CAPITOLO 5

### Fibre di rinforzo utilizzate nelle racchette da tennis

L'utilizzo di fibre nei materiali compositi è dovuto soprattutto alla loro resistenza, che cresce mano a mano che sono più sottili; questo perché essendo più fini, la distanza media tra i difetti interni presenti aumenta sempre di più e quindi la probabilità di rottura diminuisce.

Le fibre continue vengono classificate in *multifilamenti* (blocchi di 500-1000 fibre singole di diametro pari a 6-20  $\mu\text{m}$ ) e in *monofilamenti* (fibre singole con  $d=100-150 \mu\text{m}$ ). Le molteplici proprietà variano poi al variare dei processi produttivi, della composizione chimica e della disposizione modificando quindi densità, resistenza e il modulo di Young.

#### 5.1. Multifilamenti

I multifilamenti di fibre possono essere di composizioni chimiche differenti; le più diffuse sono le fibre di vetro, fibre di carbonio, fibre di titanio e fibre aramidiche, più comunemente chiamate Kevlar.

##### 5.1.1. Fibre di vetro

Il vetro è uno dei materiali rinforzanti più noti; le fibre di vetro sono generalmente di due tipi:

- **vetro E:** tale tipo di vetro, molto comune, corrisponde ad un vetro a base di  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{SiO}_2$ , con un rilevante contenuto anche di  $\text{B}_2\text{O}_3$ . L'assenza di alcali è motivo di una grande resistività elettrica, tanto che il vetro è noto come "vetro elettrico". Il modulo elastico delle fibre (di diametro dagli 8 ai 15  $\mu\text{m}$ ), ottenute per filatura del fuso vetroso, è piuttosto basso, infatti si aggira sui 76 GPa; tuttavia la resistenza meccanica è molto buona: la tensione di rottura può arrivare tranquillamente a circa 3,5 GPa.
- **vetro S ("strength"):** questo tipo di fibre viene usato quando si vogliono ottenere proprietà migliori, infatti è circa un terzo più resistente del vetro E ed il suo modulo risulta essere circa il 20% più alto; è a base praticamente di soli  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{SiO}_2$ . Il vetro S è assai più costoso in quanto è più altofondente del precedente vetro, ma consente di ottenere un modulo elastico discreto, che può arrivare a  $E_r \sim 90 \text{ GPa}$  e un'eccellente resistenza a trazione ( $\sigma^*_f = \sim 4.5 \text{ GPa}$ ). Questo vetro viene largamente usato per applicazioni dove sono richiesti alta resistenza specifica e buone caratteristiche a temperature elevate insieme ad un alto limite di fatica, tutte qualità, queste, presenti in questo tipo di fibre.

	Vetro E	Vetro S
Composizione (% in peso)		
SiO <sub>2</sub>	54,22	64,4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,4	25,0
CaO	17,2	
MgO	4,6	10,3
Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O	0,8	0,3
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,6	

Tabella 5.1 – Composizione del vetro E e vetro S

Le principali caratteristiche delle fibre di vetro sono:

**VETRO E**

- modulo elastico:  $E=76$  GPa
- densità:  $\rho =2,56$  g/cm<sup>3</sup>
- $E/\rho = 30$
- tensione di rottura:  $\sigma_R =3,45$  GPa
- costo bassissimo

**VETRO S**

- modulo elastico:  $E=85,5$  GPa
- densità:  $\rho =2,48$  g/cm<sup>3</sup>
- $E/\rho = 34,5$
- tensione di rottura:  $\sigma_R =4,60$  GPa
- costo bassissimo

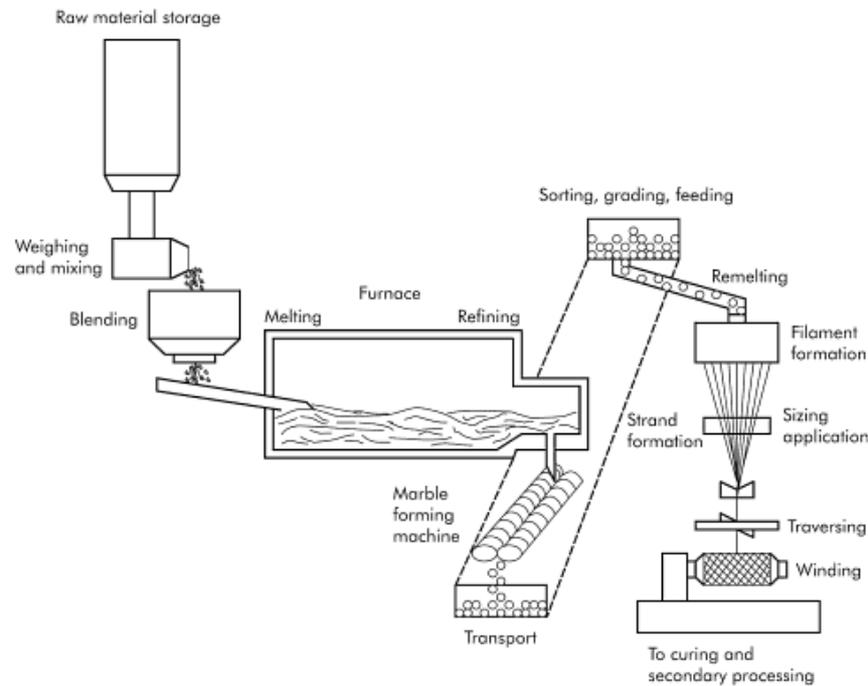
Tutti i vetri hanno una resistenza specifica molto alta sebbene le fibre di vetro siano, fra le fibre inorganiche sintetiche, a densità più alta. È possibile trafilare molti tipi di vetro di varie composizioni in filamenti continui. Il filamento è una fibra individuale ed ha lunghezza indefinita.

Le fibre di vetro devono essere necessariamente trattate con un "appretto" (o "sizing"), composto chimico costituito da silani, dopo la filatura.

L'appretto ha tre funzioni:

- agisce come lubrificante;
- protegge il filamento dall'abrasione e la corrosione;
- provvede a migliorare l'interfaccia fra vetro inorganico e resina organica.

Dopo questa operazione i filamenti vengono uniti in un fascio detto "strand" che a sua volta viene fatto passare in un avvolgitore formandone una bobina. Al termine di questa operazione viene posto in un forno per rimuovere il solvente o l'acqua associata con l'applicazione dell'appretto .



*Figura 5.1 - Rappresentazione schematica del processo di produzione di fibra di vetro.*

### **5.1.2. Fibre di carbonio**

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

Le elevate proprietà meccaniche delle fibre di carbonio derivano dalla particolare struttura cristallina della grafite. Quanto più si riesce ad ottenere una valida struttura cristallina, tanto più si ottiene un materiale dalle caratteristiche notevoli. Un cristallo di grafite, Figura 5.2, ha una struttura composta da strati sovrapposti di piani costituiti da atomi di carbonio. I legami fra gli stessi atomi dello stesso piano sono forti (legami covalenti) mentre quelli fra atomi di piani differenti sono relativamente deboli (legami Van der Waals): è evidente come i cristalli siano strutture fortemente anisotrope e sarà compito del processo di fabbricazione disporre la struttura cristallina nella direzione voluta. Naturalmente ciò non è facile e praticamente non si riesce mai ad ottenere cristalli perfetti e precisione di orientamento per cui le caratteristiche meccaniche risultanti saranno più basse di quelle teoriche.

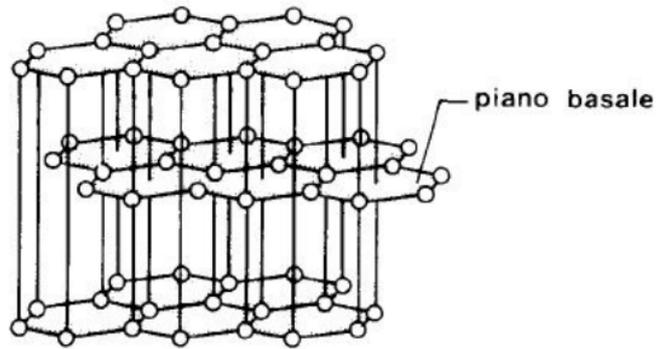


Figura 5.2 – Rappresentazione di un cristallo di grafite.

Le fibre di carbonio sono le più diffuse grazie alle loro eccellenti caratteristiche:

- bassa densità
- elevata resistenza
- elevato modulo di Young
- elevata disponibilità
- buon rapporto costo-efficacia

Esistono due tipi di fibre di carbonio: fibre HS e fibre HM.

- Le **fibre HS** ("High strength"), sviluppate da più tempo, corrispondono alla varietà a massima resistenza a trazione in quanto hanno una elevata resistenza, dato che  $\sigma^*_f = \sim 3,5$  GPa ma più basso modulo elastico (comunque elevato rispetto a molti altri materiali, dato che  $E_f = \sim 230$  GPa, in direzione longitudinale).

Queste fibre nascono dal trattamento di fibre di poliacrilonitrile (PAN), che consiste in una prima ossidazione sotto stiro e in una riduzione ad alta temperatura. L'ossidazione comporta la trasformazione del gruppo laterale nitrilico in una struttura ciclica; si forma così un polimero composto da una catena di anelli, non più flessibile (Figura 5.3). Gli anelli a base di carbonio, con azoto, vengono trasformati nella seconda fase di riduzione (tra 1000 e 1800°C), in anelli grafitici più o meno regolari. Per riduzioni a temperature relativamente basse le fibre contengono fogli di grafite non perfettamente paralleli, ma arrotolati.

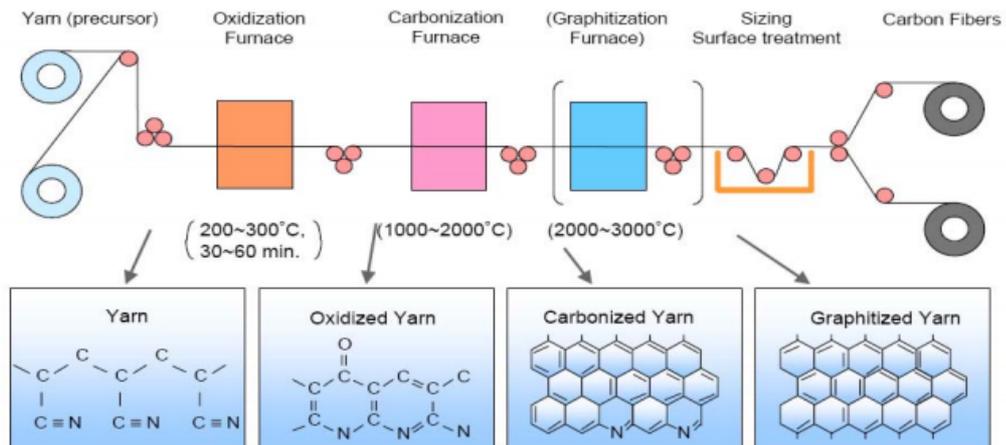


Figura 5.3 - Schema di produzione della fibra di carbonio da PAN.

- Le fibre **HM** (High Modulus) sono caratterizzate da modulo di Young elevato:  $E = 300-500$  GPa. Il modulo elastico, molto più elevato rispetto le fibre HS, si ottiene partendo sempre da fibre di poliacrilonitrile (PAN) ma con riduzioni a temperature via via più alte, ottenendo strutture grafittiche più regolari con piani grafittici pressoché paralleli tra loro e rispetto all'asse delle fibre stesse. Tale vantaggio si paga però con una resistenza meccanica molto più bassa ( $\sigma^* < 2,5$  GPa).

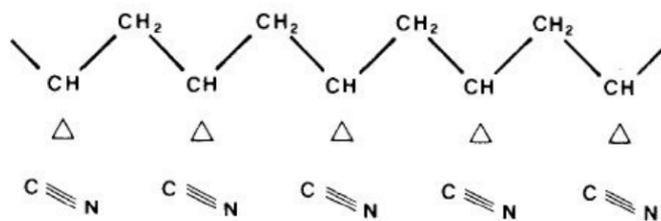


Figura 5.4 - Struttura del poliacrilonitrile.

Nelle applicazioni in cui conta di più la resistenza è opportuno usare fibre del primo tipo; il secondo tipo è utile nelle applicazioni in cui conta di più la rigidità. In tutti i casi si tratta di fibre leggere (la densità non supera i  $2 \text{ g/cm}^3$ ) caratterizzate da una forte anisotropia (il modulo elastico trasversale è dal 3 al 10% del modulo elastico longitudinale). Il diametro tipico va dai 7 ai  $10 \mu\text{m}$ .

Recentemente è iniziata la produzione di **fibre di carbonio derivanti dalla pece di petrolio**. Le pece contengono idrocarburi con strutture policicliche. Riscaldate sopra 350°C, le pece danno luogo a macromolecole che tendono ad allinearsi tra loro; dopo la filatura delle pece, l'allineamento delle macromolecole migliora, e si può realizzare di nuovo una struttura rigida per ossidazione. Infine un trattamento termico secondario a circa 2000°C determina la grafittizzazione definitiva, ossia una disposizione ordinata degli atomi, simile a quella della grafite.

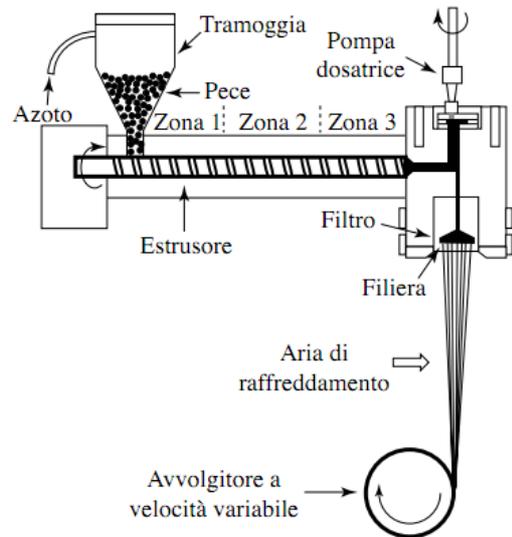


Figura 5.5 - Schema di produzione della fibra di carbonio da pece di petrolio.

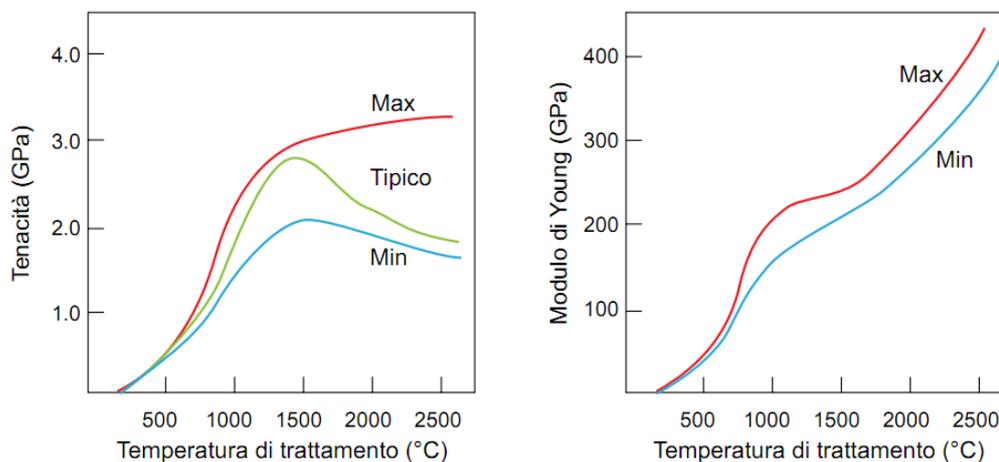


Figura 5.6 – Dipendenza delle proprietà delle fibre di carbonio dalla temperatura di trattamento.

In seguito vengono sintetizzate le più importanti proprietà delle fibre di carbonio prodotte da PAN e da pece.

#### **Fibre di PAN**

- modulo elastico:  $E = 230-540 \text{ GPa}$
- densità:  $\rho = 1,75-1,95 \text{ g/cm}^3$
- $E/\rho = 130-300$
- tensione di rottura:  $\sigma_R = 1,8-7,0 \text{ GPa}$
- allungamento a rottura:  $\varepsilon = 0,4-2,4\%$
- costo basso

#### **Fibre derivate da pece**

- modulo elastico:  $E = 140-820 \text{ GPa}$
- densità:  $\rho = 2,0-2,2 \text{ g/cm}^3$
- $E/\rho = 67-390$
- tensione di rottura:  $\sigma_R = 1,4-3,0 \text{ GPa}$
- allungamento a rottura:  $\varepsilon = 0,2-1,3\%$
- costo basso

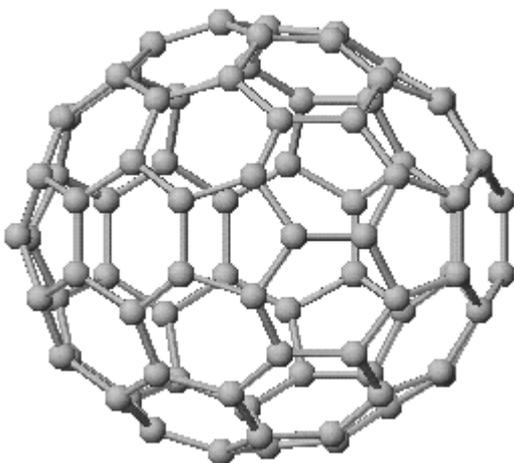
### **5.1.3. I nanotubi in carbonio (CNT)**

I nanotubi di carbonio possono essere considerati come una particolare varietà di fibre di carbonio. In questo caso i fogli di grafite sono disposti non su un piano, ma a definire superfici tubolari.

Le notevoli proprietà meccaniche esibite da nanotubi di carbonio hanno stimolato molto interesse per il loro utilizzo nel rafforzare compositi avanzati. La loro scoperta risale a qualche decennio fa quando un ricercatore giapponese ne ha osservato la presenza di tra i prodotti secondari della produzione di fullereni. Grazie alle loro eccellenti proprietà, ed essendo stati scoperti recentemente (1991) i nanotubi di carbonio CNT sono stati etichettati come materiali "del XXI secolo". Di recente, i CNT sono stati considerati per l'impiego come rinforzi in materiali compositi avanzati in vista del loro alto modulo elastico e resistenza rispetto alle fibre attuali. E' estremamente difficile dare una definizione precisa dei nanotubi di carbonio, soprattutto a causa dell'enorme varietà di taglie e conformazioni che essi possono avere. In generale è possibile dividere i nanotubi in due grandi famiglie :

- **nanotubi a parete singola** (single-walled nanotubes, o **SWNT**): possono essere considerati, per conformazione e struttura, come degli appartenenti alla famiglia dei fullereni;
- **nanotubi a parete multipla** (multi-walled nanotubes, o **MWNT**): sono più prossimi alla famiglia dei nanofilamenti, di cui rappresentano un caso particolare.

Per meglio comprendere la natura e le caratteristiche dei nanotubi è quindi necessario chiarire cosa si intenda per "fullereni" e "nanofilamenti".



**Figura 5.7 – Fullerene  $C_{60}$  "Buckyball".**

I *fullereni* sono delle "gabbie" approssimativamente sferiche formate da un arrangiamento ordinato di strutture esagonali e pentagonali di atomi di carbonio. La quantità di poligoni presenti e la loro relativa proporzione determinano la forma e le dimensioni del fullerene. Il primo fullerene scoperto è il  $C_{60}$  (Figura 5.7), che ha la stessa forma di un pallone da calcio, ed è per questo conosciuto anche col nome di "buckyball". Questa famiglia di composti ha preso il nome di "fullereni" in onore dell'architetto Richard Buckminster-Fuller, le cui creazioni ricordano la struttura dei fullereni.

I fullereni vengono prodotti artificialmente con un sistema di vaporizzazione del carbonio ad alta temperatura.

Le *nanofibre*, o *nanofilamenti*, sono delle strutture fibrose il cui diametro è compreso tra qualche decina e qualche centinaio di nanometri. Queste fibre possono avere strutture molto differenti, spaziando dai "graphite whiskers", costituiti da uno strato di grafite arrotolato più volte su se stesso, fino alle fibre "platelet", costituite da strati di grafite perpendicolari all'asse della fibra.

