



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCANICA E MECCATRONICA

TESI DI LAUREA

**STUDIO DEI MATERIALI
IMPIEGATI NELLA COSTRUZIONE DI SCI**

Relatore: ING. ENRICO BERNARDO

Laureando: MATTEO MONTAGNIN

Matricola: 596806 - IMM

ANNO ACCADEMICO 2010 - 2011

INDICE

Introduzione	1
1. Lo sci	
1.1. Le origine dello sci	3
1.2. L'evoluzione tecnica	4
1.3. Modalità costruttive	5
1.4. Costruzione Sandwich	5
1.5. Costruzione Cap	7
1.6. Comportamento dinamico di uno sci	8
2. I pannelli sandwich	
2.1. Generalità	11
2.2. Effetto sandwich	12
2.3. Analisi del comportamento meccanico	13
2.4. Resistenza e modalità di rottura di un pannello sandwich	16
2.4.1. Distribuzione delle tensioni	16
2.4.2. Modalità di rottura	17
2.5. Ottimizzazione della progettazione con sandwich: rigidezza, resistenza e peso	20
3. I materiali polimerici presenti nello sci	
3.1. Generalità sui materiali polimerici	23
3.2. Classificazione dei materiali polimerici	23
3.2.1. Termoplastici	24
3.2.2. Termoindurenti	25
3.2.3. Elastomeri	26
3.3. I materiali polimerici nello sci	27
3.4. Il polietilene	27
3.4.1. Polietilene ad altissimo peso molecolare (UHMWPE)	28
3.4.2. Tecnologie di trasformazione dell' UHMWPE	29
3.4.2.1. Ram extrusion	29
3.4.2.2. Stampaggio a compressione	30
3.4.2.3. Stampaggio a compressione diretta	31
3.4.2.4. Sinterizzazione	31

3.5. ABS	32
3.5.1. Proprietà dell'ABS	32
3.6. Poliammide	33
3.6.1. Tecnologie di trasformazione	34
3.7. Poliossimetilene (POM)	35
3.7.1. Tecnologie di trasformazione	36
3.8. Matrici termoindurenti per materiali compositi	36
3.8.1. Resina epossidica	36
3.8.2. Resina poliestere insature	37
3.8.3. Resine fenoliche	38
3.9. Matrici termoplastiche per materiali compositi	39
3.9.1. Il Polietilenterchetone (PEEK)	39
3.9.2. Le Poliimidi	40

4. I materiali di rinforzo impiegati nella costruzione dello sci

4.1. I materiali compositi: introduzione	41
4.2. Compositi fibro-rinforzati	42
4.3. Tipologia di fibre disponibili in commercio	43
4.4. Fibra di vetro	44
4.4.1. Processo produttivo	46
4.5. Fibra di carbonio	47
4.5.1. Processo produttivo e classificazione delle fibre di carbonio	48
4.6. Le fibre aramidiche	51
4.6.1. Kevlar	52
4.6.2. Nomex	53
4.6.3. Processo produttivo per la realizzazione di fibre polimeriche	54
4.7. Fibra di basalto	54
4.7.1. Processo produttivo	56
4.8. Fibre di boro	56
4.9. Le matrici polimeriche	58
4.10. I pre-preg: generalità e processi di manifattura	58
4.10.1. Impiego dei pre-preg	60
4.11. L'alluminio: classificazione delle sue leghe	60
4.12. Il Titanal	62
4.12.1. Processo produttivo: l'EMC	63

4.12.2. Preparazione superficiale	64
4.12.3. Caratteristiche meccaniche	64

5. I materiali impiegati nella realizzazione del core di uno sci

5.1. Il core	67
5.2. Il legno	67
5.3. Core schiumoso	69
5.4. Le schiume polimeriche espanse	70
5.4.1. Tecnologie di formazione	71
5.5. Le principali schiume polimeriche espanse	72
5.5.1. Le schiume poliuretaniche	72
5.5.2. Le schiume polistireniche	73
5.5.3. Le schiume in PVC	73
5.6. Honeycomb	73
5.6.1. Honeycomb in alluminio	74
5.6.2. Honeycomb in Nomex	74
5.6.3. Processi produttivi	75
5.7. Metodo di selezione	76
5.7.1. Ottimizzazione della rigidità flessionale	76
5.7.2. Osservazioni	78
Bibliografia	79

Introduzione

Anche il mondo dello sci, alla pari di molti altri sport, ha un'anima che racchiude un concentrato di innovazione e tecnica rivolta alla costante ricerca del miglioramento della prestazione. Da quasi un secolo, cioè da quando lo sci è diventato uno sport, questo è lo spirito che regna nelle aziende operanti nel settore.

Fin dal principio l'introduzione di nuovi materiali nella costruzione di sci è stata la chiave vincente nello sviluppo tecnico di questo attrezzo.

Senza dubbio le motivazioni che oggi guidano lo sviluppo tecnico in questo settore sono differenti dalle origini: mentre inizialmente si cercava di sostituire un materiale come il legno con numerosi difetti tecnologici, oggi la ricerca prestazionale nel campo race, e la facilità di utilizzo nel campo dell'uso ricreativo, sono i fattori determinanti nella scelta dei materiali. Attualmente esiste infatti una netta distinzione tra il prodotto destinato al mondo race e quello destinato all'utilizzatore comune, distinzione dovuta alle diverse tecniche costruttive e alle diverse qualità nei materiali utilizzati.

Le sempre crescenti velocità delle discipline sciistiche, a cui sono legate maggiori sollecitazioni, hanno richiesto materiali da costruzione sempre più performanti non solo per garantire la resistenza ma per conferire allo sciatore stabilità e controllo.

La sfida di ottenere materiali dalle alte prestazioni meccaniche ma allo stesso tempo leggeri per ottenere attrezzi leggeri, è una sfida comune a numerose applicazioni dell'ingegneria meccanica, tra cui il mondo dello sci. Lo sci è stato uno dei primi campi di applicazione della fibra di vetro, già a partire dagli anni sessanta epoca della sua realizzazione, e tutt'ora continua ad essere un ambito in cui l'utilizzo di materiali compositi a matrice polimerica la fanno da padrone. Non più solamente le tradizionali fibre di vetro, ora le tendenze portano verso l'utilizzo di fibre avanzate come carbonio e basalto.

Un ruolo molto importante in uno sci ce l'hanno anche i materiali polimerici: tecnopolimeri dalle caratteristiche eccellenti trovano un crescente impiego nello sci moderno grazie alla loro capacità di mantenere le proprie caratteristiche anche alle basse temperature.

Nonostante l'introduzione nel corso degli anni di materiali sempre più innovativi, il legno, il materiale tradizionale per eccellenza, continua ad essere fondamentale nella costruzione di uno sci, soprattutto in quelli di alta qualità.

In conclusione lo sci è un attrezzo sportivo che racchiude molti aspetti tecnici interessanti che meritano di essere analizzati da un punto di vista ingegneristico. In questa tesi si cercherà di approfondire l'argomento, con particolare riguardo all'analisi dei materiali impiegati nella costruzione di uno sci.

CAPITOLO 1

Lo sci

1.1. Le origini dello sci

Per risalire alle origini dello sci occorre tornare indietro di migliaia di anni, fino al 3000 a.c. È di quell'epoca l'incisione dell'isola di Rodoy in Norvegia, raffigurante degli uomini con gli sci ai piedi, mentre sono stati datati al 2500 a.c. un paio di sci, conservatisi in buone condizioni, in una torbiera in Svezia.

Esploratori e storici ritengono che siano stati inventati in una zona tra la Siberia e la Mongolia. Nel 1500 ha inizio la leggenda dello sci, con Re Gustavo I di Svezia, che fu raggiunto dai suoi sudditi in Norvegia con le due "tavolette", nome dato agli sci a quel tempo.

Fino alla metà dell'800 gli sci rimasero due semplici assi di legno, ma a partire da questi anni iniziano una serie di innovazioni tecnologiche soprattutto in termini di attacchi che portarono alla nascita della disciplina sportiva: nel 1860 ha luogo la prima competizione ufficiale ad Oslo, una gara viva nel tempo e che si ricorda ogni anno.

Nelle valli alpine italiane gli sci arrivarono solo nel 1897 ad opera dell'ingegnere svizzero Adolf Kind, alpinista e sciatore che viveva e lavorava a Torino. Mostrò i suoi sci di fabbricazione svizzera ad alcuni amici, i quali entusiasti delle sue evoluzioni ne seguirono ben presto l'esempio. Di lì a poco nacquero i primi "sci club" italiani: i primi furono lo sci club Ponte Nossia (Bergamo) e lo Sci Club Torino entrambi nel 1901.

Lo sci ben presto conquistò gli Italiani e si diffuse in tutte le vallate alpine tanto da essere utilizzato anche dall'esercito durante le imprese belliche.

1.2.L'evoluzione tecnica

Dalle origini fino ai primi del '900 lo sci è sempre stato realizzato completamente in legno.

I primi tentativi di realizzazione di sci con parti in metallo risalgono agli anni '30, ma la guerra e problemi legati all'assemblaggio di legno e metallo fermarono ogni sviluppo.

L'idea fu però rilanciata nel 1946 dall'americano Howard Head, ingegnere aeronautico e appassionato sciatore. Lo sci completamente in legno infatti presentava numerosi difetti: era pesante, assorbiva acqua aumentando di peso e cambiando forma, aveva una scarsa resistenza a torsione per la sua natura fibrosa. Head utilizzando le sue conoscenze nei processi di incollaggio costruì uno sci con un'anima in legno ricoperta da due piastre di alluminio, ottenendo così una costruzione sandwich già utilizzata in campo aeronautico.

A partire dai primi anni '60 grazie a nuovi processi tecnologici divenne possibile estrarre il vetro in fibre dando vita alla fibra di vetro. Abbinando le fibre a delle resine protettive si riuscirono a sviluppare i primi laminati pre-impregati (pre-preg) in fibra di vetro. I valori di rigidità e la relativa leggerezza catturarono immediatamente l'attenzione del settore dello sci, nel quale cominciò ad essere utilizzata in abbinamento ad un cuore in legno.

Dagli anni '70 si ha l'introduzione delle prime schiume poliuretatiche e delle prime resine in plastica, dando origine allo "sci in plastica". L'introduzione di questi materiali portò ad un aumento nell'efficienza dei processi produttivi ed a una diminuzione notevole nei costi di produzione rispetto allo sci in fibra di vetro, determinando così un forte avvicinamento del pubblico a questo sport, facilitato anche nascita di stazioni sciistiche in tutto l'arco alpino.

In questi anni vennero sviluppati da diversi costruttori nuovi sistemi per incrementare la rigidità torsionale necessaria per garantire tenuta alle alte velocità: le più famose sono la struttura omega (Dynastar) e la torsion box (Rossignol). Tuttavia nessuna è riuscita a migliorare la costruzione sandwich, la quale continua a restare la più performante.

A partire dagli anni '80 e arrivando ai giorni nostri si assiste ad una continua innovazione dei materiali da utilizzare nella costruzione dello sci con l'introduzione di nuove fibre in parziale sostituzione a quelle di vetro, e di nuovi polimeri dalle caratteristiche sempre migliori. Novità sono state introdotte soprattutto nei processi produttivi grazie all'avvento dell'automazione rendendo disponibili gli sci in fibra anche per l'ampio pubblico.

Oggi il mondo dello sci continua ad essere un settore nel quale l'introduzione di nuovi materiali rappresenta un fattore di successo, sia da un punto vista prestazionale che di marketing.

1.3.Modalità costruttive

Uno dei principali fattori che determina il comportamento dello sci, oltre ai parametri geometrici e ai materiali con cui sono realizzati, è come questi materiali sono combinati e assemblati.

La destinazione d'uso dello sci determinerà i parametri progettuali che dovranno essere garantiti in termini di rigidità flessionale/torsionale, resistenza, peso e in funzione di questi si andrà a scegliere la costruzione più adeguata.

In particolare attualmente sono principalmente utilizzate due costruzioni:

- **Costruzione sandwich:** utilizzata per sci da gara o comunque di alta fascia;
- **Costruzione monoscocca (cap):** generalmente utilizzata per sci di medio-basso livello.

In commercio si possono trovare diverse costruzioni ibride che si pongono nel mezzo delle due, non sempre realizzate per motivi tecnici ma spesso per motivi di marketing.