#### 5.1.3.1. Nanotubi a parete singola - SWNT

I primi SWNT sono stati prodotti nel 1993 per mezzo di un sistema ad arco elettrico con elettrodi composti da una miscela carbone-cobalto. Un SWNT ideale può essere descritto come un tubo in carbonio formato da uno strato di grafite arrotolato su sé stesso a formare un cilindro, chiuso alle due estremità da due calotte emisferiche (Figura 5.8). Il corpo del nanotubo è formato da soli esagoni, mentre le strutture di chiusura (le sue semisfere) sono formate da esagoni e pentagoni, come i normali fullereni. Per questa ragione i SWNT possono essere considerati come una sorta di "fullereni giganti", e sono per questo motivo chiamati anche "buckytubes".

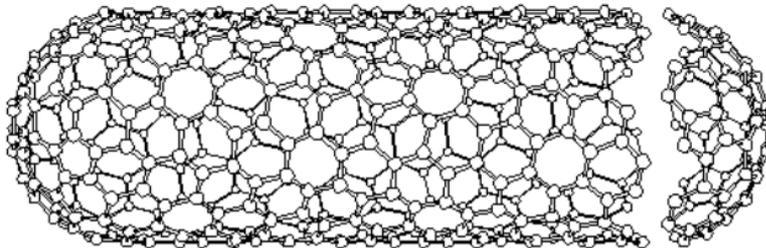


Figura 5.8 – SWNT ideale, chiuso alle estremità da due semi-fullereni.

Nella realtà i nanotubi presentano spesso dei difetti strutturali o delle imperfezioni nella struttura geometrica (ad esempio la presenza di strutture pentagonali o ettagonali nel corpo del tubo) che deformano il cilindro. Il diametro di un SWNT è compreso tra un minimo di 0,7 nm (corrispondente al doppio della distanza interplanare della grafite) e un massimo di 10 nm.

L'elevatissimo rapporto ( $10^4 - 10^5$ ) tra lunghezza e diametro dei SWNT consente di considerarli come delle nanostrutture virtualmente monodimensionali.

Ogni SWNT è caratterizzato dal suo diametro e dal suo "vettore chirale" (n,n) o "elicità", cioè dalla direzione di arrotolamento della grafite in rapporto all'asse del tubo (Figura 5.9).

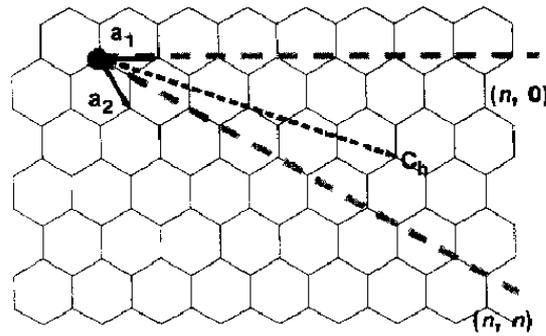


Figura 5.9 – Strato di grafite con le possibili direzioni di arrotolamento  $(n,n)$ .

### 5.1.3.2. Nanotubi a parete multipla - MWNT

I MWNT sono nanotubi formati da più SWNT concentrici, e vengono perciò chiamati nanotubi "a parete multipla". Possono essere presenti dei legami tra le varie pareti che stabilizzano la crescita di questi nanotubi (Figura 5.10).

Il diametro dei MWNT è di norma maggiore di quello dei SWNT, e cresce con il numero di pareti, potendo arrivare fino a qualche decina di nanometri. Il confine tra i nanotubi a pareti

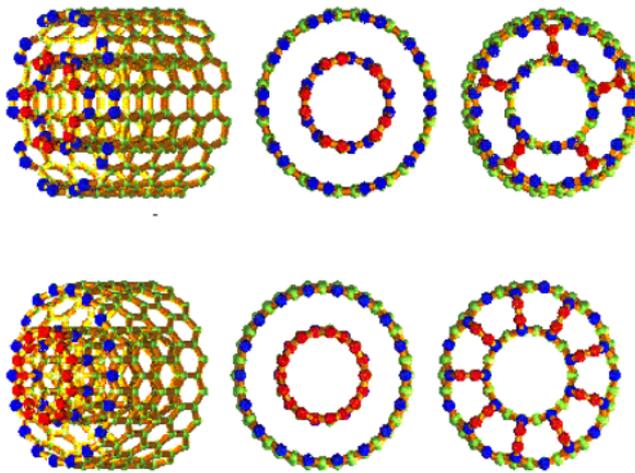


Figura 5.10 – Double Wall Nanotube con e senza interazioni tra le pareti.

multiple e i nanofilamenti non è molto ben definito e un MWNT di grandi dimensioni può essere considerato come un caso particolare di fibra tubolare. L'eventuale presenza di un grande numero di difetti strutturali o di interazioni tra pareti all'interno del tubo rende ancora più

labile questa separazione.

I MWNT hanno spesso un grande numero di imperfezioni nella loro struttura, e mostrano un'estrema varietà di forme nella loro zona terminale.

### 5.1.3.3. Resistenza meccanica

La resistenza meccanica dei nanotubi dipende da numerosi fattori, tra i quali i più importanti sono la forza dei legami e l'assenza di difetti strutturali nel reticolo cristallino. La presenza di difetti gioca un ruolo fondamentale nei processi di rottura per trazione.

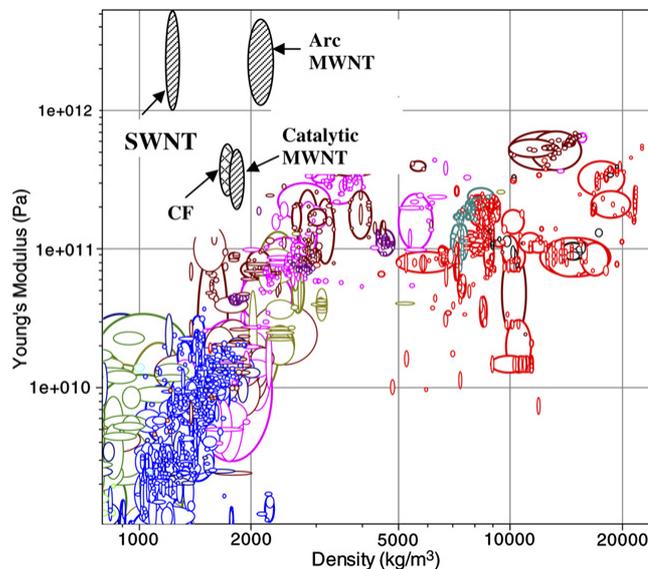
Per portare a rottura un nanotubo privo di difetti occorre quindi spezzare tutti i legami covalenti carbonio-carbonio che lo compongono. Dato che questi legami sono i più forti conosciuti in natura, ne consegue che i nanotubi dovrebbero avere una resistenza meccanica elevatissima.

Una fibra costituita da nanotubi di carbonio sarebbe quindi non solamente la più resistente mai fatta, ma addirittura la più resistente che sia possibile fare. Nella realtà la presenza di difetti diminuisce enormemente la forza necessaria a rompere il provino.

E' stato calcolato che il modulo di Young teorico di un nanotubo possa arrivare oltre 2 TPa, e la sua resistenza a trazione dovrebbe essere di circa 150 GPa (più di 100 volte più grande di quella dell'acciaio, ma a fronte di un peso 6 volte minore). Tuttavia risulta molto difficile effettuare questo tipo di misurazioni per le dimensioni nanometriche di tali elementi, quindi è spesso necessario ricorrere a delle simulazioni a computer, inserendo però delle approssimazioni nei modelli teorici utilizzati nella simulazione. I nanotubi non sono solo estremamente resistenti alla rottura per trazione, ma anche molto flessibili, e possono essere piegati ripetutamente fino a circa 90° senza rompersi o danneggiarsi.

L'estrema resistenza dei nanotubi, unita alla loro flessibilità, li renderebbe ideali per l'uso come fibre di rinforzo nei materiali compositi ad alte prestazioni, in sostituzione alle normali fibre in carbonio, al Kevlar o alle fibre di vetro.

Queste enormi potenzialità sono però contrastate dal problema tecnologico della costruzione di tali fibre.



*Figura 5.11 – Modulo elastico vs densità per vari materiali ingegneristici.  
Sul grafico sono evidenziati fibre di carbonio (CF), SWNT e MWNT.*

La Figura 5.11 mostra che i nanotubi (SWNT e MWNT) occupano una regione nel grafico che non è precedentemente occupata da nessun altro materiale; combinando peso ridotto e ad alto modulo.

La rigidità specifica, essendo spesso una proprietà di elevata importanza nelle applicazioni per le quali i materiali compositi sono utilizzati, è rappresentata contro il prezzo nella Figura 5.12. Con la loro alta rigidità specifica e prezzo molto alto, i CNT occupano la parte superiore destra del grafico.

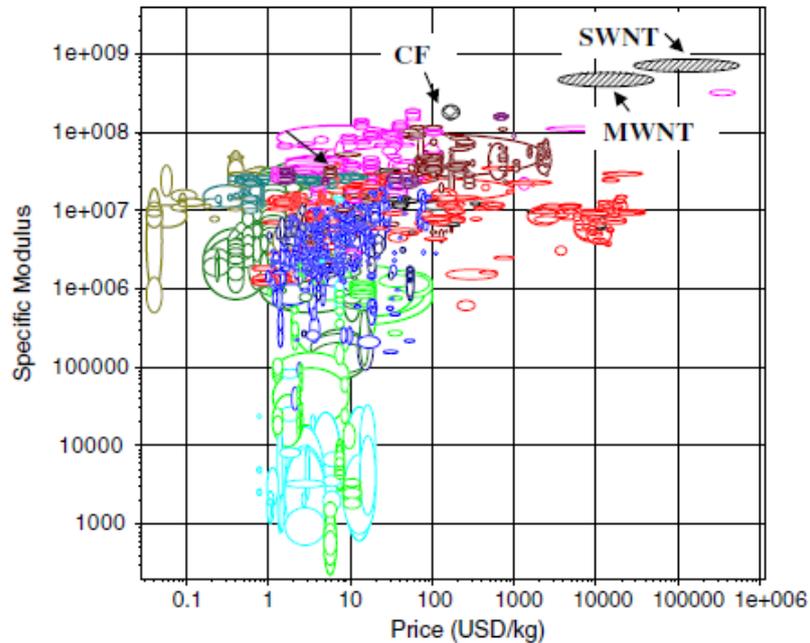


Figura 5.12 – Rigidità specifica vs prezzo per vari materiali ingegneristici.  
Sul grafico sono evidenziati fibre di carbonio (CF), SWNT e MWNT.

#### 5.1.3.4. Metodi di sintesi

I nanotubi possono essere prodotti principalmente utilizzando tre diverse tecniche, due delle quali si basano sulla vaporizzazione di un blocco di grafite (e quindi lavorano ad altissima temperatura) e una invece sulla decomposizione di un gas.

Tutti questi metodi richiedono la contemporanea presenza di una sorgente di carbonio e un catalizzatore metallico. I nanotubi prodotti con le seguenti tre tecniche sono orientati in modo casuale.

- 1) **Arco elettrico** : è la tecnica classica utilizzata per la produzione dei nanotubi, ed è molto simile a quella utilizzata per la sintesi dei fullereni. Nella camera di reazione (Figura 5.13) vi sono due elettrodi (catodo e anodo) in grafite, tra i quali si applica una differenza di potenziale di circa 20 V. Uno dei due elettrodi è parzialmente coperto con un metallo in polvere che ha la funzione di catalizzatore della formazione di nanotubi (cobalto Co, ferro Fe o nichel Ni). La camera di reazione viene riempita di gas inerte e successivamente posta sotto vuoto controllato. In seguito si avvicinano tra loro i due elettrodi, fino ad avere una scarica elettrica di 50-200 ampere. La temperatura tra i due elettrodi raggiunge i 4000°C, e questa temperatura elevata causa la sublimazione di una parte del carbonio dell'anodo.

Il carbonio così sublimato si deposita sulle pareti del reattore e sull'elettrodo stesso, formando una sorta di "ragnatela". Il carbonio ottenuto secondo questo metodo presenta una grande varietà di morfologie, tra cui appunto quella dei nanotubi.

Cambiando le condizioni di reazione (quantità e tipo di catalizzatore, intensità di corrente, presenza di gas inerte ecc.) è possibile spingere la reazione verso le morfologie desiderate.

I primi nanotubi prodotti secondo questo metodo erano dei MWNT, ma oggi si arriva a produrre abbastanza selettivamente dei SWNT di piccola

taglia (0,7-1,6 nm di diametro) e piuttosto omogenei in dimensione. Questi nanotubi non sono comunque mai puri, ma mescolati con svariate altre forme di carbonio, come la grafite, i fullereni e lo "sporco di carbonio" (carbon soot).

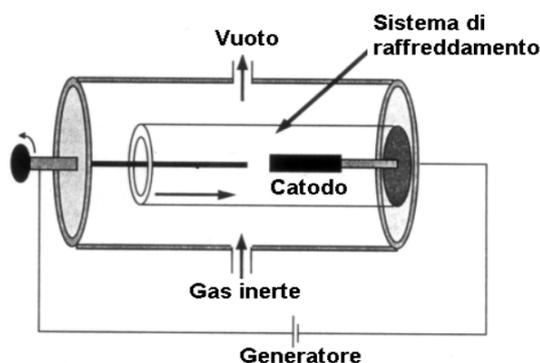


Figura 5.13 – Schema di un arco elettrico per la produzione di nanotubi.

- 2) **Vaporizzazione laser:** questo metodo è una variazione di quello ad arco elettrico nel quale la miscela di carbonio e metallo è vaporizzata tramite un laser a 1200°C (Figura 5.14). La vaporizzazione laser dà percentuali molto più elevate (fino al 70-90%) e una migliore qualità di nanotubi rispetto al sistema ad arco elettrico.

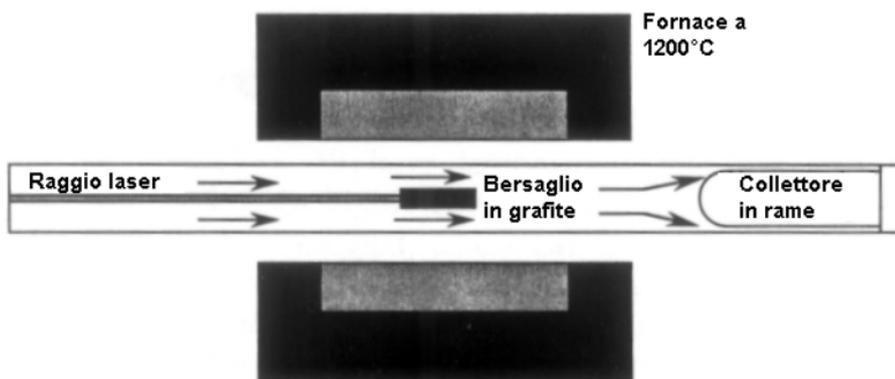


Figura 5.14 – Schema di un sistema vaporizzazione laser per la produzione di nanotubi.

- 3) **CVD (Chemical Vapour Deposition):** è il solo metodo continuo (o semi-continuo) per la produzione di nanotubi, quindi il più interessante per le possibili applicazioni a livello industriale. E' il metodo più comune e consiste nella decomposizione di un gas contenente carbonio (idrocarburi, CO, ecc) su un catalizzatore metallico come Ni, Fe o Co finemente disperso; produce MWCNT. Una variante della CVD è il CVD potenziato con plasma

(PECVD) in grado di produrre file allineate di tubi con diametro e lunghezza controllati, ma è più costoso. Questi nanotubi sono più economici, hanno una maggiore purezza (% nanotubi) e possono essere prodotti in quantità elevate (chilogrammi), ma, a causa della presenza di difetti, le loro proprietà sono molto più basse rispetto a quelli prodotti con arco elettrico.

#### **5.1.3.5. Problemi di fabbricazione dei compositi con CNT e compositi ibridi (CNT+CF)**

Molti sforzi sono stati fatti nel processo di incorporazione dei nanotubi in matrici polimeriche. Nonostante l'enorme interesse verso i CNT come potenziali rinforzi per materiali compositi a basso peso strutturale, le loro prestazioni finora sono state insoddisfacenti. Ciò è attribuito a quattro questioni:

1. la difficoltà di disperdere i nanotubi di carbonio nella matrice a causa del fatto che essi tendono a rimanere “incollati” tra di loro;
2. solo piccole quantità di nanotubi di carbonio (1-5% in peso) sono stati utilizzati fino ad ora;
3. incollaggio insufficiente tra nanotubi e matrice del composito dovuta probabilmente alla lunghezza dei CNT;
4. la difficoltà di allineare i nanotubi all'interno della matrice.

Anche se tali questioni non sono ancora state risolte, grandi sforzi vengono fatti quotidianamente per superarle. Per esempio, è stato sperimentato che estrudendo il composito in un film sottile e modellando il film prima di raffreddarlo, si può raggiungere l'allineamento dei nanotubi di carbonio in una matrice polimerica. Il problema della dispersione è stato superato in qualche misura con una sospensione di nanotubi in un solvente. A seconda della matrice, solventi diversi sono stati usati per disperdere i nanotubi.

Per esempio, acetone e metanolo sono stati utilizzati per disperdere i CNT in compositi a base di resina epossidica. Tuttavia, è stato osservato che i solventi influenzano le prestazioni meccaniche del composito e quindi dovranno essere studiate altre tecniche migliori. I nanotubi di carbonio devono affrontare quindi diverse sfide, che devono essere superate per poterli utilizzare ampiamente.

#### **5.1.3.6. Lunghezza dei CNT**

I nanotubi disponibili in commercio sono lunghi di solito da 0,5 a 5  $\mu\text{m}$ . Nella progettazione dei compositi convenzionali, è ben noto che la lunghezza della fibra ha una grande influenza sull'efficacia del rinforzo della matrice. Per un efficace trasferimento di carico, la lunghezza delle fibre deve superare una certa critica lunghezza  $l_c$  (Paragrafo 3.3.2.).

Se la lunghezza della fibra è inferiore alla lunghezza critica  $l_c$ , le fibre non aderiscono efficacemente alla matrice e di conseguenza potranno scivolare. Sono state effettuate indagini sperimentali sull'effetto della lunghezza dei MWNT e sul miglioramento delle proprietà meccaniche ed elettriche dei nanocompositi.

La Tabella 5.2 fornisce stime della lunghezza critica, calcolate con l'Equazione 3.6, sulla base della tensione di taglio all'interfaccia misurata per mezzo di esperimenti su MWNT in una matrice polimerica.

La lunghezza dei nanotubi disponibili in commercio varia da circa 100 nm a diversi micron, a seconda del processo di crescita. Confrontando i valori effettivi con le lunghezze critiche calcolate in Tabella 5.2, si vede che sono necessari nanotubi più lunghi di quelli attualmente in commercio per un effettivo rafforzamento e irrigidimento dei compositi.

Diametro nanotubi (nm)	Tensione di taglio all'interfaccia (MPa)	Lunghezza critica* ( $\mu\text{m}$ )
30	90	10–25
70	20	105–260
90	40	67,5–170
130	18	217–540

\*Valore dipendente dalla tensione di rottura dei nanotubi ( $\sigma_f = 60\text{--}150$  GPa).

*Tabella 5.2 – Lunghezza critica al variare del diametro dei nanotubi.*

### 5.1.3.7. Costo dei CNT

Fino ad ora, non è chiaro quali siano i CNT ideali e le relative proprietà, in quanto queste dipendono dalla matrice e dall'applicazione. Uno degli ostacoli principali a utilizzare i CNT è il costo. In generale, le tecniche di sintesi utilizzate per la fabbricazione dei nanotubi sono molto costose. Nanotubi di carbonio di alta qualità ed elevata purezza attualmente costano 550 €/g mentre quelli con i difetti e impurità (catalizzatore metallico e carbonio amorfo) costano 5-25€/g. Nuove ed efficienti tecniche di produzione sono necessarie se si vuole estendere l'uso dei nanotubi di carbonio in svariate applicazioni a costi relativamente contenuti. I metodi di sintesi ad arco elettrico e vaporizzazione laser rendono elevato il costo dei compositi a base di nanotubi. La deposizione chimica di vapore invece è la miglior tecnica per produrre elevate quantità di nanotubi essendo un processo continuo. Inoltre, questo processo tende a produrre nanotubi con un minor numero di impurità (particelle di catalizzatore, carbonio amorfo) rispetto ad altre tecniche.