1.3.Costruzione Sandwich

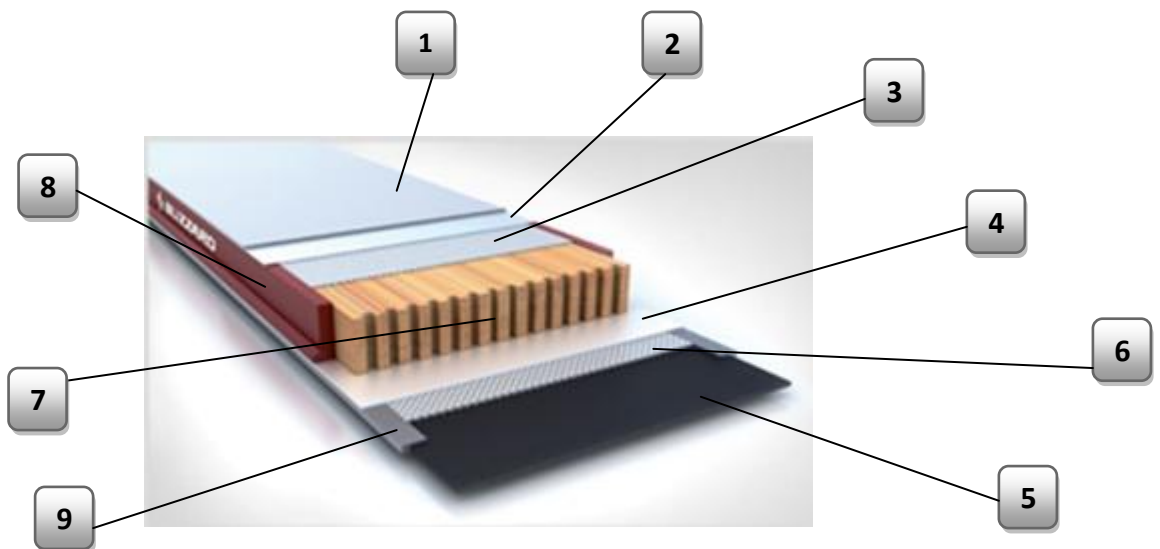


Figura 1.1: Esempio di uno sci realizzato con costruzione sandwich.

Questa costruzione risulta essere la più performante ma allo stesso tempo la più costosa. E' in grado di assicurare elevati livelli di rigidità assiale e torsionale garantendo ottima stabilità e controllo anche alle alte velocità. Naturalmente questo va a scapito della facilità di utilizzo, rendendo questo sci adatto solo a sciatori esperti o agonisti.

Per lo sci assemblato con questa tecnologia, si abbinano materiali ad elevate prestazioni meccaniche disposti nelle zone periferiche dello sci con un'anima generalmente in legno che fa da distanziale. La combinazione di alluminio, materiale composito con fibre ad alto modulo e legno nel core risulta oggi il migliore mix di materiali per conferire allo sci elevate prestazioni e buon controllo.

Dalla figura 1.1 è possibile osservare tutti i componenti di uno sci con costruzione sandwich:

- **Copertura esterna**(1): è lo strato più esterno dello sci. Realizzato in materiale polimerico, il suo compito è quello di proteggere lo sci da eventuali urti e dall'umidità. Essendo la parte più visibile dello sci viene decorato con scritte e grafiche.
- **Alluminio** (2,4): è il primo materiale strutturale che incontriamo procedendo dall'esterno verso l'interno dello sci. Si utilizzano delle lamine di una particolare lega di alluminio studiata per queste applicazioni chiamata Titanal.
- **Materiale composito** (3,6): come si può osservare sono presenti due strati in materiale composito. Vengono utilizzati compositi fibro-rinforzati a matrice polimerica con fibre di vetro, basalto, carbonio, boro, kevlar. Possono esserci più di due strati, con fibre di diverso tipo e con diverse disposizioni.
- **Soletta** (5): la soletta risulta essere la parte dello sci a diretto contatto con le neve; essa viene realizzata in materiale polimerico a basso coefficiente di attrito. ;
- **Lamine** (9): è la parte che deve garantire grip incidendo la neve in curva; il materiale utilizzato è un acciaio C60 che garantisce un buon compromesso tra resistenza all'usura e deformabilità;
- **Fianchetti** (8): noti con il nome di *sidewalls*, il loro compito principale è di proteggere il core da eventuali urti ed incisioni. Un'altra importante funzione è quella di trasmettere la forza esercitata dallo sciatore sulla lamina. Per questo vengono realizzati con particolari tecnopolimeri in grado di garantire rigidità ma allo stesso tempo resistenza agli urti.
- **Legno** (7): tutt'oggi risulta essere il miglior riempitivo per la realizzazione di sci. È in grado di offrire una naturale reattività che nessun materiale sintetico è in grado di offrire. Si utilizza un mix di legni in funzione delle caratteristiche che vogliamo ottenere dallo sci: legni morbidi come faggio e pioppo, legni duri come l'abete rosso. Il

suo compito è quello di distanziare i materiali strutturali in modo da aumentare la rigidità dello sci.

1.5.Costruzione Cap

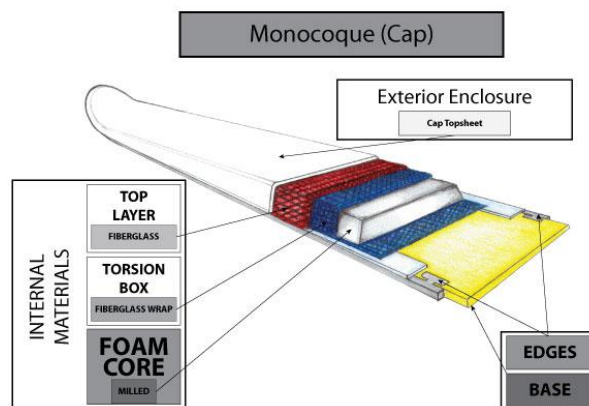


Figura 1.2: Rappresentazione schematica di uno sci realizzato con costruzione cap.

La costruzione cap è una soluzione introdotta da alcuni costruttori a partire dagli anni 1989-1990 e tutt'ora ampiamente utilizzata soprattutto per la produzione di sci commerciali con cuore schiumoso. Questa costruzione nasce dalla necessità di ottenere degli sci facili da condurre, caratterizzati da valori di rigidità flessionale inferiori rispetto a una struttura tradizionale sandwich, ma comunque in grado di garantire un adeguato livello di stabilità torsionale. Consiste nel ricoprire il cuore, in materiale schiumoso o legno rinforzato con lastre di alluminio, con una sorta di "conchiglia" in materiale fibro-rinforzato, generalmente fibra di vetro. La copertura agisce come una "scatola di torsione" garantendo alta rigidità torsionale, ma allo stesso tempo un basso incremento di rigidità flessionale. La semplicità costruttiva insieme alla facilità di utilizzo dello sci sono sicuramente i punti di forza di questa soluzione, necessariamente a discapito della prestazioni.

1.6. Comportamento dinamico di uno sci

Il rapporto *flessione-torsione*, abbinato alla geometria (sciancratura) determinano la specificità di uno sci. Tutt'ora non sono stati ancora trovati dei valori ottimali di rigidità per le varie tipologie di sci (slalom speciale, slalom gigante e discesa libera) che garantiscano il massimo delle prestazioni. Infatti le condizioni della neve hanno una forte influenza su questi parametri, tuttavia esistono dei principi fondamentali che legano il rapporto tra rigidità torsionale/flessionale con il comportamento dello sci.

Durante il loro utilizzo gli sci vengono sottoposti a sollecitazioni meccaniche che ne alterano in parte la normale geometria. Sollecitazioni di *flessione* e *torsione* influiscono sul valore del raggio di curvatura statico.