#### **5.1.4. Fibre Aramidiche (Kevlar):**

Kevlar è il nome commerciale di una fibra ad alta resistenza meccanica. Il Kevlar è una fibra organica costituita dalle fibre aramidiche, ovvero da poliammidi formate dalla reazione di un acido bicarbossilico e di una diammina contenenti, al loro interno, anelli benzenici. Le catene con anelli benzenici conferiscono una grande stabilità termica, e soprattutto, una grande rigidità: anche disciolte in solvente le catene polimeriche rimangono allineate (si ottiene un "cristallo liquido"). Il Kevlar è disponibile in due versioni: Kevlar 49 utilizzato come rinforzo di materiali compositi e Kevlar 29 adatto per uso balistico.

Fibre ricavate dalla filatura del Kevlar sono appunto note per le eccezionali rigidità e resistenza specifiche. Difatti, tale polimero gode di interazioni intermolecolari significative: dato che le catene sono molto regolari e molto ben allineate si formano molti ponti a idrogeno. Tale legame è di per sé debole, ma diventa significativo allorché viene replicato molte volte. Rispetto al carbonio questa fibra è caratterizzata da maggior allungamento a rottura, superiore carico di rottura e scarsa resistenza alla compressione. Hanno un modulo elastico più alto delle fibre di vetro ma più basso delle fibre di carbonio; i compositi in aramidica sono da 2 a 4 volte più tenaci dei compositi in carbonio.

Prove effettuate su provini formati da fibra aramidica unidirezionale e resina epossidica, testati nella direzione 0° delle fibre, presentano una curva di cedimento lineare a trazione fino al carico di rottura; mentre il comportamento a compressione risulta elastico con bassi carichi di sollecitazione, e più duttile o quasi plastico con carichi maggiori. Questo comportamento si traduce in una maggior resistenza agli urti. La rottura non è fragile come quella delle fibre di vetro e carbonio. Si spezzano in una serie di fibrille, che sono parti di macromolecola orientate nella stessa direzione della fibra. Queste piccole fratture assorbono molta più energia e quindi si ha un aumento di tenacità.

Le fibre di Kevlar possono avere problemi in compressione, giacché si assiste ad una inflessione non solo delle fibre, ma anche delle catene polimeriche al loro interno, con rottura dei ponti a idrogeno. La bassa resistenza a compressione delle fibre aramidiche in alcuni casi si rivela una garanzia per prevenire la rottura catastrofica, tipica delle fibre di carbonio. Sollecitando un provino a flessione, l'asse neutro si sposta gradualmente dal centro verso la zona in trazione, interessando così a compressione un'area maggiore e si arriva ad un progressivo cedimento della zona compressa, pertanto non avviene una rottura catastrofica. Se si inverte la sollecitazione, facendo lavorare a trazione la parte che ha ceduto in compressione, si ottiene ancora una resistenza a flessione con valori di circa il 70% di quelli ottenuti nella prima prova.

La scarsa resistenza alla compressione può essere migliorata utilizzando tessuti ibridi, ovvero realizzati con fibre sia di carbonio che di Kevlar, per compensare i difetti di entrambe. In ogni modo la fibra aramidica è più adatta per manufatti soggetti a flessioni o impatti.

Per le strutture che debbono accomunare rigidità ed elevata resistenza agli urti, come le racchette da tennis, si ricorre a tessuti ibridi carbonio/aramidica, che sono disponibili in una vasta gamma di composizioni, ed anche con diverso rapporto delle fibre. Un'altra caratteristica delle fibre aramidiche è la capacità di smorzamento delle vibrazioni.

Le principali caratteristiche del Kevlar 49 sono:

- modulo elastico:  $E=130$  GPa
- densità:  $\rho =1,45$  g/cm<sup>3</sup>
- $E/\rho = 90$
- tensione di rottura:  $\sigma_R =3,6$  GPa
- allungamento a rottura:  $\varepsilon = 2,3\%$
- costo elevato

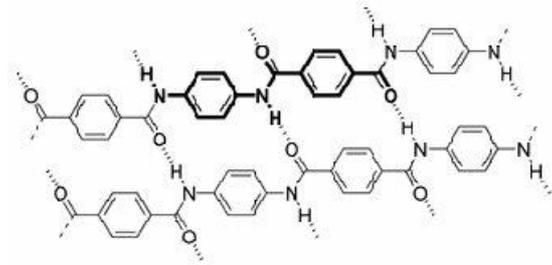


Figura 5.15 – Struttura del Kevlar

### **5.1.5. Le fibre di titanio**

Le fibre di titanio sono ottenute dalla fusione ad alte temperature di titanio unito ad altri minerali. La massa fusa viene fatta passare attraverso una filiera in platino con numerosi fori; all'uscita la fibra viene stirata fino a raggiungere il diametro desiderato e subito raffreddata. Le singole bave vengono poi raggruppate per formare il roving ( o filato) . Possiedono maggiori prestazioni meccaniche in confronto alle fibre di vetro. Spesso vengono aggiunte in limitate quantità ai compositi in fibra di carbonio per aumentare le proprietà meccaniche del telaio.

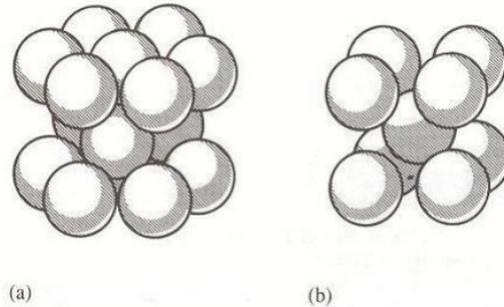
Il titanio è un metallo che allo stato puro ha importanti proprietà: tra le caratteristiche meccaniche si ricordano l'ottima resistenza a trazione, l'ottimo rapporto resistenza/peso, la buona resistenza a fatica, l'allungamento a rottura del 10%, la scarsa duttilità, il modulo di elasticità non molto elevato.

Il titanio presenta pesanti difficoltà estrattive, che derivano essenzialmente dalla sua grande affinità con elementi molto diffusi nell'aria quali idrogeno, ossigeno e azoto, dando origine a soluzioni solide molto stabili e caratterizzate da elevata durezza e fragilità. Il costo risulta quindi elevato. A temperatura ambiente, il titanio presenta una struttura esagonale compatta (hcp) chiamata  $\alpha$ , che si trasforma in fase  $\beta$ , cubica a corpo centrato (ccc), sopra la temperatura di 882,5°C (Figura 5.16).



Figura 5.17 – Filamenti di titanio intrecciati in tessuto in fibra di carbonio.

Il titanio è tra i più usati, ma bisogna tener presente che questo è un materiale “molto pesante” (più del doppio delle fibre di carbonio), per tale motivo non esistono racchette realizzate esclusivamente con questa fibra. Infatti, nelle racchette, la percentuale di titanio presente non supera mai e raramente arriva al 5% e viene usato insieme alle fibre di carbonio impiegandolo solo nei punti critici della racchetta, dove c'è maggiore possibilità di rottura. In questo modo si consente di diminuirne lo spessore con conseguente riduzione di peso, mantenendo comunque un'ottima potenza data dalla elevata rigidità del materiale.



**Figura 5.16 – a) Struttura esagonale compatta del Ti a T ambiente; b) Struttura cubica a corpo centrato a  $T > 882,5^{\circ}\text{C}$ .**

Le principali caratteristiche dei filamenti di titanio sono:

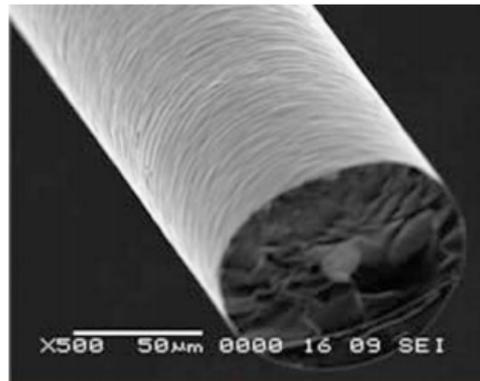
- modulo elastico:  $E=106 \text{ GPa}$
- densità:  $\rho = 4,4 \text{ g/cm}^3$
- $E/\rho = 24$
- tensione di rottura:  $\sigma_R = 895 \text{ MPa}$
- allungamento a rottura:  $\varepsilon = 10\%$
- costo elevato

## 5.2. Monofilamenti

### 5.2.1. Altri rinforzi usati nella produzione di racchette da tennis: fibre di boro, fibre di SiC, fibre di $Al_2O_3$ e filamenti di tungsteno

**Fibre di boro.** Le fibre di boro sono costituite da boro depositato mediante tecniche CVD (chemical vapor deposition) su fibre di tungsteno o di carbonio. Il boro è un metallo noto per i valori eccezionali di resistenza e modulo: infatti, sebbene sia molto leggero a livello di filamento possiede una resistenza tripla ed un modulo elastico doppio rispetto all'acciaio. Per produrre tali fibre, un filo di tungsteno (diametro 12 - 17  $\mu\text{m}$ ) reso incandescente, viene fatto passare in tubi di vetro dove i vapori di boro  $BCl_3$  riscaldati si decompongono e depositano una guaina di boro sul filo.

La struttura dei monofilamenti, ed in particolare la loro morfologia superficiale, possono essere variati con tecniche di processo opportunamente selezionate, influenzando così sia le proprietà meccaniche delle fibre che la loro adesione alla matrice. La superficie rugosa è un'ottima interfaccia per la resina nei compositi, per cui non è necessario applicare alcun rivestimento o pre-trattamento superficiale. Le fibre così ottenute vengono poi avvolte in bobine. Hanno grande diametro, compreso tra 80 e 140 $\mu\text{m}$  (Figura 5.18). Tra le fibre di rinforzo, il boro è inoltre l'unico ad avere eccezionale resistenza non solo a trazione, ma anche a compressione e flessione, unitamente ad alto modulo e bassa densità.



*Figura 5.18 – Fibra di boro vista al microscopio. Ingrandimento X500.*

Questo processo è costoso, sia per il prezzo del filo di tungsteno che per il scarso rendimento della deposizione. Si è quindi pensato di usare come substrato il meno costoso filo di carbonio; durante la deposizione, però, il boro subisce un notevole allungamento che porta a rottura il filamento di carbonio. Per ovviare a questo inconveniente si provvede a ricoprire il filo di carbonio con un sottile strato di grafite pirolitica in grado di posticipare la rottura e di proteggere dai danneggiamenti la ricopertura di boro.

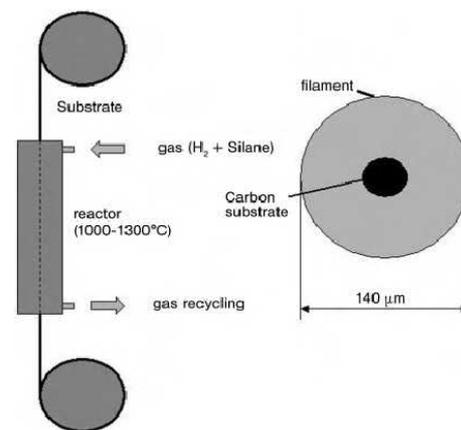
Le principali caratteristiche delle fibre di boro sono:

- modulo elastico:  $E=400$  GPa
- densità:  $\rho = 2,6$  g/cm<sup>3</sup>
- $E/\rho = 154$
- tensione di rottura:  $\sigma_R = 3,4$  GPa
- allungamento a rottura:  $\varepsilon = 1\%$
- costo altissimo

**Fibre di SiC.** Le fibre di carburo di silicio (SiC) possono essere ottenute sottoforma di fibre vere e proprie e di "monofilamenti". Le fibre vere e proprie derivano da un trattamento analogo a quello effettuato sul PAN per ottenere fibre di carbonio, partendo da polimeri particolari, ovvero da polycarbosilani o polititanocarbosilani, polimeri a catena Si-C, che vengono trasformati in fibre ceramiche attraverso

processi ad alta temperatura, in un'atmosfera di gas protettivo. Come nel caso del PAN non si ottiene una struttura regolare, anzi si riscontra un certo inquinamento di ossigeno, tanto che si trovano sì i cristalli di SiC, ma anche un pò di fase vetrosa. I monofilamenti derivano dalla reazione di composti gassosi di Si ( $\text{SiCl}_4$ ) e C (metano,  $\text{CH}_4$ ) su un substrato costituito da una fibra di carbonio; il prodotto è una fibra grossa del diametro dell'ordine di 100  $\mu\text{m}$ , ma a base di

solo SiC, a meno dell'interno. Il tutto avviene ad una temperatura di 1000-1300°C. Le fibre di SiC sono un'alternativa alle fibre di carbonio abbastanza generale.



*Figura 5.19 - Schema per la produzione di un monofilamento di SiC.*

Le principali caratteristiche delle fibre di SiC sono:

- modulo elastico:  $E=400$  GPa
- densità:  $\rho = 3,8$  g/cm<sup>3</sup>
- $E/\rho = 105$
- tensione di rottura:  $\sigma_R = 3,4$  GPa
- allungamento a rottura:  $\varepsilon = 0,6\%$
- costo elevato

**Fibre di allumina.** Le fibre di allumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e di alluminosilicati (mullitiche) sono sostanzialmente diverse dalle altre, dato che non si realizza una filatura dal fuso o da una soluzione, ma da sospensioni di particelle finissime di allumina e silice, con seguente trattamento termico di sinterizzazione. Il punto di forza di tali fibre è il fatto che possono essere applicate a caldo, in condizioni ossidanti, che mettono in crisi le fibre di carbonio (e in minor grado le fibre di SiC).

Le principali caratteristiche delle fibre di allumina sono:

- modulo elastico:  $E=380 \text{ GPa}$
- densità:  $\rho = 3,9 \text{ g/cm}^3$
- $E/\rho = 97$
- tensione di rottura:  $\sigma_R = 2 \text{ GPa}$
- allungamento a rottura:  $\varepsilon = 0,5\%$
- costo elevato



*Figura 5.20 – Fibre di allumina.*

**Filamenti di tungsteno.** Negli ultimi anni è stato realizzato un nuovo materiale costituito da fibre di carbonio intrecciate con filamenti di tungsteno. I filamenti di tungsteno migliorano le caratteristiche della racchetta in funzione della loro concentrazione nei punti strategici del telaio. Tale composito permette di ottenere una maggior rigidità torsionale, aumentando ancor di più il controllo della pallina.

Una maggiore concentrazione di tungsteno nel cuore della racchetta, assicura una restituzione di energia superiore del 10% e quindi maggiore potenza.

La tecnologia necessaria per la produzione dei filamenti è complicata in quanto, mentre un singolo cristallo di tungsteno ben sviluppato è duttile, un policristallo è molto fragile se non subisce speciali trattamenti. Per eliminare questo inconveniente il filo di tungsteno viene fatto passare in apposite macchine dove, in atmosfera di idrogeno (per evitare l'ossidazione del metallo), il filo viene sottoposto a un prolungato martellamento. La temperatura a cui avviene tale operazione varia da  $800^\circ\text{C}$  a  $1200^\circ\text{C}$  a seconda delle dimensioni del filo. Durante questi trattamenti i granuli originari si allungano secondo la direzione di trafilatura, comportandosi come delle quasi fibre. Il filo perde la sua fragilità e diventa omogeneo acquistando elevata tenacità e duttilità. In questo modo è possibile successivamente trafilare, attraverso delle filiere di diamante, anche fino a diametri estremamente piccoli ( $1 \mu\text{m}$ ). L'elevato costo dei filamenti di tungsteno è quindi dovuto non al prezzo della materia prima ma al costoso lavoro di preparazione.

Produzione:

Il tungsteno sotto forma di fili di diverso spessore è una delle applicazioni principali del metallo puro. Si possono identificare 5 fasi fondamentali nella produzione di un filo di tungsteno.

1. *Pressatura*: le polveri di tungsteno, a seguito di un attento controllo della granulometria, sono mischiate con un legante di origine polimerica. Mediante l'uso di opportune presse si ottiene una barra di tungsteno estremamente fragile, tenuta insieme dal legante e dalle deboli forze di interazione elettrostatica che si instaurano tra le particelle.

2. *Presinterizzazione*: la barra è posta in un contenitore di metallo refrattario e caricata in un forno con atmosfera controllata. Si ha quindi un trattamento termico tale da conferire una maggiore resistenza meccanica alla barra.

3. *Sinterizzazione*: la barra è caricata in un apposito contenitore metallico dotato di sistema di raffreddamento ad acqua. Una corrente elettrica viene fatta passare attraverso la barra generando calore e raggiungendo velocemente temperature molto alte. Si osserva una notevole crescita dei grani cristallini.

4. *Swaging*: a seguito della sinterizzazione, la barra di tungsteno ha una buona rigidità, ma è molto fragile a temperatura ambiente. Viene resa più malleabile portandola a temperatura di 1200-1500°C. A questa temperatura la barra viene fatta passare più volte attraverso un sistema che permette di martellare la barra, posta in un'opportuna sede, a circa 10000 colpi al minuto, quindi con frequenze molto alte. In questo modo viene ridotta la sezione di circa il 12% ogni passata. Questa procedura permette di allungare i cristalli, creando una struttura "fibrosa" e interconnessa. In questo modo si conferisce duttilità e resistenza meccanica al metallo finale. Segue quindi una ricottura per rilassare le tensioni accumulate.

5. *Trafilatura*: il filo viene ora trafilato. Viene quindi forzato a passare attraverso fenditure circolari a diametro sempre minore. Le trafilature sono in carburo di tungsteno o in diamante. Il processo di trafilatura allunga ulteriormente i grani cristallini e conferisce buona resistenza meccanica.



## CAPITOLO 6

### Selezione dei materiali con il metodo AHP

Per stabilire se un determinato materiale sia migliore o peggiore rispetto ad un altro, è necessaria l'adozione di criteri di decisione, i quali possono essere condivisi tutti o in parte dai materiali oggetto di analisi.

Per stabilire quale sia il miglior materiale da utilizzare per produrre il telaio delle racchette da tennis si effettua un processo di decisione multicriterio che nel seguito vedrà lo sviluppo e la conseguente applicazione di un sistema di selezione gerarchico.

Il passo fondamentale è quello di ottenere dei pesi per ciascun materiale in modo da poter stabilire il livello di importanza relativamente a ciascuno di essi, potendo così determinare qual è il materiale migliore in base alle richieste del giocatore. Nel seguito quindi spesso in luogo del termine "peso" si parlerà di "priorità" di un materiale rispetto ad un'altro in relazione al determinato obiettivo considerato.

Frequentemente in molte applicazioni vi è la necessità di classificare i numerosi obiettivi del processo relativamente ad un insieme di obiettivi posti ad un livello superiore, i quali a loro volta devono essere classificati sulla base di ulteriori obiettivi e così via fino a giungere ad un obiettivo unico posto al vertice della gerarchia.

Il sistema di misurazione che si utilizza, e permette di risolvere tali tipologie di problemi, prende il nome di Analytic Hierarchy Process (AHP), vale a dire un processo analitico gerarchico che permette di effettuare una decisione tra diverse alternative quando si è in presenza di criteri multipli.

Il metodo AHP può essere utilizzato per determinare il rapporto benefici/costi di un progetto quando non è possibile valutare in termini esclusivamente monetari i vantaggi e gli svantaggi che deriverebbero dalla sua realizzazione. Il metodo, in generale, consente di valutare le priorità di azioni che possono essere, a seconda dei casi: programmi, strategie d'intervento, piani, progetti, ecc.

Lo scopo dell'AHP è di raggiungere il successo degli obiettivi.

Per una migliore comprensione di tale metodo è bene descrivere la filosofia che è dietro a ciascuno dei tre concetti:

- Analytic: un metodo di decisione che utilizza dei ragionamenti logico-matematici può essere definito con il termine "Analitico". Analitico è una forma della parola analisi, che significa la separazione di un qualunque problema complesso in elementi costituenti/fondamentali.

L'analisi è l'opposto della sintesi, la quale combina le parti in un insieme.

In un certo senso, l'AHP dovrebbe in realtà essere chiamato il processo gerarchico di sintesi perché aiuta a misurare e sintetizzare il gran numero di fattori che entrano in gioco nelle decisioni complesse.

- **Hierarchy:** una gerarchia è un sistema che permette di classificare ed organizzare persone, cose, idee, e dove ciascun elemento del sistema gerarchico, fatta eccezione per l'elemento situato al livello più alto, è subordinato ad uno o più elementi.

L'utilizzo delle strutture gerarchiche permette di acquisire una conoscenza dettagliata di una realtà che appare complessa: il problema da analizzare può essere decomposto in "unità" più piccole le quali possono a loro volta essere suddivise in "unità" più piccole e così via fino al livello di dettaglio desiderato. Questo processo di decomposizione permette una migliore comprensione della realtà che si sta studiando.

La suddivisione è condivisa potenzialmente da tutti i sistemi complessi di cui abbiamo una conoscenza. La gerarchia è una forma di adattamento che un'intelligenza finita assume di fronte alla complessità.

- **Process:** un processo è una serie di azioni, modulazioni, o funzioni che portano ad un fine o ad un risultato. L'AHP è un processo che permette a chi prende le decisioni di arrivare alla soluzione che meglio soddisfa la moltitudine di obiettivi.

## 6.1. La nascita e lo sviluppo dell'AHP

Alla fine degli anni '70 Thomas Saaty, uno dei pionieri della Ricerca Operativa, dirigeva progetti di ricerca alla Disarmament Agency, presso il U.S. Department of State, e con lui collaboravano molti dei più importanti economisti dell'epoca e studiosi della teoria dei giochi.

Il problema che Saaty riscontrò durante questo periodo di collaborazione fu la difficoltà di comunicazione tra gli scienziati e gli avvocati che si occupavano dell'aspetto giuridico dei progetti. Egli constatò in particolare l'assenza di un approccio sistematico che permettesse di focalizzarsi sulle questioni più importanti del progetto analizzato e di poter arrivare a delle decisioni condivise.

Fu così che dopo alcuni anni, Saaty decise di sviluppare un processo analitico gerarchico che consentisse ad ogni individuo posto di fronte ad un problema complesso di prendere delle decisioni: nacque l'Analytic Hierarchy Process (AHP).

Così l'AHP divenne in poco tempo uno dei modelli decisionali più utilizzati negli Stati Uniti e nel resto del mondo. Molte implementazioni di AHP nacquero ed ebbero molto successo, tra queste l'American Society for Testing and Materials (ASTM) adottò l'Analytic Hierarchy

Process come modello per l'analisi di decisioni multi-attributo in relazione agli investimenti nel campo dell'edilizia.

A tutt'oggi esistono numerose decine di esempi di applicazione del metodo a problemi di valutazione nei settori più svariati.

## **6.2. La procedura dell'Analytic Hierarchy Process**

Il metodo dell'AHP si sviluppa in cinque fasi fondamentali:

1. Sviluppo della gerarchia;
2. Costruzione della matrice dei confronti a coppie;
3. Determinazione dei pesi locali relativi;
4. Analisi della consistenza dei giudizi;
5. Determinazione dei pesi globali: il principio di composizione gerarchica.

### **6.2.1. Sviluppo della gerarchia**

In questa prima fase dell'AHP il decisore analizza tutti gli aspetti del problema e successivamente lo struttura in una gerarchia composta da più livelli.

Una tale decomposizione del problema porta ad una sua notevole semplificazione e permette al decisore di concentrare la propria analisi su un numero ristretto di decisioni.

Il primo livello contiene l'obiettivo generale della valutazione: il materiale migliore da impiegare nella produzione della racchetta da tennis. Al secondo livello vi sono i principali fattori che influenzano la scelta del materiale (costi/benefici). Al livello ancora inferiore vi sono le caratteristiche del materiale che evidenziano i benefici (potenza/smorzamento) e i costi (costo del materiale). Infine alla base della gerarchia vi sono tutti i materiali presi in considerazione (Figura 6.1) e sono collegati direttamente alle proprietà del livello superiore.

La struttura gerarchica definita dal decisore dipenderà non solo dalla natura del problema, ma anche dalle informazioni in suo possesso, dai suoi giudizi, dalle sue opinioni e dalle sue volontà. È importante sottolineare che la struttura gerarchica non è rigida ma può essere modificata con l'aggiunta di criteri e sottocriteri in origine non considerati. Gli obiettivi possono essere aggiunti, tolti o modificati.

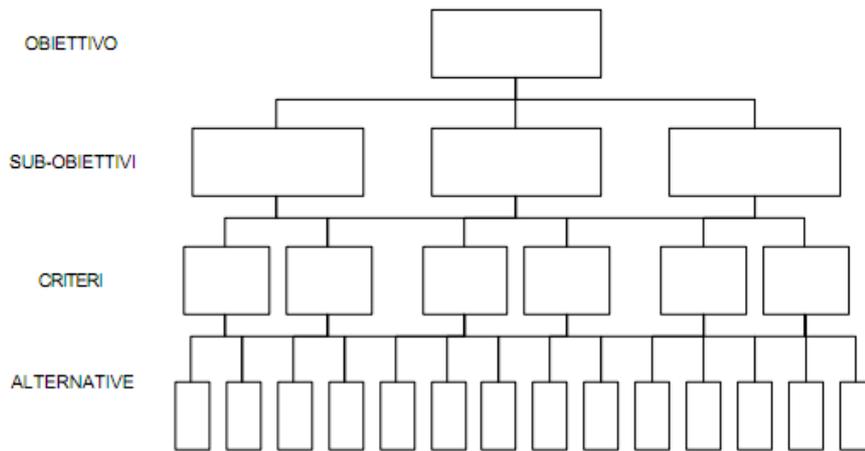


Figura 6.1 – Struttura gerarchica dell' AHP.

### **6.2.2. Costruzione della matrice dei confronti a coppie**

Questa fase consiste nell'individuare una stima dei pesi da associare a ciascuna proprietà dei materiali (costo, potenza, smorzamento delle vibrazioni) presente nel problema gerarchico, grazie all'utilizzo di una matrice di valutazione  $A$  i cui singoli elementi  $a_{ij}$  siano ottenuti da comparazioni a coppie delle proprietà del materiale:

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix}$$

Tale operazione viene ripetuta poi per fare un confronto a coppie tra i vari materiali in esame per ogni proprietà del livello gerarchico superiore. In questo caso avremo quindi 3 matrici:

1. matrice del confronto a coppie tra i materiali confrontando il loro costo;
2. matrice del confronto a coppie tra i materiali confrontando la loro rigidità specifica  $E/\rho$ , correlata alla potenza che la racchetta può "erogare";
3. matrice del confronto a coppie tra i materiali confrontando il loro modulo elastico  $E$ : minore è il modulo elastico maggiore è lo smorzamento delle vibrazioni;

La matrice dei confronti a coppie deve avere le seguenti caratteristiche:

- E' positiva, ciò equivale a dire che tutti i minori principali sono positivi, dove per minore principale si intende il determinante della sottomatrice quadrata formata dalle prime  $m$  righe e  $m$  colonne (con  $1 \leq m \leq n$ );

- E' reciproca avendo

$$a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}} \quad \forall i, j \quad (6.1)$$

e quindi gli elementi presenti sulla diagonale principale sono tutti unitari

$$a_{ii} = 1 \quad \forall i \quad (6.2)$$

Questa relazione di reciprocità scaturisce dalla necessità di garantire la simmetria dei giudizi di importanza.

- E' costituita da elementi finiti, infatti per ciascuna proprietà considerata si ha

$$a_{ij} \neq \infty \quad \forall i, j \quad (6.3)$$

Per poter ottenere i valori  $a_{ij}$  e costruire la matrice  $A$  delle stime dei rapporti  $w_i/w_j$ , Saaty propone l'utilizzo di una scala di valori denominata "Scala semantica di Saaty" e riportata nella Tabella 6.1.

<b>Scala dell'importanza relativa</b>		
<b>Intensità di importanza</b> $a_{ij}$	<b>Definizione</b>	<b>Spiegazione</b>
<b>1</b>	Uguale importanza	Due attività contribuiscono ugualmente all'obiettivo
<b>3</b>	Importanza debole di uno rispetto ad un altro	Leggermente favorita un'attività rispetto ad un'altra
<b>5</b>	Essenziale o forte importanza	L'esperienza e il giudizio fortemente favoriscono un'attività rispetto ad un'altra
<b>7</b>	Importanza molto forte	Un'attività è fortemente favorita e la sua dominanza dimostrata nella pratica
<b>9</b>	Importanza assoluta	L'evidenza dell'importanza di un'attività su di un'altra è del più alto ordine di affermazione
<b>2,4,6,8</b>	Valori intermedi tra due giudizi adiacenti	Quando è necessario un compromesso
<b>Valori reciproci non nulli</b>	Se un'attività $i$ assume uno dei valori sopra riportati quando è comparata con un'attività $j$ , allora quest'ultima attività assume un valore reciproco del precedente se comparata con l'attività $i$	

Tabella 6.1 - Scala semantica di Saaty.

### **6.2.3. Determinazione dei pesi locali relativi**

Una volta che si è ottenuta la matrice dei confronti a coppie  $A$  nel passo successivo del modello vengono stimati i pesi  $w_i$  da associare a ciascuna proprietà e a ciascun materiale. Per fare questo ogni elemento  $a_{ij}$  della matrice viene diviso per la somma di tutti gli elementi della colonna  $j$ :

$$w_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \quad (6.4)$$

In questo modo la somma dei valori degli elementi di una stessa colonna  $j$  sarà pari a 1.

Il peso dell' $i$ -esimo materiale è calcolato facendo la media degli  $n$  valori  $w_{ij}$  presenti nella riga  $i$ :

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij}}{n} \quad (6.5)$$

Quindi la matrice  $A$  può essere scritta nella forma

$$A = \begin{pmatrix} \frac{w_1}{w_1} & \frac{w_1}{w_2} & \dots & \frac{w_1}{w_n} \\ \frac{w_2}{w_1} & \frac{w_2}{w_2} & \dots & \frac{w_2}{w_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{w_n}{w_1} & \frac{w_n}{w_2} & \dots & \frac{w_n}{w_n} \end{pmatrix}$$

in cui la riga  $i$ -esima è ottenuta dal rapporto tra il peso associato al criterio  $i$  e i pesi associati agli altri criteri.

### **6.2.4. Analisi della consistenza dei giudizi**

Nella pratica il decisore non fornisce una matrice dei rapporti veri e propri tra i pesi delle proprietà, ma una matrice di stime di tali rapporti.

Nella maggioranza dei casi le stime fornite dal decisore non sono consistenti in quanto è difficile mantenere una coerenza di giudizio in tutti i confronti a coppie. Inoltre per

loro natura i giudizi espressi dal decisore possono essere strutturalmente non consistenti.

Obbligando il decisore ad essere perfettamente coerente nei suoi giudizi lo costringeremmo implicitamente a rispettare il principio di transitività della preferenza e dell'indifferenza che non dovrebbe mai essere imposto a priori.

In questa fase del processo si deve verificare se i pesi ottenuti nella fase precedente sono fedeli ai giudizi espressi dal decisore.

Va verificata se vi è una differenza tra i rapporti dei pesi  $w_i/w_j$  e le stime  $a_{ij}$  fornite dal decisore.

Se la decisione-processo produttivo sono perfettamente consistenti, ogni fattore di consistenza sarà uguale al numero di proprietà, che nel nostro caso è pari a 3 (costo, potenza e smorzamento), o al numero di materiali (12).

Per valutare se un'eventuale inconsistenza (fattore di consistenza  $\neq n$ ) è accettabile o meno si utilizzano l'indice di consistenza CI (Consistency Index) e il rapporto di consistenza CR (Consistency Ratio):

$$CI = \frac{\lambda - n}{n - 1} \quad (6.6)$$

L'indice di consistenza CI viene confrontato con l'indice RI (Random Index) ottenendo il rapporto di consistenza CR.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (6.7)$$

Dove:

- $\lambda$  è la media dei fattori di consistenza di tutte le proprietà (o materiali);
- $n$  è il numero di proprietà (o materiali);
- RI è un indice random il quale dipende dagli  $n$  fattori (Tabella 6.2)

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
R.I.	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.48	1.56	1.57	1.59

*Tabella 6.2 – Valori assunti da RI al variare di n.*

Se i giudizi messi nella matrice delle proprietà sono scelti casualmente, il valore RI dà la media dei valori di CI. Tali valori vengono ottenuti effettuando la media dei valori di CI di numerose matrici reciproche dello stesso ordine, i cui coefficienti vengono generati in modo casuale da un calcolatore. Se il processo è perfettamente consistente,  $\lambda = n$  e  $CR=0$ . Un valore dell'indice  $CR \leq 0,1$  è considerato ammissibile: infatti quando

il valore di  $CI$  della matrice compilata dall'esperto supera una soglia pari al 10% del valore di  $RI$ , la deviazione dalla condizione di consistenza è ritenuta inaccettabile.

Secondo Saaty un valore di  $CI$  superiore alla soglia denota scarsa coerenza e attenzione da parte del decisore che ha effettuato i confronti.

Il decisore dovrà sforzarsi ad aumentare la coerenza dei suoi giudizi modificando totalmente o almeno parzialmente i valori  $a_{ij}$ .

#### **6.2.5. Determinazione dei pesi globali: il principio di composizione gerarchica**

Il passo finale consiste nel calcolare i pesi globali (o priorità) delle azioni applicando il principio di composizione gerarchica.

Per determinare l'importanza di ogni materiale in rapporto al problema iniziale occorre applicare il principio di composizione gerarchica. I pesi locali di ogni materiale vengono moltiplicati per quelli delle corrispondenti proprietà del livello superiore e i prodotti così ottenuti sono sommati. Procedendo dall'alto verso il basso, i pesi locali di tutti gli elementi della gerarchia vengono così trasformati progressivamente in pesi globali.

I pesi globali (o priorità) degli elementi collocati alla base della gerarchia rappresentano il risultato della valutazione e consentono di determinare un ordine di preferenza: un materiale sarà tanto più preferibile quanto maggiore è il suo peso globale.

### 6.3. Selezione del miglior materiale composito per la realizzazione di racchette da tennis

Questa analisi valuta, tra un numero finito di materiali compositi a matrice polimerica rinforzati con CNT e compositi a matrice polimerica rinforzati con fibre di carbonio (Tabella 6.3), qual è il miglior materiale da utilizzare nella produzione del telaio delle racchette da tennis in base alle priorità tra costi e benefici e alle caratteristiche finali della racchetta.

Si analizzano 12 materiali compositi a matrice epossidica rinforzata con percentuali diverse di:

- fibre di carbonio (CF);
- nanotubi di carbonio (CNT);
- fibre di carbonio (CF) e nanotubi di carbonio (CNT).

COMPOSITI ANALIZZATI						
N°	Matrice	%	Fase di rinforzo principale	%	Fase di rinforzo secondaria	%
1	Epossidica	95	Nanotubi di carbonio CNT	5		
2	Epossidica	80	Nanotubi di carbonio CNT	20		
3	Epossidica	70	Nanotubi di carbonio CNT	30		
4	Epossidica	50	Fibra di carbonio CF	50		
5	Epossidica	45	Fibra di carbonio CF	55		
6	Epossidica	40	Fibra di carbonio CF	60		
7	Epossidica	35	Fibra di carbonio CF	65		
8	Epossidica	35	Fibra di carbonio CF	64	Nanotubi di carbonio CNT	1
9	Epossidica	35	Fibra di carbonio CF	62	Nanotubi di carbonio CNT	3
10	Epossidica	35	Fibra di carbonio CF	60	Nanotubi di carbonio CNT	5
11	Epossidica	35	Fibra di carbonio CF	55	Nanotubi di carbonio CNT	10
12	Epossidica	35	Fibra di carbonio CF	50	Nanotubi di carbonio CNT	15

Tabella 6.3 – Materiali compositi analizzati.

I nanotubi di carbonio sono usati come fase di rinforzo nei PMC in 2 modi:

- come unica fase di rinforzo (CNTRP)
- come fase di rinforzo addizionale alle fibre di carbonio (CF+CNTRP) in un composito ibrido.

### 6.3.1. Calcolo delle proprietà meccaniche dei compositi analizzati

Per prevedere le proprietà meccaniche del composito si usa una relazione matematica che consente di “mescolare” le caratteristiche del rinforzo e della matrice del composito in funzione delle frazioni in volume di quest’ultimi. In particolare per calcolare il modulo elastico del composito, la relazione è la seguente:

$$E_C = K_1 \cdot V_{CNT} \cdot E_{CNT} + [1 - (V_{CNT})] \cdot E_m \quad (6.8)$$

Dove:

- $E_C$ ,  $E_{CNT}$  e  $E_m$  sono rispettivamente i moduli elastici del composito, dei nanotubi e della matrice;
- $V_{CNT}$  è la frazione di volume dei nanotubi;
- $K_1$  è un parametro di efficienza dei CNT, il quale dipende dall’aspect ratio dei CNT, dal rapporto  $E_m/E_{CNT}$  e dal rapporto di Poisson della matrice  $\nu_m$ , e dalla frazione di volume di nanotubi  $V_{CNT}$ , e viene calcolato nel seguente modo:

$$K_1 = (1 - [\tanh(ns)/(ns)]) \quad (6.9)$$

Dove

$$n = \sqrt{\frac{2E_m}{E_{CNT} \cdot (1 + \nu_m)} \cdot \ln\left(\frac{1}{V_{CNT}}\right)}$$

Il fattore  $K_1$  è stimato 1 per grandi frazioni in volume di nanotubi in carbonio (CNT) con alto “aspect ratio”.

L’Equazione 6.8 può essere modificata per stimare le differenti proprietà ( $P_C$ ) finali dei materiali compositi ibridi. L’equazione diventa:

$$P_C = K_1 \cdot V_1 \cdot P_1 + K_2 \cdot V_2 \cdot P_2 + [1 - (V_1 + V_2)] \cdot P_m \quad (6.10)$$

Dove:

- $V_1$  e  $V_2$  sono le frazioni di volume delle fasi 1 e 2, rappresentate rispettivamente da nanotubi di carbonio e fibre di carbonio;
- $P_1$  e  $P_2$  sono proprietà delle fasi 1 e 2, rappresentate rispettivamente da nanotubi di carbonio e fibre di carbonio;
- $P_m$  è una proprietà della matrice polimerica;
- $K_1$  è il parametro di efficienza dei CNT, il quale assumerà un valore unitario;
- $K_2$  è il parametro di efficienza delle fibre di carbonio il quale è uguale a 1 nel caso di fibre allineate nella direzione di allineamento, come in questo caso.

Le proprietà delle fasi prese in esame e usate per calcolare le proprietà dei compositi sono date nella Tabella 6.4.

I nanotubi utilizzati nell'analisi sono principalmente i MWCNT prodotti con arco elettrico, che presentano alto modulo elastico e sono disponibili ad un prezzo abbordabile e, quindi, hanno un'alta possibilità di essere utilizzati su scala commerciale come rinforzi nei materiali compositi.

<b>Materiale</b>	<b>Modulo elastico (GPa)</b>	<b>Densità <math>\rho</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Costo (€/kg)</b>
Resina epossidica	32	1,84	6,90
MWCNT (purezza 35%)	2000	1,9	10344,83
Fibre di carbonio CF	240	1,9	120,69

*Tabella 6.4 - Proprietà delle fibre e matrici utilizzate nella produzione dei compositi.*

Le proprietà dei vari materiali compositi sono state calcolate in accordo con l'Equazione 6.10 usando i dati forniti in Tabella 6.4. Il valore massimo della fase di rinforzo è assunto pari a 65%. Nel caso di composti ibridi invece, è assunto che la massima frazione di volume delle fasi di rinforzo sia complessivamente del 65% e la matrice occupi un volume del 35%.

La Tabella 6.5 mostra i vari compositi e le relative proprietà, calcolate con le Equazioni 6.8 e 6.10, che si possono ottenere con nanotubi di carbonio (CNT) e fibre di carbonio (CF) al variare della percentuale in volume delle fibre di rinforzo.