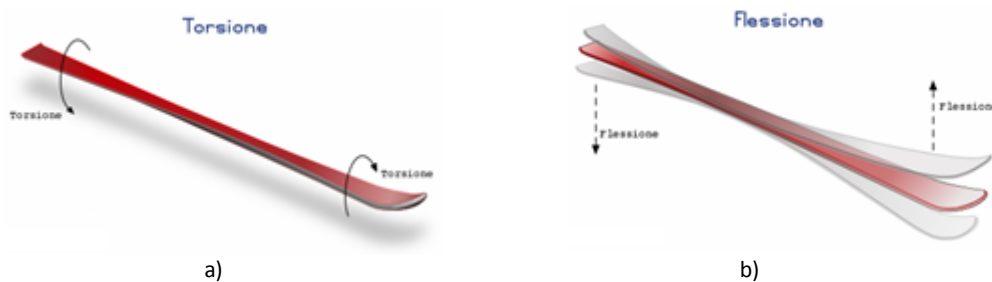


Figura 1.3: a) Sci sottoposto a sollecitazioni torsionali; b) Sci sottoposto a sollecitazioni flessionali.

Sci facilmente deformabili flessionalmente permettono di chiudere agevolmente l'arco di curva alle basse velocità, possiedono grande manovrabilità e smorzamento delle reazioni del terreno in caso di movimenti non corretti: questo facilita il gesto motorio dello sciatore in evoluzione. Questo tipo di sci ha il suo limite nel perdere progressivamente stabilità e controllo all'aumentare della velocità e dei carichi. Sono attrezzi propedeutici e fanno parte della categoria di sci destinati al principiante o a un pubblico che ricerca l'assoluta facilità di impiego.

Sci con maggiore rigidità flessionale sono necessari in presenza di nevi dure e all'aumentare della velocità: in queste condizioni infatti la lamina tende a perdere la conduzione in curva e tende a scivolare sotto l'azione delle forze centrifughe, avviando una "derapata" fenomeno indesiderato dallo sciatore esperto. In queste condizioni si nota che all'aumentare della rigidità lo sci tende ad avere una maggiore penetrazione nella neve permettendo di chiudere agevolmente l'arco di curva in conduzione, sempre se il gesto tecnico della conduzione viene eseguito in maniera corretta. Questi sci mantengono traiettoria e stabilità con l'aumento dei

carichi e velocità; sono attrezzi destinati a sciatori esperti che ricercano la prestazione nel gesto atletico.

La rigidità a torsione aumenta la reattività e velocizza il cambio di spigolo (necessario nelle gare di slalom speciale).

Minore rigidità a torsione abbinata ad un ritorno graduale della flessione favoriscono il controllo del cambio di spigolo ed aumentano la gestibilità del trasferimento dei carichi a velocità elevate su ampi archi di curvatura, fondamentale nelle discipline veloci.

CAPITOLO 2

I pannelli sandwich

2.1.Generalità

Una struttura sandwich è un composito strutturale, costituito da due strati esterni, detti *pell*i, distanziati da un materiale connettivo che prende il nome di *core*. Il core è in genere un materiale leggero e poco resistente, la cui unica funzione è di distanziare e collegare le pelli, di materiale dalle elevate caratteristiche meccaniche e di spessore ridotto.

Il concetto di struttura sandwich trova la sua primaria giustificazione nel notevole incremento di rigidezza flessionale di tale configurazione strutturale rispetto a una trave semplice.

Infatti la rigidezza flessionale di una trave, è direttamente proporzionale al momento d'inerzia della sezione della trave rispetto all'asse neutro. Tale momento d'inerzia aumenta esponenzialmente all'aumentare della distanza del materiale dall'asse neutro, motivo per il quale le travi che ottimizzano la resistenza a flessione sono quelle a doppia T. Lo stesso principio della trave a doppia T sta alla base del concetto di sandwich, in cui le pelli sono collegate da diverse soluzioni strutturali a bassa densità (schiume, legno, honeycomb), per cui l'incremento di rigidezza flessionale conseguente all'allontanamento delle pelli viene accompagnata da un esiguo incremento in peso.

In campo sciistico l'utilizzo di pannelli sandwich non è dovuto solo alla ricerca di elevate prestazioni in termini di resistenza¹ e rigidezza² specifiche, come lo è per altri settori come quello aeronautico, automobilistico ecc., ma anche per il fatto che la struttura sandwich permette grandi variazioni di rigidezza flessionale/torsionale agendo semplicemente sullo spessore del core. Questo è un punto fondamentale per questo settore in quanto all'interno dello stesso sci è necessario avere rigidezze differenti e questo è facilmente ottenibile con una struttura sandwich agendo sulla distanza tra le pelli.

¹ Resistenza specifica: è il rapporto tra un parametro di resistenza del componente e la sua densità.

² Rigidezza specifica: è il rapporto tra un parametro di rigidezza del componente e la sua densità.

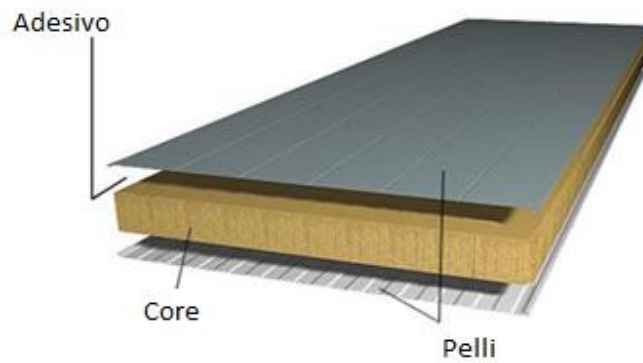


Figura 2.1: Pannello sandwich.

2.2. Effetto sandwich

Le considerazioni fatte fin qui hanno una loro validità nel momento in cui sia presente un effettivo collegamento tra le due pelli che impedisce uno scorrimento relativo determinando una sorta di “coazione” che può essere nominato come effetto “sandwich”. Perché questo si verifichi il core e il collante devono presentare una certa resistenza a taglio, che risulta massimo nella zona centrale del pannello come si dimostrerà nel paragrafo 2.4.1. L'importanza del taglio può essere messa in luce analizzando un esempio: si vanno a confrontare le rigidezze di due travi con stesse dimensioni e stesso materiale appoggiate alle estremità e caricate in mezzzeria (flessione a tre punti); nel primo caso la trave è costituita da due elementi semplicemente appoggiati, nel secondo da due elementi perfettamente solidali.

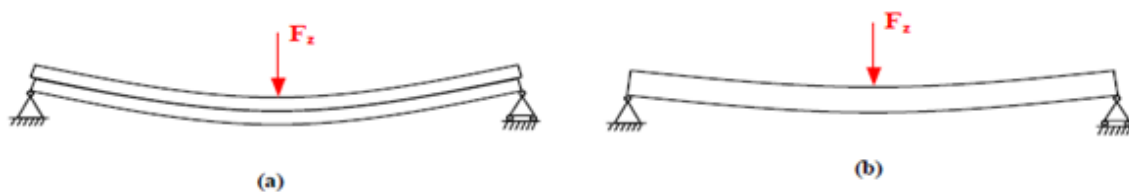


Figura 2.2: (a) travi semplicemente appoggiate; (b) travi incollate.

Nel caso (a) le due travi lavorano in parallelo quindi la rigidezza flessionale complessiva sarà pari alla somma delle singole rigidezze:

$$(EI)_a = 2 \cdot E \cdot \frac{1}{12} \cdot b \cdot \left(\frac{h}{2}\right)^3 = \frac{1}{48} \cdot E \cdot b \cdot h^3 \quad (2.1)$$

$$(EI)_b = \frac{1}{12} \cdot E \cdot b \cdot h^3 \quad (2.2)$$

Si può notare come nel caso (b) la rigidezza risulti 4 volte maggiore grazie alla nascita di tensioni tangenziali che permettono alle due travi di lavorare come un corpo unico.

2.3. Analisi del comportamento meccanico

E' possibile ora ricavare delle relazioni per la determinazione delle rigidzze flessionali e a taglio di una trave sandwich. I parametri geometrici che entrano nell'analisi sono:

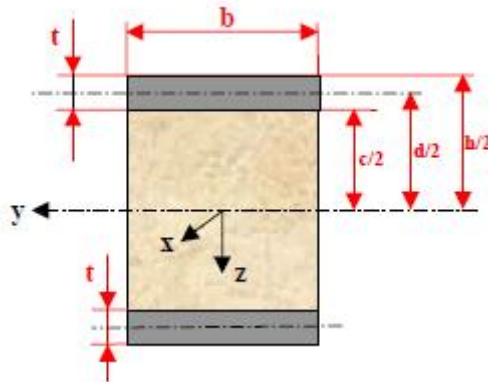


Figura 2.3: Sezione trasversale di un pannello sandwich

- b larghezza della trave [mm];
- c spessore del core [mm];
- d distanza tra i baricentri delle pelli [mm];
- l lunghezza della trave [mm];
- δ abbassamento centrale [mm];
- t spessore delle pelli [mm];

Tabella 2.1: Proprietà dei materiali necessarie per la trattazione

	Lamine	Core	Core solido
Densità [kg/m ³]	ρ_f	ρ_c^*	ρ_s
Modulo di Young [GPa]	E_f	E_c^*	E_s
Modulo a taglio [GPa]	—	G_c^*	—
Carico di snervamento [MPa]	σ_{yf}	σ_{yc}^*	σ_{ys}

Si assume che i moduli di resistenza del core dipendano dalla densità della schiuma secondo le seguenti relazioni:

$$E_c^* = C_1 \cdot E_s \cdot \left(\frac{\rho_c^*}{\rho_s} \right)^2 \quad (2.3)$$

$$G_c^* = C_2 \cdot E_s \cdot \left(\frac{\rho_c^*}{\rho_s} \right)^2 \quad (2.4)$$

Dove $C_1 \approx 1$ e $C_2 \approx 0,4$ sono costanti di proporzionalità. La rigidezza flessionale della trave sandwich risulta:

$$(EI)_{eq-y} = 2 \cdot \left[E_f \cdot \left(\frac{b \cdot t^3}{12} \right) \right] + E_c^* \cdot \left(\frac{b \cdot c^3}{12} \right) + 2 \cdot E_f \cdot \left(b \cdot t \cdot \frac{d^2}{4} \right) \quad (2.5)$$

Il primo e il secondo termine rappresentano rispettivamente la rigidezza flessionale delle pelli e del core riferiti ai rispettivi baricentri, mentre il terzo deriva dall'applicazione del teorema di Steiner.

Generalmente essendo $d \gg t$ ed $E_c^* \ll E_f$ il primo e il secondo termine della precedente relazione possono essere trascurati ottenendo una relazione semplificata della rigidezza flessionale. Assumendo $d \approx c$ si ottiene:

$$(EI)_{eq} = \frac{E_f \cdot b \cdot t \cdot c^2}{2} \quad (2.6)$$

L'equazione della rigidezza equivalente a taglio risulta:

$$(AG)_{eq} = \frac{b \cdot d^2 \cdot G_c^*}{c} \quad (2.7)$$

dove assumendo $d \approx c$ risulta:

$$(AG)_{eq} = b \cdot c \cdot G_c^* \quad (2.8)$$

Quando il carico P è applicato alla trave, essa subisce una deformazione, in particolare subisce un abbassamento δ somma del contributo dovuto a taglio e del contributo dovuto all'azione flettente:

$$\delta = \delta_b + \delta_s = \frac{P \cdot l^3}{B_1 \cdot (EI)_{eq}} + \frac{P \cdot l}{B_2 \cdot (AG)_{eq}} \quad (2.9)$$

Usando le equazioni (2.9), (2.6) e (2.8) si può ottenere la cedevolezza della trave:

$$\frac{\delta}{P} = \frac{2 \cdot l^3}{B_1 \cdot E_f \cdot b \cdot t \cdot c^2} + \frac{1}{B_2 \cdot b \cdot c \cdot G_c^*} \quad (2.10)$$

dove B_1 e B_2 sono costanti che dipendono dalla tipologia del carico. Nella seguente tabella si riportano alcuni valori di B_1 e B_2 relativi alle condizioni di carico più comuni:

Tabella 2.2

Modalità di carico	B₁	B₂
Trave a sbalzo con carico all'estremità	3	1
Trave a sbalzo con carico uniformemente distribuito q=P/l	8	2
Trave su 2 appoggi con carico in mezzeria	48	4
Trave su due appoggi con carico uniformemente distribuito q=P/l	$\frac{384}{5}$	8

2.4. Resistenza e modalità di rottura di un pannello sandwich

L'ovvia attrazione di una struttura sandwich è la sua rigidità ma allo stesso tempo anche la sua leggerezza. La rigidità da sola però non basta, infatti la trave deve essere resistente: essa deve sopportare i carichi per la quale è stata progettata senza arrivare a rottura.