<b>COMPOSITO</b>	<b><math>E_c</math> (GPa)</b>	<b>Densità <math>\rho_c</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Modulo specifico <math>E/\rho</math></b>	<b>Costo composito (€/kg)</b>
Epoxy + 5% CNT	130,4	1,843	70,75	1530,08
Epoxy + 20% CNT	425,6	1,852	229,81	6070,02
Epoxy + 30% CNT	622,4	1,858	334,98	6050,42
Epoxy + 50% CF	136,0	1,870	72,73	64,71
Epoxy + 55% CF	146,4	1,873	78,16	70,38
Epoxy + 60% CF	156,8	1,876	83,58	76,05
Epoxy + 65% CF	167,2	1,879	88,98	81,69
Epoxy + 1% CNT + 64% CF	184,8	1,879	98,35	379,34
Epoxy + 3% CNT + 62% CF	220,0	1,879	117,08	974,64
Epoxy + 5% CNT + 60% CF	255,2	1,879	135,82	1569,94
Epoxy + 10% CNT + 55% CF	343,2	1,879	182,65	3058,18
Epoxy + 15% CNT + 50% CF	431,2	1,879	229,48	4546,43

*Tabella 6.5 - Proprietà dei differenti materiali compositi.*

*Il costo dei materiali compositi è stato calcolato usando l'Equazione 6.10 e tenendo conto del fatto che il materiale prodotto con arco elettrico contiene solo il 35% in peso di CNT.*

Esempio di calcolo per il composito costituito da resina epossidica + 5% di CNT + 60% CF:

– Modulo elastico:

$$E_C = K_{CNT} \cdot V_{CNT} \cdot E_{CNT} + K_{CF} \cdot V_{CF} \cdot E_{CF} + [1 - (V_{CNT} + V_{CF})] \cdot E_{EPOSSIDICA} =$$

$$= 1 \cdot 0,05 \cdot 2000 + 1 \cdot 0,60 \cdot 240 + [1 - (0,60 + 0,05)] \cdot 32 = 255,2 \text{ GPa}$$

– Densità:

$$\rho_C = K_{CNT} \cdot V_{CNT} \cdot \rho_{CNT} + K_{CF} \cdot V_{CF} \cdot \rho_{CF} + [1 - (V_{CNT} + V_{CF})] \cdot \rho_{EPOSSIDICA} =$$

$$= 1 \cdot 0,05 \cdot 1,9 + 1 \cdot 0,60 \cdot 1,9 + [1 - (0,60 + 0,05)] \cdot 1,84 = 1,879 \text{ g/cm}^3$$

– Modulo specifico:

$$E/\rho = 130,4/1,843 = 70,75 \text{ (GPa} \cdot \text{cm}^3\text{)}/\text{g}$$

– Calcolo del costo:

$$P_C = K_{CNT} \cdot V_{CNT} \cdot \frac{\rho_{CNT}}{\rho_C} \cdot P_{CNT} \cdot \frac{100}{35} + K_{CF} \cdot V_{CF} \cdot \frac{\rho_{CF}}{\rho_C} \cdot P_{CF} + [1 - (V_{CNT} + V_{CF})] \cdot \frac{\rho_{EPOXY}}{\rho_C} \cdot P_{EPOXY} =$$

$$= 1 \cdot 0,05 \cdot \frac{1,9}{1,879} \cdot 10344,83 \cdot \frac{100}{35} + 1 \cdot 0,60 \cdot \frac{1,9}{1,879} \cdot 120,69 + [1 - (0,05 + 0,60)] \cdot \frac{1,84}{1,879} \cdot 6,90 =$$

$$= 1569,94 \text{ €/kg}$$

Come si può vedere dalla Tabella 6.5 il massimo modulo elastico che può essere ottenuto con i rinforzi in fibra di carbonio è di 167 GPa. Per incrementare il modulo elastico del composito oltre questo valore, devono essere utilizzati nanotubi di carbonio in eccesso di circa il 7%, nel caso di compositi formati da resina epossidica e CNT, oppure assieme alle fibre di carbonio nel caso di compositi ibridi.

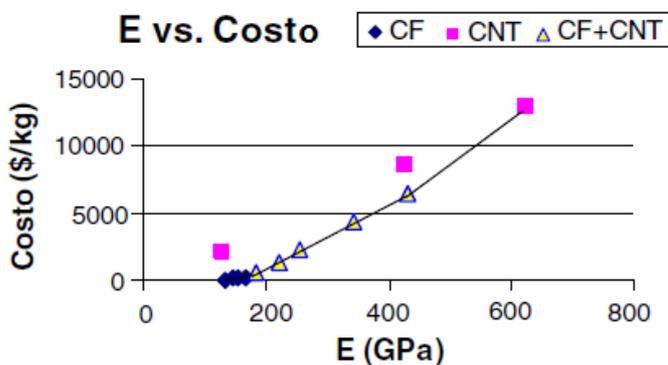


Figura 6.2 – Costi dei differenti compositi in funzione del loro modulo elastico. La linea collega le opzioni più vantaggiose per un valore richiesto di E.

La Figura 6.2 è un grafico dei costi per i vari materiali compositi in funzione del loro modulo elastico. Essa mostra che i compositi diventano progressivamente sempre più costosi con l'aumentare della percentuale della fase di rinforzo per aumentare i loro moduli elastici.

Usando nanotubi di carbonio come unica fase di rinforzo è dimostrato che il composito diventa un'alternativa molto costosa se lo stesso modulo elastico può essere raggiunto con altri tipi di rinforzo.

E' interessante notare però che i nanotubi di carbonio sono una interessante soluzione per raggiungere valori di modulo elastico di circa 600 GPa. La linea collega le opzioni più vantaggiose per un valore richiesto di E, che sarà utilizzata nella seguente analisi costi-benefici.

### **6.3.2. Analisi costi – prestazioni dei materiali in esame**

Nell'analisi costi – prestazioni si confronta il rapporto tra il costo incrementale per ottenere un aumento di prestazioni con l'aumento stesso, al variare dei materiali presi in esame. Il relativo costo incrementale è dato da:

$$\Delta C = \frac{(C_2 - C_1)}{C_1} \quad (6.11)$$

Nel Paragrafo 1.4 è stato dimostrato che alta rigidezza (E) e bassa densità ( $\rho$ ) rappresentano le principali caratteristiche che devono possedere i materiali utilizzati nella realizzazione di racchette da tennis per garantire un'elevata potenza. Queste due proprietà sono combinate in un unico parametro chiamato rigidità specifica ( $E/\rho$ ), il quale viene usato per misurare le performance tecniche di un materiale rispetto ad un altro.

Il relativo incremento di performance ( $\Delta\gamma$ ) è definito da:

$$\Delta\gamma = \frac{[(E/\rho)_2 - (E/\rho)_1]}{(E/\rho)_1} \quad (6.12)$$

Dove:

- $C_1$  e  $C_2$  sono i costi del materiale 1 e 2;
- $(E/\rho)_1$  e  $(E/\rho)_2$  sono gli indici di performance rispettivamente del materiale 1 e 2;

Il rapporto costi/benefici può essere misurato:

$$\frac{\Delta C}{\Delta\gamma} \quad (6.13)$$

La Figura 6.3 mostra la variazione di incremento  $\Delta C/\Delta\gamma$  a diversi valori di  $E/\rho$  per i materiali in Tabella 6.3. Il picco mostra l'iniziale alto incremento costi-benefici aggiungendo l'1% di CNT in un composito ibrido; il costo incrementale si riduce con valori superiori di rigidità specifica quando si vogliono ottenere ulteriori miglioramenti in termini di prestazioni.

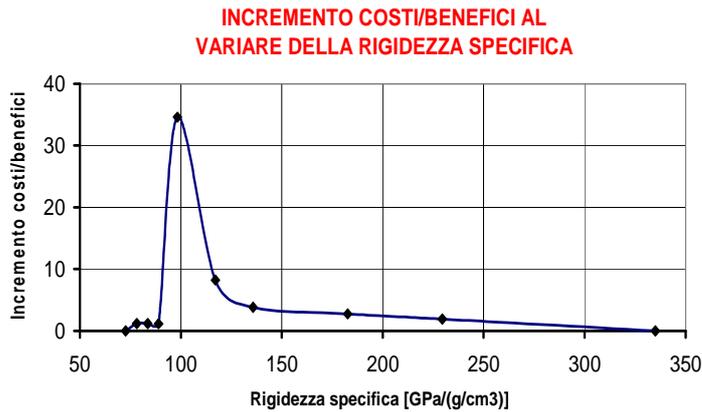


Figura 6.3 - Incremento ( $\Delta C/\Delta \gamma$ ) al variare delle performance valutate con ( $E/\rho$ ).

**6.3.3. Analisi con in metodo AHP**

In questa sezione si classifica, con il metodo AHP, l'idoneità dei materiali compositi utilizzati per realizzare racchette da tennis ed elencati in Tabella 6.3. La prima operazione da fare è sviluppare una gerarchia come indicato al Paragrafo 6.2.1. in modo da scomporre il problema in sottoproblemi (Figura 6.4).

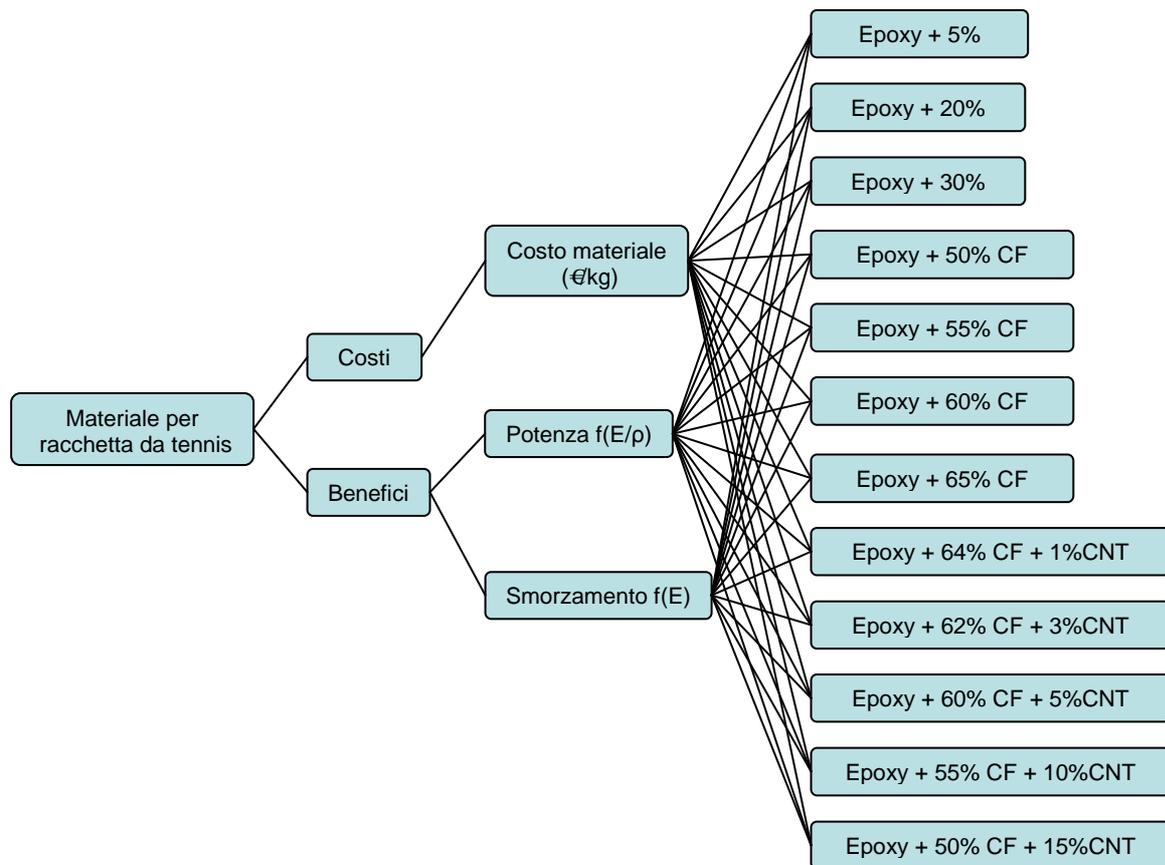


Figura 6.4 – Schema gerarchico.

In un'analisi costi-benefici, il costo è inteso come il costo per unità di massa mentre i benefici sono sostanzialmente rappresentati da due caratteristiche della racchetta da tennis: potenza e smorzamento. La potenza di una racchetta permette di imprimere alla pallina una maggiore velocità con uno sforzo minore. A parità di sforzo una racchetta più potente è quella in grado di imprimere una velocità maggiore alla palla. La potenza può essere correlata alla rigidità specifica del materiale costituente la racchetta ( vedi Paragrafo 1.4 ). Lo smorzamento è l'abilità del materiale di ridurre le vibrazioni nelle corde dopo aver colpito la pallina, diminuendo così il rischio di provocare infiammazioni ai tendini del giocatore. Materiali con basso modulo elastico consentono un miglior smorzamento.

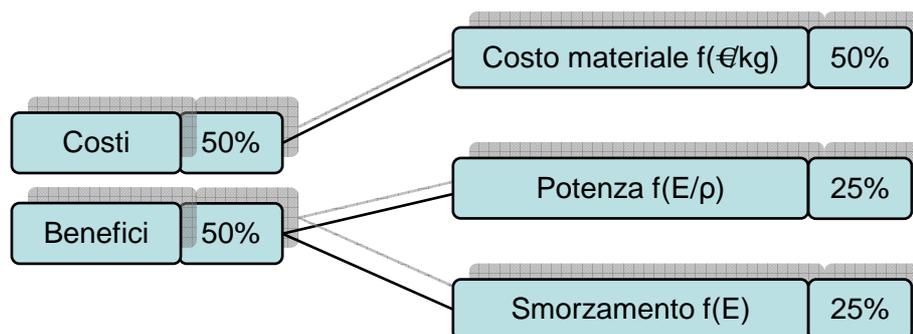
Il costo è direttamente correlato al prezzo dei materiali in €/kg, come mostrato in Tabella 6.5. Dal lato dei benefici, la variazione di potenza è linearmente proporzionale alla variazione di rigidità specifica ( $E/\rho$ ) mentre lo smorzamento è inversamente proporzionale al modulo elastico ( $E$ ). In questa analisi si ipotizza che i nanotubi di carbonio possano essere allineati e distribuiti uniformemente nella matrice del composito di CNT e ibrido CNT + CF . Queste ipotesi sono particolarmente problematiche a causa della dimensioni dei CNT. Un'altra ipotesi è che l'aspect ratio del CNT sia abbastanza alto per poter trasferire il carico in modo efficiente dalla matrice ai nanotubi di carbonio. Si effettuano tre diverse analisi al variare dei pesi attribuiti a costo, potenza e smorzamento.

E' logico pensare che un'azienda quando produce racchette per principianti o comunque per un mercato vasto, la variabile principale che deve considerare è il costo che deve essere il più basso possibile, pur garantendo una determinata potenza e un determinato smorzamento (caso 1). Viceversa, ad un giocatore professionista interessano principalmente i benefici ( potenza e smorzamento ) mentre il costo è un parametro poco influente (caso 3).

In questa analisi si parte con la costruzione della matrice dei confronti a coppie e alla determinazione dei pesi locali relativi delle proprietà e dei materiali. Dopodiché si verifica la consistenza dei giudizi e una volta verificati si calcola la classifica dei migliori materiali da usare con quelle determinate priorità.

In seguito sono riportati le tre analisi effettuate:

**1. Caso:**



Matrice delle proprietà:

	<b>Costo</b>	<b>Potenza (E/ ρ)</b>	<b>Smorzamento (E)</b>
<b>Costo</b>	1	2,00	2,00
<b>Potenza (E/ ρ)</b>	0,5	1,00	1,00
<b>Smorzamento (E)</b>	0,5	1,00	1,00
<b>Totale</b>	2,00	4,00	4,00

Matrice delle proprietà risolta con i corrispondenti pesi:

	<b>Costo</b>	<b>Potenza (E/ ρ)</b>	<b>Smorzamento (E)</b>	<b>Media = Peso</b>	<b>Misura di consistenza</b>
<b>Costo</b>	0,500	0,500	0,500	0,500	3,000
<b>Potenza (E/ρ)</b>	0,250	0,250	0,250	0,250	3,000
<b>Smorzamento (E)</b>	0,250	0,250	0,250	0,250	3,000
<b>Totale</b>	1,000	1,000	1,000	1,000	3,000

Calcolo dei fattori di consistenza per la singole proprietà:

$$\text{Consistenza, costo} = \frac{(0,500 \cdot 1 + 0,250 \cdot 2 + 0,250 \cdot 2)}{0,500} = 3,000$$

$$\text{Consistenza, potenza} = \frac{(0,500 \cdot 0,5 + 0,250 \cdot 1 + 0,250 \cdot 1)}{0,250} = 3,000$$

$$\text{Consistenza, smorzamento} = \frac{(0,500 \cdot 0,5 + 0,250 \cdot 1 + 0,250 \cdot 1)}{0,250} = 3,000$$

Media dei fattori di consistenza:

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^n \text{consistenza}_i}{n} = \frac{3+3+3}{3} = 3$$

Controllo consistenza:

- Indice di consistenza:

$$CI = \frac{\lambda - n}{n - 1} = \frac{3,000 - 3}{3 - 1} = 0,000$$

- Rapporto di consistenza:

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0,000}{0,58} = 0,000 < 0,10 \text{ processo accettabile e perfettamente consistente}$$

Matrici delle proprietà dei materiali:

1) Costo:

<b>Epoxy + 15%CNT + 50%CF</b>	4,00	0,50	0,20	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	4,00	4,00	2,00	1,00	40,70
<b>Epoxy + 10%CNT + 55%CF</b>	2,00	0,25	0,17	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	3,00	3,00	2,00	1,00	27,92
<b>Epoxy + 5%CNT + 60%CF</b>	1,00	0,20	0,13	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	1,00	0,50	15,08
<b>Epoxy + 3%CNT + 62%CF</b>	1,00	0,17	0,13	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	1,00	0,50	0,33	0,25	13,38
<b>Epoxy + 1%CNT + 64%CF</b>	0,33	0,17	0,11	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,50	0,50	0,33	0,20	7,14
<b>Epoxy + 65%CF</b>	0,33	0,17	0,11	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,50	0,50	0,25	0,20	7,06
<b>Epoxy + 60%CF</b>	0,33	0,17	0,11	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,50	0,50	0,25	0,20	7,06
<b>Epoxy + 55%CF</b>	0,33	0,17	0,11	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,50	0,50	0,25	0,20	7,06
<b>Epoxy + 50%CF</b>	0,33	0,17	0,11	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,50	0,50	0,25	0,20	7,06
<b>Epoxy + 30%CNT</b>	8,00	4,00	1,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	8,00	8,00	6,00	5,00	85,00
<b>Epoxy + 20%CNT</b>	5,00	1,00	0,25	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	5,00	4,00	2,00	53,25
<b>Epoxy + 5%CNT</b>	1,00	0,20	0,13	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	1,00	1,00	0,50	0,25	19,08
<b>COSTO</b>	<b>Epoxy + 5%CNT</b>	<b>Epoxy + 20%CNT</b>	<b>Epoxy + 30%CNT</b>	<b>Epoxy + 50%CF</b>	<b>Epoxy + 55%CF</b>	<b>Epoxy + 60%CF</b>	<b>Epoxy + 65%CF</b>	<b>Epoxy + 1%CNT + 64%CF</b>	<b>Epoxy + 3%CNT + 62%CF</b>	<b>Epoxy + 5%CNT + 60%CF</b>	<b>Epoxy + 10%CNT + 55%CF</b>	<b>Epoxy + 15%CNT + 50%CF</b>	<b>TOTALE</b>	





Matrici delle proprietà dei materiali risolte:

1) Costo:

<b>PESI</b>		0,065579	0,020086	0,010836	0,135885	0,135885	0,135885	0,135885	0,132900	0,085469	0,072275	0,041937	0,027378	1,000000
<b>Epoxy + 15%CNT + 50%CF</b>		0,098	0,012	0,005	0,123	0,123	0,123	0,123	0,123	0,098	0,098	0,049	0,025	1,000
<b>Epoxy + 10%CNT + 55%CF</b>		0,072	0,009	0,006	0,143	0,143	0,143	0,143	0,107	0,107	0,072	0,036	0,018	1,000
<b>Epoxy + 5%CNT + 60%CF</b>		0,066	0,013	0,008	0,133	0,133	0,133	0,133	0,133	0,133	0,066	0,033	0,017	1,000
<b>Epoxy + 3%CNT + 62%CF</b>		0,075	0,012	0,009	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,075	0,037	0,025	0,019	1,000
<b>Epoxy + 1%CNT + 64%CF</b>		0,047	0,023	0,016	0,140	0,140	0,140	0,140	0,140	0,070	0,070	0,047	0,028	1,000
<b>Epoxy + 65%CF</b>		0,047	0,024	0,016	0,142	0,142	0,142	0,142	0,142	0,071	0,071	0,035	0,028	1,000
<b>Epoxy + 60%CF</b>		0,047	0,024	0,016	0,142	0,142	0,142	0,142	0,142	0,071	0,071	0,035	0,028	1,000
<b>Epoxy + 55%CF</b>		0,047	0,024	0,016	0,142	0,142	0,142	0,142	0,142	0,071	0,071	0,035	0,028	1,000
<b>Epoxy + 50%CF</b>		0,047	0,024	0,016	0,142	0,142	0,142	0,142	0,142	0,071	0,071	0,035	0,028	1,000
<b>Epoxy + 30%CNT</b>		0,094	0,047	0,012	0,106	0,106	0,106	0,106	0,106	0,094	0,094	0,071	0,059	1,000
<b>Epoxy + 20%CNT</b>		0,094	0,019	0,005	0,113	0,113	0,113	0,113	0,113	0,113	0,094	0,075	0,038	1,000
<b>Epoxy + 5%CNT</b>		0,052	0,010	0,007	0,157	0,157	0,157	0,157	0,157	0,052	0,052	0,026	0,013	1,000
<b>COSTO</b>														
<b>Epoxy + 5%CNT</b>														
<b>Epoxy + 20%CNT</b>														
<b>Epoxy + 30%CNT</b>														
<b>Epoxy + 50%CF</b>														
<b>Epoxy + 55%CF</b>														
<b>Epoxy + 60%CF</b>														
<b>Epoxy + 65%CF</b>														
<b>Epoxy + 1%CNT + 64%CF</b>														
<b>Epoxy + 3%CNT + 62%CF</b>														
<b>Epoxy + 5%CNT + 60%CF</b>														
<b>Epoxy + 10%CNT + 55%CF</b>														
<b>Epoxy + 15%CNT + 50%CF</b>														
<b>TOTALE</b>														

2) Potenza:

<b>POTENZA</b>	<b>Epoxy + 5%CNT</b>	0,042	0,125	0,208	0,042	0,042	0,042	0,042	0,042	0,042	0,083	0,083	0,125	0,125	1,000	
	<b>Epoxy + 20%CNT</b>	0,047	0,140	0,140	0,047	0,047	0,047	0,047	0,047	0,070	0,070	0,070	0,140	0,140	1,000	
	<b>Epoxy + 30%CNT</b>	0,033	0,167	0,167	0,033	0,042	0,056	0,056	0,056	0,056	0,056	0,056	0,084	0,084	1,000	
	<b>Epoxy + 50%CF</b>	0,042	0,125	0,208	0,042	0,042	0,042	0,042	0,042	0,042	0,042	0,083	0,083	0,125	0,125	1,000
	<b>Epoxy + 55%CF</b>	0,048	0,143	0,190	0,048	0,048	0,048	0,048	0,048	0,048	0,048	0,048	0,048	0,095	0,143	1,000
	<b>Epoxy + 60%CF</b>	0,050	0,150	0,150	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,100	0,100	0,150	1,000
	<b>Epoxy + 65%CF</b>	0,053	0,158	0,158	0,053	0,053	0,053	0,053	0,053	0,053	0,053	0,053	0,053	0,105	0,158	1,000
	<b>Epoxy + 1%CNT + 64%CF</b>	0,059	0,118	0,176	0,059	0,059	0,059	0,059	0,059	0,059	0,059	0,059	0,059	0,118	0,118	1,000
	<b>Epoxy + 3%CNT + 62%CF</b>	0,031	0,125	0,188	0,031	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,125	0,125	1,000
	<b>Epoxy + 5%CNT + 60%CF</b>	0,038	0,154	0,154	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038	0,077	0,077	0,154	0,154	1,000
	<b>Epoxy + 10%CNT + 55%CF</b>	0,036	0,109	0,218	0,036	0,036	0,036	0,036	0,036	0,036	0,036	0,036	0,036	0,109	0,109	1,000
	<b>Epoxy + 15%CNT + 50%CF</b>	0,047	0,140	0,140	0,047	0,047	0,047	0,047	0,047	0,047	0,047	0,047	0,047	0,140	0,140	1,000
	<b>PESI</b>	0,043744	0,137711	0,174770	0,043744	0,048560	0,049721	0,052926	0,056802	0,063746	0,078748	0,111816	0,137711	1,000000		
	<b>TOTALE</b>															

## 3) Smorzamento:

<b>SMORZAMENTO</b>	<b>Epoxy + 5%CNT</b>	0,130	0,026	0,026	0,130	0,130	0,130	0,130	0,130	0,065	0,043	0,033	0,026	1,000	0,130799
	<b>Epoxy + 20%CNT</b>	0,128	0,026	0,026	0,128	0,128	0,128	0,128	0,103	0,077	0,077	0,051	0,026	1,000	0,130799
	<b>Epoxy + 30%CNT</b>	0,135	0,027	0,027	0,135	0,108	0,108	0,108	0,108	0,081	0,081	0,054	0,027	1,000	0,128547
	<b>Epoxy + 50%CF</b>	0,130	0,026	0,026	0,130	0,130	0,130	0,130	0,130	0,065	0,043	0,033	0,026	1,000	0,128547
	<b>Epoxy + 55%CF</b>	0,130	0,026	0,026	0,130	0,130	0,130	0,130	0,129	0,065	0,043	0,032	0,026	1,000	0,128547
	<b>Epoxy + 60%CF</b>	0,128	0,032	0,032	0,128	0,128	0,128	0,128	0,128	0,064	0,043	0,032	0,026	1,000	0,126410
	<b>Epoxy + 65%CF</b>	0,128	0,032	0,032	0,128	0,128	0,128	0,128	0,128	0,064	0,043	0,032	0,026	1,000	0,126410
	<b>Epoxy + 5%CF</b>	0,129	0,026	0,032	0,129	0,129	0,129	0,129	0,129	0,065	0,043	0,032	0,026	1,000	0,117437
	<b>Epoxy + 50%CF</b>	0,128	0,032	0,032	0,128	0,128	0,128	0,128	0,128	0,064	0,043	0,032	0,026	1,000	0,117437
	<b>Epoxy + 60%CF</b>	0,128	0,032	0,032	0,128	0,128	0,128	0,128	0,128	0,064	0,043	0,032	0,026	1,000	0,117437
	<b>Epoxy + 65%CF</b>	0,128	0,032	0,032	0,128	0,128	0,128	0,128	0,128	0,064	0,043	0,032	0,026	1,000	0,117437
	<b>Epoxy + 1%CNT + 64%CF</b>	0,124	0,031	0,031	0,124	0,124	0,124	0,124	0,124	0,062	0,062	0,041	0,031	1,000	0,126410
	<b>Epoxy + 3%CNT + 62%CF</b>	0,129	0,022	0,022	0,129	0,129	0,129	0,129	0,129	0,065	0,065	0,032	0,022	1,000	0,126410
	<b>Epoxy + 5%CNT + 60%CF</b>	0,146	0,016	0,016	0,146	0,146	0,146	0,146	0,146	0,098	0,049	0,024	0,016	1,000	0,126410
<b>Epoxy + 10%CNT + 55%CF</b>	0,136	0,017	0,017	0,136	0,136	0,136	0,136	0,136	0,102	0,068	0,034	0,017	1,000	0,126410	
<b>Epoxy + 15%CNT + 50%CF</b>	0,125	0,025	0,025	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	0,100	0,075	0,050	0,025	1,000	0,126410	
<b>TOTALE</b>															1,000000

Controllo consistenza:

<b>COSTO</b>	<b>Misura di consistenza</b>
Epoxy + 5% CNT	12,646
Epoxy + 20% CNT	12,056
Epoxy + 30% CNT	12,126
Epoxy + 50% CF	12,594
Epoxy + 55% CF	12,594
Epoxy + 60% CF	12,594
Epoxy + 65% CF	12,594
Epoxy + 1% CNT + 64% CF	12,561
Epoxy + 3% CNT + 62% CF	12,593
Epoxy + 5% CNT + 60% CF	12,443
Epoxy + 10% CNT + 55% CF	12,391
Epoxy + 15% CNT + 50% CF	12,193
Media	12,449

– Indice di consistenza:

$$CI = \frac{\lambda - n}{n - 1} = \frac{12,449 - 12}{12 - 1} = 0,041$$

– Rapporto di consistenza:

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0,041}{1,48} = 0,028 \leq 0,10$$

processo accettabile

<b>POTENZA</b>	<b>Misura di consistenza</b>
Epoxy + 5% CNT	12,134
Epoxy + 20% CNT	12,175
Epoxy + 30% CNT	12,202
Epoxy + 50% CF	12,134
Epoxy + 55% CF	12,150
Epoxy + 60% CF	12,160
Epoxy + 65% CF	12,167
Epoxy + 1% CNT + 64% CF	12,145
Epoxy + 3% CNT + 62% CF	12,195
Epoxy + 5% CNT + 60% CF	12,199
Epoxy + 10% CNT + 55% CF	12,157
Epoxy + 15% CNT + 50% CF	12,175
Media	12,166

– Indice di consistenza:

$$CI = \frac{\lambda - n}{n - 1} = \frac{12,166 - 12}{12 - 1} = 0,015$$

– Rapporto di consistenza:

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0,015}{1,48} = 0,010 \leq 0,10$$

processo accettabile

<b>SMORZAMENTO</b>	<b>Misura di consistenza</b>
Epoxy + 5% CNT	12,212
Epoxy + 20% CNT	12,063
Epoxy + 30% CNT	12,060
Epoxy + 50% CF	12,212
Epoxy + 55% CF	12,224
Epoxy + 60% CF	12,224
Epoxy + 65% CF	12,230
Epoxy + 1% CNT + 64% CF	12,147
Epoxy + 3% CNT + 62% CF	12,129
Epoxy + 5% CNT + 60% CF	12,153
Epoxy + 10% CNT + 55% CF	12,076
Epoxy + 15% CNT + 50% CF	12,070
Media	12,150

– Indice di consistenza:

$$CI = \frac{\lambda - n}{n - 1} = \frac{12,150 - 12}{12 - 1} = 0,013$$

– Rapporto di consistenza:

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0,013}{1,48} = 0,009 \leq 0,10$$

processo accettabile

Calcolo della classifica dei materiali più adatti:

Punteggio Epoxy + 5% CNT	Peso Costo, Epoxy + 5% CNT	Peso Potenza, Epoxy + 5% CNT	Peso Smorzam., Epoxy + 5% CNT
Punteggio Epoxy + 20% CNT	Peso Costo, Epoxy + 20% CNT	Peso Potenza, Epoxy + 20% CNT	Peso Smorzam., Epoxy + 20% CNT
Punteggio Epoxy + 30% CNT	Peso Costo, Epoxy + 30% CNT	Peso Potenza, Epoxy + 30% CNT	Peso Smorzam., Epoxy + 30% CNT
Punteggio Epoxy + 50% CF	Peso Costo, Epoxy + 50% CF	Peso Potenza, Epoxy + 50% CF	Peso Smorzam., Epoxy + 50% CF
Punteggio Epoxy + 55% CF	Peso Costo, Epoxy + 55% CF	Peso Potenza, Epoxy + 55% CF	Peso Smorzam., Epoxy + 55% CF
Punteggio Epoxy + 60% CF	Peso Costo, Epoxy + 60% CF	Peso Potenza, Epoxy + 60% CF	Peso Smorzam., Epoxy + 60% CF
Punteggio Epoxy + 65% CF	Peso Costo, Epoxy + 65% CF	Peso Potenza, Epoxy + 65% CF	Peso Smorzam., Epoxy + 65% CF
Punteggio Ep.+1% CNT+64% CF	Peso Costo, Ep.+1% CNT+64% CF	Peso Potenza, Ep.+1% CNT+64% CF	Peso Smorzam., Ep.+1% CNT+64% CF
Punteggio Ep.+3% CNT+62% CF	Peso Costo, Ep.+3% CNT+62% CF	Peso Potenza, Ep.+3% CNT+62% CF	Peso Smorzam., Ep.+3% CNT+62% CF
Punteggio Ep.+5% CNT+60% CF	Peso Costo, Ep.+5% CNT+60% CF	Peso Potenza, Ep.+5% CNT+60% CF	Peso Smorzam., Ep.+5% CNT+60% CF
Punteggio Ep.+10% CNT+55% CF	Peso Costo, Ep.+10% CNT+55% CF	Peso Potenza, Ep.+10% CNT+55% CF	Peso Smorzam., Ep.+10% CNT+55% CF
Punteggio Ep.+15% CNT+50% CF	Peso Costo, Ep.+15% CNT+50% CF	Peso Potenza, Ep.+15% CNT+50% CF	Peso Smorzam., Ep.+15% CNT+50% CF

=

Peso Costo
Peso Potenza (E/p)
Peso Smorzamento (E)

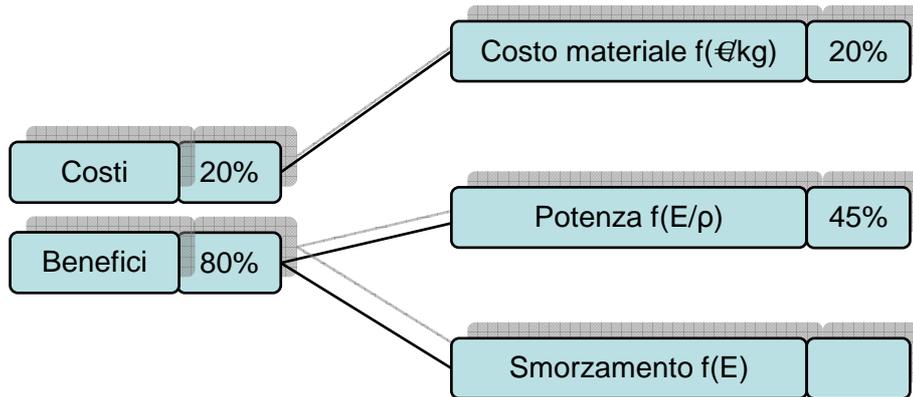
Calcolo della classifica dei materiali più adatti:

$$\begin{bmatrix}
 \text{Punteggio Epoxy + 5\%CNT} \\
 \text{Punteggio Epoxy + 20\%CNT} \\
 \text{Punteggio Epoxy + 30\%CNT} \\
 \text{Punteggio Epoxy + 50\%CF} \\
 \text{Punteggio Epoxy + 55\%CF} \\
 \text{Punteggio Epoxy + 60\%CF} \\
 \text{Punteggio Epoxy + 65\%CF} \\
 \text{Punteggio Ep.+1\%CNT+64\%CF} \\
 \text{Punteggio Ep.+3\%CNT+62\%CF} \\
 \text{Punteggio Ep.+5\%CNT+60\%CF} \\
 \text{Punteggio Ep.+10\%CNT+55\%CF} \\
 \text{Punteggio Ep.+15\%CNT+50\%CF}
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 0,0764 \\
 0,0508 \\
 0,0556 \\
 0,1116 \\
 0,1122 \\
 0,1125 \\
 0,1128 \\
 0,1100 \\
 0,0753 \\
 0,0702 \\
 0,0583 \\
 0,0542
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 0,0656 & 0,0437 & 0,1308 \\
 0,0201 & 0,1377 & 0,0255 \\
 0,0108 & 0,1748 & 0,0260 \\
 0,1359 & 0,0437 & 0,1308 \\
 0,1359 & 0,0486 & 0,1285 \\
 0,1359 & 0,0497 & 0,1285 \\
 0,1359 & 0,0529 & 0,1264 \\
 0,1329 & 0,0568 & 0,1174 \\
 0,0855 & 0,0637 & 0,0666 \\
 0,0723 & 0,0787 & 0,0576 \\
 0,0419 & 0,1118 & 0,0374 \\
 0,0274 & 0,1377 & 0,0244
 \end{bmatrix}
 \cdot
 \begin{bmatrix}
 0,500 \\
 0,250 \\
 0,250
 \end{bmatrix}$$

Classifica materiali:

- 1°- Epoxy + 65%CF
- 2°- Epoxy + 60%CF
- 3°- Epoxy + 55%CF
- 4°- Epoxy + 50%CF

2. Caso:



Matrice delle proprietà:

	Costo	Potenza (E/ ρ)	Smorzamento (E)
Costo	1	0,33	0,50
Potenza (E/ ρ)	3	1,00	2,00
Smorzamento (E)	2	0,50	1,00
Totale	6,00	1,83	3,50

Matrice delle proprietà risolta con i corrispondenti pesi:

	Costo	Potenza (E/ ρ)	Smorzamento (E)	Media = Peso	Misura di consistenza
Costo	0,167	0,182	0,143	0,164	3,004
Potenza (E/ ρ)	0,500	0,545	0,571	0,539	3,015
Smorzamento (E)	0,333	0,273	0,286	0,297	3,008
Totale	1,000	1,000	1,000	1,000	3,009

Controllo consistenza:

- Indice di consistenza:

$$CI = \frac{\lambda - n}{n - 1} = \frac{3,009 - 3}{3 - 1} = 0,0046$$

- Rapporto di consistenza:

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0,0046}{0,58} = 0,0079 < 0,10 \text{ processo accettabile}$$

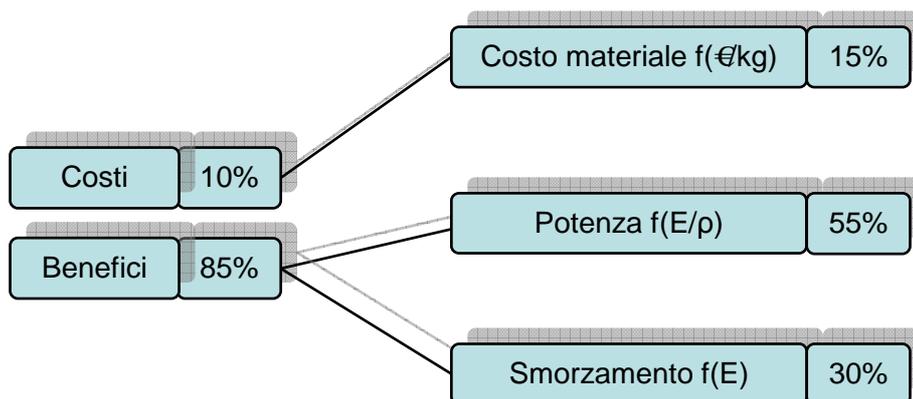
*Calcolo della classifica dei materiali più adatti:*

$$\begin{bmatrix}
 \text{Punteggio Epoxy + 5\%CNT} \\
 \text{Punteggio Epoxy + 20\%CNT} \\
 \text{Punteggio Epoxy + 30\%CNT} \\
 \text{Punteggio Epoxy + 50\%CF} \\
 \text{Punteggio Epoxy + 55\%CF} \\
 \text{Punteggio Epoxy + 60\%CF} \\
 \text{Punteggio Epoxy + 65\%CF} \\
 \text{Punteggio Ep.+1\%CNT+64\%CF} \\
 \text{Punteggio Ep.+3\%CNT+62\%CF} \\
 \text{Punteggio Ep.+5\%CNT+60\%CF} \\
 \text{Punteggio Ep.+10\%CNT+55\%CF} \\
 \text{Punteggio Ep.+15\%CNT+50\%CF}
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 0,0732 \\
 0,0851 \\
 0,1037 \\
 0,0847 \\
 0,0866 \\
 0,0873 \\
 0,0884 \\
 0,0873 \\
 0,0682 \\
 0,0714 \\
 0,0782 \\
 0,0860
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 0,0656 & 0,0437 & 0,1308 \\
 0,0201 & 0,1377 & 0,0255 \\
 0,0108 & 0,1748 & 0,0260 \\
 0,1359 & 0,0437 & 0,1308 \\
 0,1359 & 0,0486 & 0,1285 \\
 0,1359 & 0,0497 & 0,1285 \\
 0,1359 & 0,0529 & 0,1264 \\
 0,1329 & 0,0568 & 0,1174 \\
 0,0855 & 0,0637 & 0,0666 \\
 0,0723 & 0,0787 & 0,0576 \\
 0,0419 & 0,1118 & 0,0374 \\
 0,0274 & 0,1377 & 0,0244
 \end{bmatrix}
 \cdot
 \begin{bmatrix}
 0,164 \\
 0,539 \\
 0,297
 \end{bmatrix}$$