2.4.1. Distribuzione delle tensioni

Prima di analizzare le modalità di rottura è opportuno andare ad indagare gli stati tensionali presenti nelle pelli e nel core. La distribuzione delle tensioni normali derivanti dall'applicazione di un momento flettente M alla trave può essere calcolata tramite Navier:

- **Tensione normale pelli:**

$$\sigma_f = \frac{M}{I} \cdot y = \frac{M \cdot E_f}{(EI)_{eq}} \cdot y \quad (2.11)$$

$$\sigma_{f-max} = \frac{M}{b \cdot t \cdot c} \quad \text{con } y = \frac{c}{2} \quad (2.12)$$

- **Tensione normale core:**

$$\sigma_c = \frac{M}{I} \cdot y = \frac{M \cdot E_c^*}{(EI)_{eq}} \cdot y \quad (2.13)$$

$$\sigma_{c-max} = \frac{M}{b \cdot t \cdot c} \cdot \frac{E_c^*}{E_f} \quad \text{con } y = \frac{c}{2} \quad (2.14)$$

Il valore di tensione normale nel core è molto basso rispetto al valore presente nelle pelli e spesso viene trascurato assumendo uno stato tensionale semplificato come rappresentato in figura 2.4.

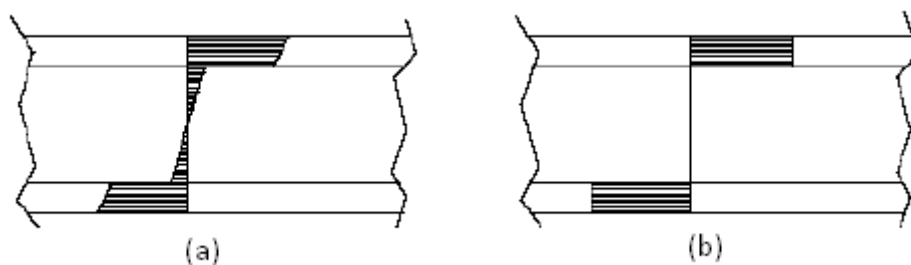


Figura 2.4: a) Andamento delle tensioni normali reali; b) Andamento delle tensioni normali semplificato.

L'andamento della tensione tangenziale di taglio può essere ottenuto applicando Jourawsky tenendo conto dei diversi moduli di elasticità. Si ottiene un andamento parabolico differente tra pelli e core con un massimo in corrispondenza dell'asse neutro; in realtà essendo lo spessore delle pelli molto piccolo rispetto allo spessore del core si può assumere che il taglio sia costante in tutto il core e che vari linearmente nelle pelli:

$$\tau_c = \frac{T}{b \cdot c} \quad (2.15)$$

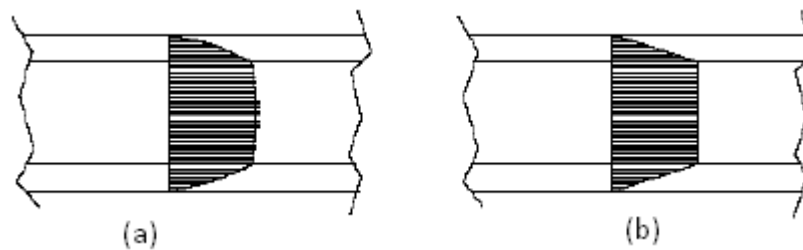


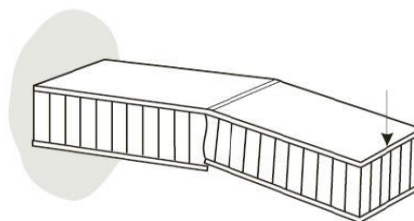
Figura 2.5: a) Andamento delle tensioni tangenziali reale; b) Andamento delle tensioni tangenziali semplificato

Come si può osservare dalle figure (2.4) e (2.5) le distribuzioni di tensioni sono praticamente riconducibili a quelle di una trave a doppia T, conferma del fatto che il pannello sandwich è una struttura che massimizza la resistenza a flessione.

2.4.2. Modalità di rottura

Un pannello sandwich può arrivare a cedimento con sei principali modalità a seconda delle condizioni di carico in esercizio e della geometria del pannello. In fase di progettazione dovrà essere individuata quella che più minaccia il nostro pannello in modo tale da prendere dei provvedimenti per scongiurare una rottura prematura.

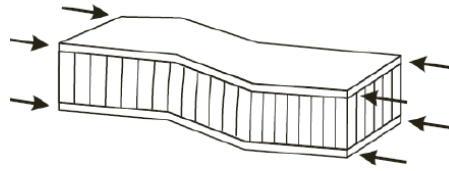
- **Cedimento per rottura a trazione o compressione delle pelli**



Questa rottura si verifica quando la tensione normale nelle pelli eguaglia la tensione di snervamento σ_y del materiale stesso. E' dovuta principalmente ad uno spessore delle pelli troppo ridotto.

$$\sigma_{f-max} = \frac{M}{b \cdot t \cdot c} \geq \sigma_y$$

- **Cedimento del core**



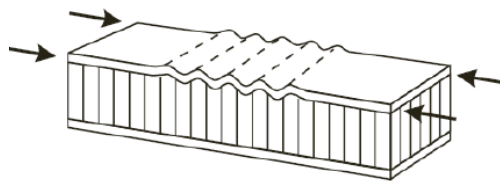
In un core con comportamento elasto-plastico avviene quando le tensioni tangenziali di taglio τ_c nel core eguaglia la tensione tangenziale di snervamento del core stesso:

$$\tau_c = \frac{T}{b \cdot c} \geq \tau_y$$

Nel caso in cui si abbia un core a comportamento fragile il meccanismo di rottura è differente e si dovrà confrontare la tensione massima principale σ_1 con la tensione di snervamento σ_y del core; si avrà rottura se :

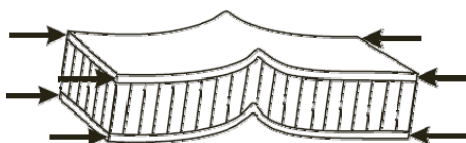
$$\sigma_1 = \tau_c = \sigma_y$$

- **Cedimento per instabilità delle pelli**



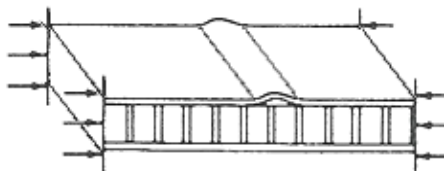
Per effetto di elevate tensioni di compressione sulle pelli si possono verificare locali fenomeni di instabilità con formazione di grinze. Questo può essere provocato dalle eccessive dimensioni delle celle e spessore troppo ridotto delle pelli.

- **Cedimento per instabilità della struttura a carichi di compressione**



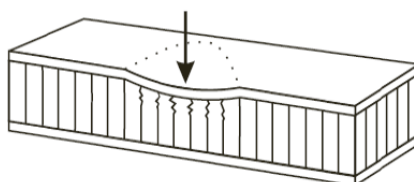
Il cuore e le pelli devono avere uno spessore tale da evitare fenomeni di instabilità quando la struttura è soggetta ad un carico di punta.

- ***Cedimento del collegamento adesivo tra pelli e core***



Consiste nel parziale o completo distacco delle lamine dal core; in passato questa è stata la causa di numerose perdite di aerei militari. Con l'utilizzo di adesivi epossidici, che sono generalmente più resistenti del core stesso, se l'incollaggio è ben fatto il distacco è raramente un problema. Il problema nasce nel momento in cui nello strato di adesivo è presente una cricca o un difetto il quale tende a propagare una volta che la trave si trova sotto carico.

- ***Cedimento per rottura a compressione locale del core***



Questo fenomeno si verifica quando si è in presenza di un carico concentrato in un'area molto piccola. Il problema può essere facilmente superato garantendo che il carico sia applicato in un'area minima pari a:

$$A = \frac{P}{\sigma_y}$$

dove σ_y è la resistenza a compressione del core.

2.5.Ottimizzazione della progettazione con sandwich: rigidezza, resistenza e peso

In questa parte si svilupperà una strada per ottimizzare una struttura sandwich: è possibile pensare di minimizzare il peso di una struttura per un dato valore di rigidezza P/δ . Questa è un'operazione molto importante per esempio per lo sci da alpinismo in cui il peso è una componente molto importante in fase di progettazione. La nostra funzione obiettivo è il peso della trave W :

$$W = 2 \cdot \rho_f \cdot g \cdot b \cdot l \cdot t + \rho_c^* \cdot g \cdot b \cdot l \cdot c \quad \text{dove } g \text{ è l'accelerazione di gravità.} \quad (2.16)$$

Nel caso in cui siano noti i materiali di realizzazione sia del core che delle pelli, la lunghezza della trave l , la larghezza b le uniche variabili risultano essere t e c . La procedura consiste nel ricavare t dall'equazione (2.10), sostituirlo dentro alla funzione obiettivo (2.16) e minimizzarla rispetto all'unica variabile rimasta c ponendo la derivata $dW/dc = 0$. Si ricava così c_{opt} il quale una sostituito all'interno dell'equazione (2.10) ci permette di ricavare lo spessore ottimale delle pelli t_{opt} .

Quello descritto risulta essere un modo adatto ad una prima progettazione di massima, in quanto non si tiene conto degli stati tensionali che si vengono a creare e quindi di eventuali cedimenti secondo una delle modalità precedentemente elencate.

Un metodo più efficace che ci permette una progettazione più dettagliata è il metodo grafico illustrato in figura (2.4): si supponga sempre di dover progettare una trave di cui conosciamo i materiali sia del core che delle pelli e i valori di carico P e di rigidezza P/δ ; ancora una volta le uniche variabili di progetto sono lo spessore delle lamine t e lo spessore del core c .

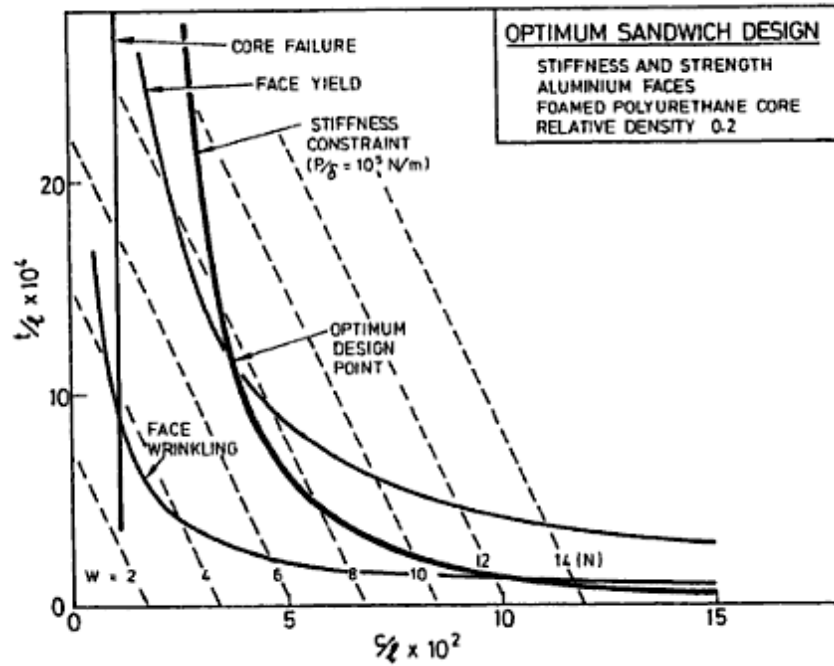


Figura 2.6: Grafico utilizzato nel metodo di ottimizzazione.

La famiglia di linee tratteggiate descrive l'andamento della funzione obiettivo (2.16), mentre la linea continua marcata rappresenta il vincolo di rigidità derivante da un dato P/δ . Sovrapposte a queste linee sono presenti le linee rappresentanti le principali modalità di rottura per un fissato valore del carico P .

I vincoli di progettazione risultano ovvi dall'osservazione della figura (2.6): per i valori scelti di P/δ e P essi sono rigidità e limite di snervamento delle lamine, di conseguenza il punto ottimale è rappresentato dall'intersezione delle due linee. A questo punto lo spessore ottimale delle lamine $(t/l)_{opt}$, lo spessore del core $(c/l)_{opt}$ e W_{opt} possono essere facilmente estrapolati dal grafico. Naturalmente se i parametri di progetto P e P/δ variano varierà la posizione relativa tra le due curve e di conseguenza la posizione del punto ottimale.

Il metodo grafico risulta essere un metodo molto pratico e funzionale, in quanto in un unico grafico c'è la possibilità di visualizzare oltre che al punto ottimale di progetto anche il suo posizionamento rispetto a tutte le varie modalità di rottura.

CAPITOLO 3

I materiali polimerici presenti nello sci

3.1. Generalità sui materiali polimerici

Si definiscono materiali polimerici delle sostanze macromolecolari, ottenute dalla ripetizione di un particolare raggruppamento di atomi (“unità ripetitiva”), caratteristico del polimero stesso. La gran parte dei polimeri oggi utilizzati viene prodotta per sintesi, a partire da molecole di basso peso molecolare (“monomeri”), mentre solo una minima parte viene ottenuta con processi chimici a partire da sostanze naturali. I materiali polimerici, per le loro doti di leggerezza, facilità di formatura e di lavorazione, costo in genere contenuto, vengono utilizzati in innumerevoli applicazioni ingegneristiche, spesso in sostituzione di materiali più tradizionali. Le proprietà meccaniche dei polimeri possono variare entro un ampio spettro, ma in genere sono piuttosto modeste: tipicamente il modulo elastico a trazione è dell’ordine di alcuni GPa, la resistenza a trazione compresa tra i 10 e gli 80 MPa.

3.2. Classificazione dei materiali polimerici

Una prima classificazione dei polimeri è in base alla morfologia delle macromolecole che lo costituiscono, che possono essere:

- Lineari;
- Ramificate;
- Reticolate.