Classifica materiali:

- 1°- Epoxy + 30% CNT
- 2°- Epoxy + 65% CF
- 3°- Epoxy+1% CNT+64% CF e Epoxy + 60% CF
- 4°- Epoxy + 55% CF

3. Caso:



Matrice delle proprietà:

	Costo	Potenza (E/ ρ)	Smorzamento (E)
Costo	1	0,17	0,25
Potenza (E/ ρ)	6	1,00	2,00
Smorzamento (E)	4	0,50	1,00
Totale	11,00	1,67	3,25

Matrice delle proprietà risolta con i corrispondenti pesi:

	Costo	Potenza (E/ ρ)	Smorzamento (E)	Media = Peso	Misura di consistenza
Costo	0,091	0,102	0,077	0,090	3,010
Potenza (E/ ρ)	0,545	0,599	0,615	0,587	3,023
Smorzamento (E)	0,364	0,299	0,308	0,324	3,017
Totale	1,000	1,000	1,000	1,000	3,017

Controllo consistenza:

- Indice di consistenza:

$$CI = \frac{\lambda - n}{n - 1} = \frac{3,017 - 3}{3 - 1} = 0,0085$$

- Rapporto di consistenza:

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0,0085}{0,58} = 0,0015 < 0,10 \text{ processo accettabile}$$

Calcolo della classifica dei materiali più adatti:

$$\begin{bmatrix}
 \text{Punteggio Epoxy + 5\%CNT} \\
 \text{Punteggio Epoxy + 20\%CNT} \\
 \text{Punteggio Epoxy + 30\%CNT} \\
 \text{Punteggio Epoxy + 50\%CF} \\
 \text{Punteggio Epoxy + 55\%CF} \\
 \text{Punteggio Epoxy + 60\%CF} \\
 \text{Punteggio Epoxy + 65\%CF} \\
 \text{Punteggio Ep.+1\%CNT+64\%CF} \\
 \text{Punteggio Ep.+3\%CNT+62\%CF} \\
 \text{Punteggio Ep +5\%CNT+60\%CF} \\
 \text{Punteggio Ep.+10\%CNT+55\%CF} \\
 \text{Punteggio Ep.+15\%CNT+50\%CF}
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 0,0739 \\
 0,0908 \\
 0,1119 \\
 0,0802 \\
 0,0823 \\
 0,0830 \\
 0,0842 \\
 0,0833 \\
 0,0666 \\
 0,0713 \\
 0,0815 \\
 0,0911
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 0,0656 & 0,0437 & 0,1308 \\
 0,0201 & 0,1377 & 0,0255 \\
 0,0108 & 0,1748 & 0,0260 \\
 0,1359 & 0,0437 & 0,1308 \\
 0,1359 & 0,0486 & 0,1285 \\
 0,1359 & 0,0497 & 0,1285 \\
 0,1359 & 0,0529 & 0,1264 \\
 0,1329 & 0,0568 & 0,1174 \\
 0,0855 & 0,0637 & 0,0666 \\
 0,0723 & 0,0787 & 0,0576 \\
 0,0419 & 0,1118 & 0,0374 \\
 0,0274 & 0,1377 & 0,0244
 \end{bmatrix}
 \cdot
 \begin{bmatrix}
 0,090 \\
 0,587 \\
 0,324
 \end{bmatrix}$$

Classifica materiali:

1°- Epoxy + 30% CNT

2°- Epoxy +15% CNT+50%CF

3°- Epoxy + 20% CNT

4°- Epoxy + 65% CF

Caso	PESI		CLASSIFICA				
1	Costi	Benefici		1	2	3	4
	50%	50%		Ep.+65% CF	Ep.+60% CF	Ep.+55% CF	Ep.+50% CF
		Potenza (E/p)	Smorzam. (E)				
		25%	25%				
2	Costi	Benefici		1	2	3	4
	20%	80%		Ep.+30% CNT	Ep.+65% CF	Ep.+1% CNT+64% CF Ep.+60% CF	Ep.+55% CF
		Potenza (E/p)	Smorzam. (E)				
		45%	35%				
3	Costi	Benefici		1	2	3	4
	15%	85%		Ep.+30% CNT	Ep.+ 15% CNT+ 50% CF	Ep.+ 20% CNT	Ep.+ 65% CF
		Potenza (E/p)	Smorzam. (E)				
		55%	30%				

Tabella 6.6 – Classifica dei materiali migliori al variare delle priorità.

#### 6.4. Osservazioni

La Tabella 6.6 mostra che la classifica dei materiali è sensibile all'importanza e quindi al peso attribuito a ognuna delle variabili: costo, potenza, e smorzamento. Quando costi e benefici sono di pari importanza, il materiale più adatto a soddisfare queste condizioni è il tradizionale composito resina epossidica e fibre di carbonio. Compositi ibridi composti da fibre di carbonio e nanotubi di carbonio e compositi costituiti da epossidica e nanotubi diventano più adatti quando non ci sono limitazioni sul costo, quindi quest'ultimo non è più una variabile significativa, ma si dà enfasi alla potenza. I risultati di questo studio sono in accordo con la Figura 6.2, la quale mostra che il tipo di rafforzamento più adatto con valori di moduli elastici relativamente bassi sono le fibre di carbonio (CF). Compositi costituiti da epossidica e nanotubi (CNT) e compositi ibridi (CF + CNT) diventano convenienti con valori intermedi e alti del modulo elastico. I valori più alti del modulo elastico (622 GPa) si possono raggiungere solo con un 30% di rinforzi costituiti da nanotubi di carbonio.

Anche se sono le migliori fibre di rinforzo per compositi ad alto modulo elastico e bassa densità, i nanotubi di carbonio devono affrontare sfide diverse. Come anticipato nei Paragrafi 5.1.3.5, 5.1.3.6, 5.1.3.7, i CNT hanno bisogno di essere prodotti in grandi quantità a costi inferiori, di essere sintetizzati con lunghezze maggiori e con processi più efficienti, in modo da poterli allineare e distribuire in modo uniforme nella matrice.

Con i prezzi attuali e con la tecnologia disponibile, i CNT possono essere aggiunti in piccole quantità alle fibre di carbonio per formare compositi ibridi a matrice polimerica.

Tale uso consente ai produttori di produrre componenti con prestazioni più elevate a prezzi mediamente più elevati. Alcune aziende, come Babolat, stanno già producendo racchette da tennis "nanoengineered" con piccole quantità di nanotubi.

# CAPITOLO 7

## Il piatto corde

### 7.1. Superficie dell'ovale

Un altro aspetto da valutare bene prima e durante la progettazione di una racchetta da tennis è la dimensione dell'ovale nel quale è alloggiato il piatto corde e che determina la superficie di contatto fra la racchetta e la pallina. Un ovale grande, naturalmente, aumenta la zona a disposizione per colpire la palla, attutisce maggiormente le vibrazioni e quindi dà maggior confort al giocatore.

Per quanto riguarda la superficie dell'ovale, questa si calcola rapportandola alla superficie di un ovale di riferimento avente area di 68 pollici quadrati (circa 440 cm<sup>2</sup>) ed è classificata in 4 categorie:

1. **Ovale Standard** (può superare max del 17% l'ovale di riferimento);
2. **Ovale Midsize** (supera il riferimento dal 18 al 32%);
3. **Ovale super mid size o midplus** (supera il riferimento dal 33 al 47%);
4. **Ovale oversize** (supera il riferimento di oltre il 48%).

Un ovale grande consente di disporre di una maggiore superficie per colpire la palla, ma anche di conferire alla stessa una velocità superiore, evitando vibrazioni della racchetta poiché una palla centrata male produce numerose vibrazioni.

### 7.2. Le corde

L'incordatura è un elemento essenziale e importantissimo allo stesso modo del telaio. La racchetta infatti rappresenta l'unione dei due elementi: telaio e corde.

L'incordatura è il "motore" della racchetta: è inutile spendere tanto per il telaio sul quale poi vengono montate corde qualunque, magari con poca spesa. Inoltre la scelta del modello di incordatura condiziona fortemente la resa della racchetta.

La scelta della corda va fatta in funzione di quelle che sono le caratteristiche fisiche e di gioco dell'atleta ma, molto spesso, il prezzo è condizionante. Queste si possono dividere in due grandi gruppi:

- *Sintetiche*: ottenute artificialmente per mezzo di sintesi chimiche;
- *Naturali*: corde in budello ottenute dalla lavorazione dell'intestino animale.

Quali siano migliori, se le sintetiche o le naturali, non si può dire in assoluto, visto che i criteri di scelta sono molto individuali. L'utilizzo di una corda rigida (corda sintetica) consente di ottenere un maggior controllo della pallina, viceversa una elastica (corda naturale di budello) permette di ottenere una maggiore velocità. Velocità e controllo sono variabili condizionate

anche dal diametro delle corde, detto calibro; la corda più sottile dà un maggior controllo e una migliore sensibilità e consente di apprezzare piccole variazioni di tensione. Per sfruttare al meglio le corde, queste devono essere messe in condizione di poter “flettere” in modo che possano aiutare il giocatore nel lavoro di spostamento della pallina da una parte all'altra del campo.

Per quanto riguarda la tensione meccanica delle corde, questa può essere variabile sempre a seconda del modo di giocare dell'atleta. Più si incrementa la tensione applicata alla corda, minore diventa l'effetto elastico e quindi maggiore è il controllo che si ha sulla pallina. Giocatori più esperti possono permettersi di utilizzare tensioni minori aumentando notevolmente l'effetto elastico delle corde e di conseguenza anche la difficoltà nel controllo dei colpi stessi.

Si passa ora alle caratteristiche di rendimento di una corda. Il primo elemento è senza dubbio l'elasticità, cioè la capacità di allungarsi quando viene sollecitata alla trazione e di ritornare alla lunghezza iniziale quando la sollecitazione cessa. Questa caratteristica è misurata dal modulo di elasticità. Il sintetico ha un modulo di elasticità vicino a quello del budello, fino a circa 200 N di carico, ma nettamente inferiore con carichi superiori.

Tuttavia la velocità di ritorno elastico e la perdita di tensione nel tempo sono ancor più importanti del modulo di elasticità. Quando cessa la sollecitazione, il ritorno della corda alla lunghezza iniziale può essere più o meno rapido. Durante l'impatto, la palla resta in contatto con le corde dai 3 ai 7 millesimi di secondo, in funzione della tensione delle corde e della velocità di impatto. E' evidente che se la corda per tornare alla lunghezza iniziale impiega un tempo più lungo, l'energia cinetica assorbita dalle corde viene restituita dopo che la palla ha lasciato la racchetta, cioè va persa e i colpi perdono drasticamente di potenza.

Il budello ha una risposta elastica superiore a quella del sintetico, che si traduce in una maggiore velocità della palla.

Un altro parametro da tenere in considerazione è la perdita di tensione nel tempo. Una corda sintetica sottoposta a trazione con un carico di 300 N registra un allungamento immediato del 10% circa. Lasciando la corda sotto tensione si registra un ulteriore lento allungamento che raggiunge i valori del 16-17% dopo una decina di giorni. L'allungamento iniziale è prevalentemente elastico, perché se cessa la trazione, la corda recupera quasi interamente la lunghezza iniziale. L'allungamento nel tempo è invece prevalentemente irreversibile e imputabile a uno snervamento delle fibre, il cosiddetto creep. Quando la corda è montata su una racchetta, l'allungamento nel tempo non può aver luogo, perché le dimensioni del piatto corde non cambiano, ma si registrerà un allentamento, cioè una perdita di tensione e di elasticità. Sarebbe vano incordare una racchetta con una tensione superiore che tenga conto dell'allentamento della corda nel tempo.

Il budello ha una perdita di tensione nel tempo inferiore a quella del sintetico, tuttavia la

differenza di rendimento a favore del budello naturale diminuisce con l'aumento della superficie del piatto corde, e ciò ha ulteriormente favorito la sostituzione delle corde naturali con quelle sintetiche.

### 7.3. Materiali utilizzati nella realizzazione delle corde

#### 7.3.1. Corde in budello naturale

Fin dall'antichità le proprietà del budello naturale apparvero interessanti per l'uomo: già oltre tremila anni fa era utilizzato per costruire l'arco. Molti secoli più tardi le corde furono applicate anche negli strumenti musicali ad arco. L'impiego delle corde di budello per le racchette di pallacorda, risale invece alla metà del Cinquecento.

Per fabbricare le corde per racchette da tennis vengono impiegati solo intestini di bovini che permettono di ottenere anche armeggi di 12 m. Sono necessari due intestini di bue, circa 15 kg di materia prima per fabbricare un solo armeggio di 20 gr. La lavorazione dura un paio di settimane ed è seguita da una stagionatura di 6 mesi.

L'intestino viene tagliato longitudinalmente in strisce, larghe da 18 a 21 mm, che vengono poi



*Figura 7.1 – Struttura del budello naturale.*

sottoposte a diversi trattamenti prima di ritorcerle per trasformarle in trefoli e essicarli per un paio di settimane in un ambiente a 25°C, umidità 50%, sotto tensione con un carico di 100N.

Le corde sono fabbricate accoppiando e ritorcendo 14 trefoli in media e vengono poi sottoposte a un controllo di qualità, rifinitura, plastificazione e selezione per calibro, seguite da una stagionatura di

almeno sei mesi. Grazie a questa composizione in fibre, tali corde hanno un'elevata elasticità e sono in grado di smorzare notevolmente le vibrazioni. Sono le migliori in termini di comfort oltre a potenza e sensibilità, ma sono molto costose e sensibili agli agenti atmosferici.

Il calibro delle corde di budello non è espresso in mm, ma secondo una scala inglese; esso varia da 8 ½ (1,30 mm) a 9 ½ (1,40 mm). Queste corde sono composte da 100% di fibra naturale. Fino ad oggi, nonostante siano stati fatti molti studi nella ricerca sui materiali sintetici, non si è riusciti ad eguagliare le prestazioni di gioco di questa eccezionale corda. Il calibro più sottile consente il massimo del controllo e una maggiore sensibilità che fa avvertire minime variazioni di tensione, mentre uno spessore maggiore ha una maggiore capacità di spinta.

La grande varietà di scelta di calibro fa sì che queste corde vengano impiegate per ogni tipo di gioco e giocatore, garantendo, comunque, un'ottima sensibilità e potenza, caratteristica di

questo eccezionale materiale. Il budello naturale possiede delle qualità superiori a quelle del sintetico, ma oltre al costo elevato ha alcuni altri svantaggi:

- Con tempo caldo e umido la tensione e la durata del budello calano notevolmente. Per rendere il budello idrofugo vengono introdotte fra le fibre delle particelle di silicone e per proteggere la corda dall'umidità la si ricopre con una guaina di poliuretano, ma con una perdita di rendimento. Oggi, le corde di budello sono trattate per essere meno sensibili all'umidità come lo erano in precedenza, tuttavia, questo costoso trattamento non elimina il problema che queste corde hanno con la temperatura: dimenticare le corde di budello in auto in una giornata d'estate significa ridurre notevolmente la loro durata.
- Poca resistenza e durata alle alte tensioni ( carichi di 280-300 N e oltre). Mediante trattamenti chimici si possono fabbricare corde che resistono a carichi di circa 340N, ma hanno minor durata. Inoltre i trattamenti per aumentarne la resistenza a trazione ne riducono il rendimento.

Questi aspetti negativi hanno causato una notevole diminuzione della domanda di corde naturali obbligando i grossi fabbricanti a entrare nel settore del sintetico.

La differenza di prezzo tra le corde in budello naturale è data, non dalla durata, cioè ore di gioco, ma dall'elasticità e dalla maggiore conservazione della stessa nel tempo. Una corda di minor pregio tende a perdere più rapidamente tensione: per ovviare a questo inconveniente molti giocatori fanno un pre-tiraggio della corda. Questa operazione non dà alla corda maggiore elasticità, ma soltanto una maggiore tenuta di tensione.



*Figura 7.2 - Corde in budello naturale.*

### 7.3.2. Corde in materiale sintetico

Le corde sintetiche sono per lo più prodotti di alta tecnologia che vengono costantemente migliorati per portare le loro caratteristiche in linea con le corde di budello naturale, mantenendo il vantaggio di durata superiore dei materiali sintetici. Esiste una grande varietà di strutture e materiali diversi.

La scelta della corda è spesso condizionata dal prezzo e, in questo senso, le sintetiche trovano largo consenso soprattutto tra i giovani tennisti essendo le corde meno costose.

La vastissima scelta di materiali, spessore e tecnica di costruzione, consente di accontentare la maggior parte dei giocatori, anche tra i professionisti. I materiali più usati sono: nylon, poliestere, poliuretano e Kevlar.

I vantaggi delle corde in budello sintetico rispetto al budello naturale sono i seguenti:

- costo inferiore;
- maggiore tensione applicabile. Le corde di nylon calibro 1,40 mm sopportano un carico di 800 N. Il budello resiste a meno della metà;
- maggiore durata di gioco;
- insensibilità all'umidità.

A parte le caratteristiche delle fibre, il controllo, la velocità di palla e la durata dipendono dalla tensione e dal calibro. Una corda di piccolo calibro (1,30 mm) è più vivace, ma dura poco. Una corda tesa moderatamente (220-240 N) risponde meglio di una corda molto tesa. Una corda molto tesa (oltre 270 N) permette un maggior controllo di palla. Aumentando la tensione aumenta il controllo e diminuisce la velocità di palla, aumentando il calibro aumenta la durata; la durata dipende anche dalle sollecitazioni alle quali è sottoposta la corda (cioè dalla forza di impatto della racchetta sulla palla).

In realtà la qualità delle corde dipende esclusivamente dalle caratteristiche del materiale utilizzato e dall'accuratezza della fabbricazione.

I filamenti sintetici sono ottenuti per trafilazione e stiramento a caldo, per cui in teoria non vi sono limitazioni di lunghezza nella fabbricazione, come nel caso del budello la cui lunghezza è condizionata da quella dell'intestino dell'animale. In pratica vengono commercializzati dei rotoli da 100 o 200 m, oltre agli armeggi di 11-12 m.

Le corde sintetiche, possono essere divise in tre grandi gruppi: monofilamento, multifilamento e avvolgimento.

### **7.3.2.1. Monofilamenti**

Le corde monofilo non possiedono particolari peculiarità tecniche e hanno una costruzione molto semplificata. La loro struttura è basata sull'impiego di un solo materiale assemblato in un unico filamento, abitualmente in poliestere o poliammide e il loro calibro varia da 1,20 mm ai 1,40 mm. Di norma resistono all'abrasione ma hanno una modesta qualità di gioco, inoltre la perdita di dinamicità è al di sopra di tutte le altre categorie di corde.

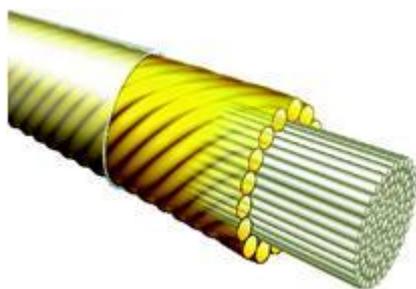
La sua ridotta elasticità permette di utilizzare tensioni molto basse senza perdere controllo, consentendo una maggiore permanenza della palla sulla racchetta. Nei colpi decentrati, però questa rigidità diventa controproducente, infatti la corda si rompe con facilità non avendo la capacità di attutire l'impatto con l'allungamento.

Il difetto più grande dovuto alla rigidità di questo tipo di corda sono le vibrazioni, difetto limitato con basse tensioni delle corde. Questo tipo di corda solitamente non mantiene a lungo la tensione d'incordatura, tuttavia molti giocatori professionisti la utilizzano poiché essi cambiano la racchetta completa dopo poche ore di gioco e quindi ciò gli permette di non preoccuparsi se essa perde le caratteristiche dopo poco tempo. Le corde monofilamento attuali hanno raggiunto un livello qualitativo accettabile anche sotto il punto di vista del comfort; il monofilamento viene comunque scelto da chi predilige il controllo alla sensibilità.

A volte viene utilizzato nell'incordatura insieme al budello per ridurne l'elasticità (incordature ibride; vedi Paragrafo 7.2.3).

### **7.3.2.2. Multifilamenti**

Tra le corde sintetiche rappresentano il top della qualità e si avvicinano al budello per resistenza, tocco e sensibilità, pur impiegando materiali sintetici o a base vegetale. La loro struttura è basata sull'intreccio di tanti filamenti. Pur essendo quelle che più si



*Figura 7.3 - Struttura delle corde multifilamento.*

avvicinano al budello naturale, queste corde hanno costi di acquisto leggermente inferiori. I prezzi sono comunque alti perché, come già detto, tra i sintetici sono quelle di maggiore qualità. Nel multifilamento ci sono molte piccole corde all'interno, ognuna delle quali ha un'anima centrale

circondata da un numero di fili sottili pari a 6 o un multiplo di 6. Una corda così fatta a sua volta viene avvolta insieme ad altre corde (dello stesso materiale o materiali diversi), attorno ad un'anima a formare la corda vera e propria. Successivamente viene

ricoperta da una guaina differente a seconda dell'utilizzo pratico del giocatore (maggior durata, sensibilità elevata, ecc). Ad esempio una corda multifilamento può essere costituita da un nucleo centrale in poliestere ( rigido ) avvolto da fili di poliuretano (elastico); i calibri utilizzati variano da 1,22 mm a 1,45 mm con variazioni di 0,2 mm una dall'altra. Sono corde dotate di grande comfort all'impatto e di una notevole spinta. Il multifilamento viene scelto da chi predilige la sensibilità e la spinta al controllo.

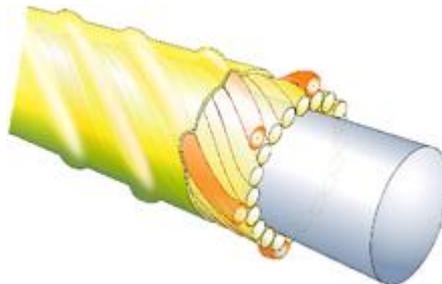
### **7.3.2.3. Avvolgimento**

E' un tipo di corda decisamente più complesso. I tipi di avvolgimento possono essere: semplice, doppio o strutturato.

L'avvolgimento semplice è fatto di una struttura con un'anima centrale monofilo o multifilamento, ricoperta a sua volta da una singola "corona" di rivestimento formata da tanti filamenti.

L'avvolgimento doppio ha alla base quello semplice, a cui si aggiunge un'ulteriore copertura di filamenti in senso contrapposto (Figura 7.4). Offre un livello qualitativo tra i migliori e abbina materiali hi-tech a un rapporto qualità-prezzo interessante. L'avvolgimento strutturato prevede in genere l'impiego di un'anima centrale monofilo o multifilo ricoperta da strutture differenti (e anche di materiali diversi). Sono progettate per fornire una migliore presa sulla palla e quindi una maggiore rotazione.

Le corde di tipo avvolgimento sono di gran lunga superiori alle monofilamento.



*Figura 7.4 – Struttura ad avvolgimento doppio.*

### **7.3.2.4. Principali materiali sintetici utilizzati nella produzione di corde per racchette da tennis**

Ci sono quattro tipi principali di materiali utilizzati per produrre corde sintetiche: nylon, poliestere, poliuretano e Kevlar.

All'interno di queste quattro categorie, ci sono ulteriori differenze tra le corde, quali il processo di fabbricazione e il calibro che offrono ad ogni giocatore di tennis le caratteristiche di cui ha bisogno.

### Poliammidi

Le poliammidi sono tecnopolimeri dotati di ottime proprietà meccaniche e di rigidità; alle poliammidi appartengono due tipi di materiali:

- il *nylon*, ovvero poliammidi alifatiche;
- le *aramidi*, ovvero poliammidi aromatiche.

#### Nylon

Per quanto riguarda il nylon, vengono utilizzate principalmente il nylon 6 e il nylon 6.6.

Il primo ha una durezza e una rigidità inferiore rispetto al secondo che peraltro gode di una resistenza termica e meccanica maggiore del primo; il nylon 6 è meno resistente alla flessione e alla trazione ma è più elastico.

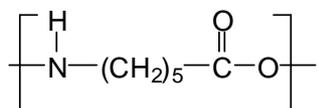


Figura 7.5 - Nylon 6

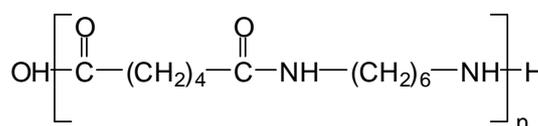


Figura 7.6 - Nylon 6.6

Grazie alle sue eccellenti proprietà il nylon è un materiale adatto per le corde da tennis. Le corde di nylon sono le corde più frequentemente utilizzate. Sono molto elastiche e hanno una sensibilità mediamente buona. Hanno però la tendenza a perdere la tensione. Sul mercato se ne trovano di vario tipo: la differenza fra tutte la può fare la struttura, la composizione e la qualità dei materiali usati. Sono normalmente costituite da un singolo nucleo di nylon e diversi involucri resistenti. Non è possibile produrle con diametro al di sotto di 1,35mm in quanto la durata sarebbe troppo breve mentre con diametri superiori all'1,38mm sono considerate da lunga durata. Le corde al di sotto di 1,35mm appartengono generalmente alla categoria delle corde sintetiche multifilamento o dei microfilamenti.

L'elevato numero di differenti tipi di realizzazioni (materiale, avvolgimento e angolo di avvolgimento) influenza le caratteristiche di gioco della corda in modo significativo. Come regola generale, le corde in nylon con più avvolgimenti possono essere considerate di livello maggiore di corde in nylon monofilamento. L'avvolgimento riduce il creep, fenomeno molto sofferto nelle corde sintetiche. Le corde di nylon sono adatte per i giocatori che hanno un consumo normale o alto.

Le corde monofilamento inizialmente erano composte da un nucleo solido di nylon racchiuso da una sottile copertura esterna.

Il multifilamenti più recenti sono costruiti da centinaia di singole fibre tessute insieme per creare un pezzo di corda uniforme, che viene poi rivestita con uno strato di nylon per aumentare la protezione della stessa. In alcuni casi, alcuni produttori mettono un secondo strato di rivestimento, migliorando la sensazione della corda.



Figura 7.7 - Corda multifilamento in nylon.

### *Kevlar*

Il Kevlar (Paragrafo 5.1.4.) è usato nel fare le corde per i giocatori che necessitano di una durata ancor più grande di quella che una corda in poliestere può offrire. Le corde in Kevlar infatti garantiscono una durata eccellente, 5 volte la durata delle corde in nylon. Queste corde sono estremamente rigide e sono realizzate in fibre, le stesse utilizzate come fasi di rinforzo per realizzare il telaio della racchetta. Presentano una bassa elongazione alla trazione e nel tennis trovano un certo impiego solo nelle incordature cosiddette ibride assieme al budello naturale (Kevlar nelle corde principali e budello naturale nelle corde verticali).

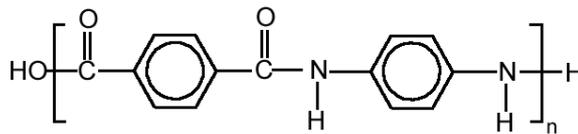


Figura 7.8 – Struttura del Kevlar

### *Poliestere*

Insieme al nylon, le corde in poliestere sono le corde che vengono maggiormente utilizzate attualmente.

Il poliestere è sicuramente la scelta più popolare tra i migliori giocatori perché offre una durata eccezionale e grande controllo. I poliesteri sono una classe di polimeri ottenuti per polimerizzazione a stadi via condensazione che contengono il gruppo funzionale degli esteri lungo la catena carboniosa principale.

Rappresentano una famiglia di prodotti sintetici, che include il policarbonato e il polietilene tereftalato, più comunemente noto come PET.

Le caratteristiche dei fili di poliestere sono oltre ad un'ottima tenacità e resilienza, un'elevata resistenza all'abrasione, alle pieghe e al calore, un elevato modulo di elasticità e una minima ripresa di umidità nonché una buona resistenza agli agenti chimici e fisici.

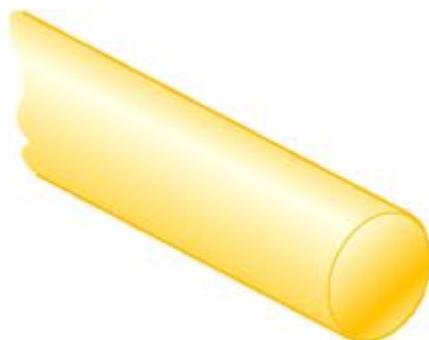
Eccellono nel controllo, nella potenza e nella robustezza meccanica. Sono corde in genere tutt'altro che comode e se usate per troppo tempo e/o a tensioni troppo elevate possono essere dannose alla salute.

Le corde in poliestere presentano una struttura abbastanza semplice: si tratta di un singolo filamento di poliestere estruso, con un sottile rivestimento. Questo tipo di costruzione è definito "monofilamento". Essi sono disponibili in diversi spessori (1,10-1,35 millimetri) che consentono di scegliere tra diverse elasticità e durata nel tempo. Alcune stime affermano che le stringhe in poliestere possono durare fino a 3 volte più a lungo di corde di nylon. Le corde in poliestere sono poco elastiche e più rigide rispetto a corde di nylon multifilamento, ma d'altra parte hanno una resistenza a trazione significativamente migliore, consentendo l'utilizzo di calibri più sottili. Le corde in poliestere puro hanno un lato negativo principale: tendono a perdere la loro tensione abbastanza rapidamente, diminuendo il controllo della pallina dopo un breve periodo di gioco. A causa della maggiore rigidità delle corde in poliestere il rischio di creare problemi ai tendini dei giocatori è maggiore. Per limitare questo pericolo, solitamente si incordano le racchette con una tensione inferiore di circa il 10-15% rispetto alla tensione delle corde di nylon.

Le corde in poliestere sono quindi raccomandabili solo a giocatori con un alto "consumo di corda". Per questi giocatori, le stringhe in poliestere offrono un grande rapporto prestazioni / prezzo.

Il poliestere si caratterizza per un'eccellente resistenza all'abrasione e un buon rapporto peso-resistenza, solo leggermente inferiore al nylon. Non assorbe acqua, quindi limita i fenomeni di "ritiro" del materiale e difficilmente si deteriora. Offre una discreta resistenza agli agenti chimici e vanta inoltre una notevole resistenza ai raggi solari UV, ecco perché viene frequentemente utilizzato in esterni.

Le corde in poliestere sono prodotte in Germania e in Belgio in quanto sono gli unici paesi tecnologicamente all'avanguardia per questo tipo di corde.



*Figura 7.9 - Struttura del monofilamento.*

*Poliuretano:*

Il termine poliuretano indica più propriamente una vasta famiglia di polimeri termoindurenti utilizzati nella produzione di numerosissimi materiali ed applicati nei campi più differenti.

I poliuretani, vengono ottenuti attraverso la reazione di molecole contenenti più isocianati (gruppo funzionale) con polioli (composti contenenti più gruppi ossidrili) come i poliesteri. A questi due elementi si aggiungono poi dei catalizzatori, la cui funzione è quella di sviluppare la reazione, ed alcuni altri additivi che determinino le caratteristiche finali del materiale. Le varianti ottenibili con le diverse combinazioni sono praticamente illimitate.

Il poliuretano offre una elevatissima resistenza agli impatti, più elevata di ogni altro tipo di plastica; spesso questa caratteristica lo rende più funzionale anche dei metalli. Altre caratteristiche interessanti sono il basso coefficiente di attrito e la resistenza agli idrocarburi ed oli minerali.

Il poliuretano viene utilizzato per rivestire le corde multifilamento di nylon in modo da conferire loro giocabilità simile al budello: ottimo comfort e buona accelerazione di palla.

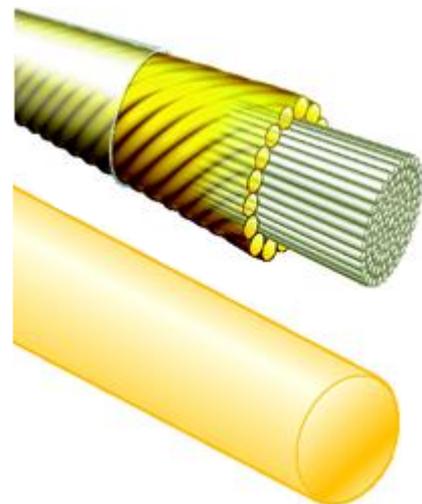
**7.2.3. Incordature ibride**

Queste corde sono composte da due spezzoni differenti nei materiali e a volte anche nel calibro tra le corde verticali e quelle orizzontali. Sono molto discutibili da un punto di vista funzionale in quanto la sinergia di funzionamento tra le corde verticali e quelle orizzontali è pressoché impossibile da ottenere. L'incordatura ibrida formata da budello naturale e sintetico esalta ancor di più un funzionamento anomalo del piatto corde.

Il vantaggio dell'incordatura ibrida è che i giocatori possono ottenere i benefici di diversi tipi di stringhe per aumentare la giocabilità complessiva della racchetta.

Il montaggio più frequente è un'incordatura confortevole e con elevato rendimento (corde di budello naturale) sulle corde orizzontali e un'incordatura molto resistente e che imprime effetti sulle verticali (principalmente o montanti), ad esempio poliestere o fibra aramidica.

Campioni del tennis come Roger Federer utilizza poliestere nelle orizzontali e budello verticale, viceversa Andy Rodick budello orizzontale e poliestere verticale.



*Figura 7.10 – Corde ibride.*

Nel grafico seguente (Figura 7.11) vengono riportate le curve forza-allungamento dei principali tipi di corda analizzati in questo capitolo. L'area racchiusa da ogni curva rappresenta l'energia persa per isteresi dalla corda. Come si può vedere le corde in Kevlar sono le più rigide e hanno un minor allungamento a parità di forza applicata.

Le corde multifilamento di nylon invece sono quelle che più si avvicinano al comportamento del budello naturale.

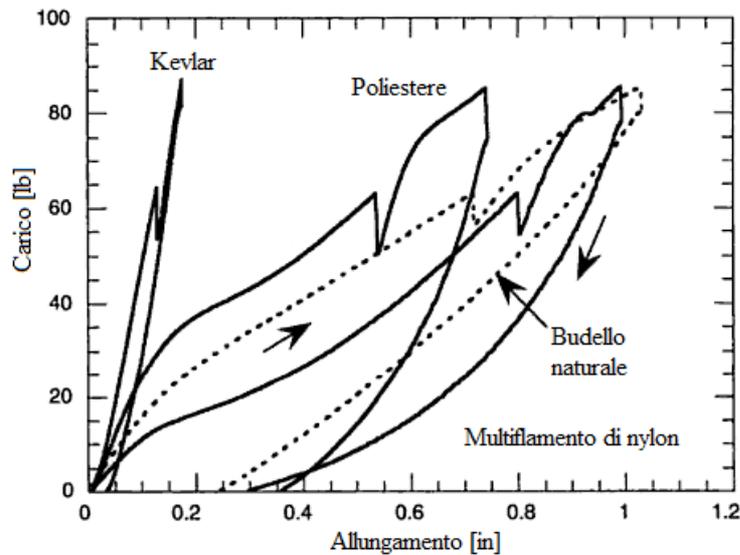


Figura 7.11 - Test di carico e scarico per differenti tipi di corde (lunghezza 20 cm).

# BIBLIOGRAFIA

## TESTI:

- Derek Hull, T. W. Clyne - “*An introduction to composite materials*” – 2<sup>nd</sup> Edition, Cambridge Solid State Science Series, 1996
- Mahmoud M. Farag – “*Materials and process selection for engineering design*” – 2<sup>nd</sup> Edition – CRC Press, 2008
- Serope Kalpakjian, Steven R. Schmid – “*Tecnologia meccanica*” – Quinta edizione, Pearson Education Italia, 2008
- G. Marchi, L. Lenti – “*La valutazione nei processi di piano - Strumenti di trasformazione urbana*”, Angeli, Milano, 2003
- P. K. Mallick – “*Fiber-reinforced composites: Materials, Manufacturing*”, and Design – 3<sup>rd</sup> Edition, CRC Press, 2008
- Anthony Kelly – “*Coincise Encyclopedia of Composite Materials*” - MIT Press, 1990
- A. Brent Strong - “*Fundamentals of Composites Manufacturing: Materials, Methods and Applications*” - 2<sup>nd</sup> Edition, SME, 2008

## SITI WEB

- Enrico Bernardo, Dispense del corso di “*Scienza e Tecnologia dei Materiali*”, Facoltà di Ingegneria, Università degli Studi di Padova, 2009  
<http://www.dim.unipd.it/materiali/Personale/Bernardo/scimatvi.html>
- Enrico Bernardo, Dispensa “Lezione 11” del corso di “*Selezione e progettazione dei materiali*”, Facoltà di Ingegneria, Università degli Studi di Padova, 2010  
[http://www.dim.unipd.it/materiali/Personale/Bernardo/didatticaSPM/Lezione\\_11.pdf](http://www.dim.unipd.it/materiali/Personale/Bernardo/didatticaSPM/Lezione_11.pdf)

- Enrico Bernardo, Dispense “*Integrazione ottimizzazione simultanea di diverse proprietà*” del corso di “Selezione e progettazione dei materiali”, Facoltà di Ingegneria, Università degli Studi di Padova, 2010  
<http://www.dim.unipd.it/materiali/Personale/Bernardo/selpromat.html>
- Massimo Paolucci, Dispense del corso “*Metodi e Modelli per il Supporto alle Decisioni*”, Facoltà di Ingegneria, Università di Genova, 2001  
<http://www.discovery.dist.unige.it/didattica/LS/Introduzione.pdf>
- L. Colonna, A. Gianturco, I. Zelano – “*Nanotubi a base di carbonio*” – Facoltà di Scienze Matematiche Fisiche e Naturali, Università degli studi di Torino, 2006  
[http://lem.ch.unito.it/didattica/infochimica/2006\\_Nanotubi/NANOTUBI.html](http://lem.ch.unito.it/didattica/infochimica/2006_Nanotubi/NANOTUBI.html)
- <http://www.racchettatennis.com/>
- [http://dida.fausser.edu/dispro/carbonar/I\\_materiali/compositi.html](http://dida.fausser.edu/dispro/carbonar/I_materiali/compositi.html)
- [http://www.fitbologna.it/Attivita%20giovanile/doc\\_att\\_giov/ATTREZZATURA.pdf](http://www.fitbologna.it/Attivita%20giovanile/doc_att_giov/ATTREZZATURA.pdf)
- [http://www.cnr.it/documenti/norme/IstruzioniCNR\\_DT200\\_2004.pdf](http://www.cnr.it/documenti/norme/IstruzioniCNR_DT200_2004.pdf)

#### PUBBLICAZIONI:

- Amal M.K. Esawi, Mahmoud M. Farag – “*Carbon nanotube reinforced composites: Potential and current challenges*” – Elsevier, Material & Design, 2007
- Toth Tascau Mirela, Decianu Costina, Rusu Lucian – “*Design aspects of a tennis racket*” – Facoltà di Ingegneria, Politecnico di Timisoara, 2010
- David Repetto, David Brittingham, Charles Tricou – “*Method of making a continuous fiber reinforced resin transfer molded frame for a game racquet*” - Wilson Sporting Goods Co., Chicaco, 1996