La morfologia delle macromolecole determina il comportamento termo-meccanico del polimero stesso. Questo dà origine alla più importante classificazione dei materiali polimerici:

- I **polimeri termoplastici**, a loro volta suddivisibili in cristallini e amorfi³;
- I **polimeri termoindurenti**;
- Gli **elastomeri**.

³ Amorfi: le macromolecole sono disposte disordinatamente nello spazio.

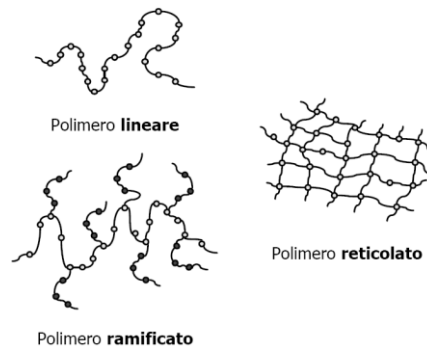


Figura 3.1: Rappresentazione delle tre tipologie di macromolecole.

3.2.1. Termoplastici

I polimeri termoplastici sono costituiti da lunghe macromolecole all'interno delle quali gli atomi sono collegati tra loro mediante legami covalenti. Tali macromolecole, che possono essere lineari o ramificate, sono completamente indipendenti allo stato fuso o di soluzione, mentre allo stato solido sono tenute insieme da legami secondari deboli come del tipo idrogeno o di Van der Waals.

Riscaldando un polimero termoplastico i legami secondari vengono progressivamente distrutti rendendo le macromolecole sempre più indipendenti, con possibilità di scorrimento reciproco determinando così un comportamento visco-elastico funzione della temperatura tipico di questo tipo di polimeri. Grazie a questa proprietà il materiale fuso può essere formato o riformato per ottenere un pezzo finito con tecniche quali l'estrusione o lo stampaggio ad iniezione. È importante sottolineare che i polimeri a catena lineare hanno in genere proprietà meccaniche inferiori a quelle dei polimeri a catena ramificata perché quest'ultimi, grazie alla conformazione strutturale delle catene, scorrono con maggiore difficoltà a causa degli impedimenti fisici che si generano.

In generale, se il raffreddamento dallo stato fuso avviene molto lentamente, si favorisce la cristallizzazione del polimero, cioè la formazione di una struttura in cui le macromolecole assumono una disposizione ordinata nello spazio. Tuttavia l'elevato aggrovigliamento delle catene allo stato fuso, impediscono una totale cristallizzazione: il polimero ottenuto sarà perciò semicristallino (al massimo 95-96% di cristallinità), costituito da zone cristalline collegate da zone amorfe.

Molti materiali termoplastici sono invece completamente amorfi ed incapaci di cristallizzare anche se raffreddati molto lentamente. I polimeri amorfi sono caratterizzati dalla loro temperatura di transizione vetrosa T_G , alla quale passano dallo stato vetroso (duro e rigido) allo stato gommoso (tenero e altamente deformabile).

Le proprietà meccaniche e fisiche dei materiali termoplastici sono molto influenzate dal grado di cristallinità: in particolare all'aumentare della cristallinità i polimeri diventano più rigidi, più duri, meno duttili, più densi e più resistenti a calore e solventi. Dal punto di vista delle proprietà ottiche i termoplastici amorfi possono essere completamente trasparenti mentre quelli cristallini sono opachi, a causa della riflessione della luce provocata nelle interfacce tra le regioni cristalline e quelle amorfie.

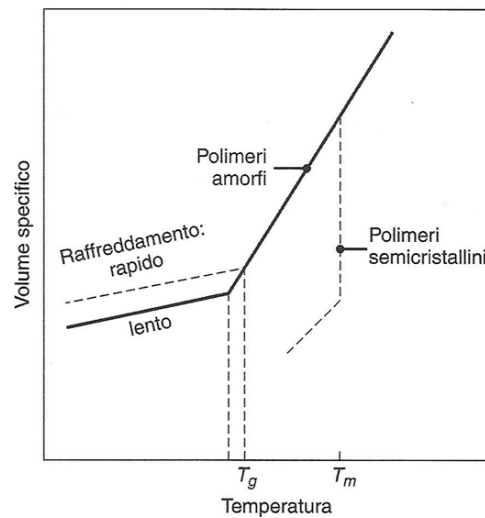


Figura 3.2: Variazioni del volume specifico in funzione della temperatura di polimeri amorfi e semicristallini.

3.2.2. Termoidurenti

I polimeri termoidurenti sono materiali rigidi in cui non si hanno catene lineari bensì una struttura reticolata, costituita da catene collegate trasversalmente in modo da formare un reticolo tridimensionale. Essendoci nella struttura solo legami covalenti, un polimero termoidurente risulta infusibile e insolubile, e una volta formato, non può più essere rifuso, anzi l'azione del calore porta a un progressivo degradamento del polimero stesso. A causa della natura dei loro legami, le caratteristiche di resistenza e di durezza dei termoidurenti sono quelle tipiche di un materiale elastico, e al contrario di quelle dei termoplastici, non sono influenzate dalla temperatura o dalla velocità di deformazione. Le proprietà meccaniche, termiche e chimiche risultano generalmente migliori di quelle dei termoplastici.

3.2.3.Elastomeri

Con il termine elastomero viene definito un materiale in grado di recuperare in modo sostanziale le dimensioni e la forma originaria dopo che un carico, ad esso applicato, è stato rimosso. Gli elastomeri comprendono una grande famiglia di polimeri amorfi che presentano le seguenti caratteristiche:

- Bassa temperatura di transizione vetrosa;
- Grande capacità di deformazione sotto carico senza arrivare a rottura (la lunghezza finale può essere da 3 a 10 volte quella iniziale);
- Basso modulo elastico.

La grande capacità di deformazione deriva dal fatto che la struttura di questi polimeri è altamente attorcigliata: sotto carico le macromolecole si stirano ma una volta rimosso tornano alla loro forma originale. Il rapido ritorno spesso è favorito dal fatto che questi polimeri subiscono un processo di vulcanizzazione, che consiste nella creazione di alcuni punti di reticolazione i quali agiscono da molle di richiamo, impedendo alle catene di traslare irreversibilmente l'una rispetto all'altra.

E' importante sottolineare che questi materiali sono soggetti al fenomeno dell'isteresi elastica rappresentato in figura 3.3: in un ciclo di trazione-compressione è possibile notare come i due percorsi non coincidano ma ci sia una certa area racchiusa tra le due curve. L'area rappresenta l'energia immagazzinata dal materiale la quale sarà dissipata sotto forma di calore; questa proprietà è ricercata per assorbire l'energia delle vibrazioni e per isolare acusticamente.

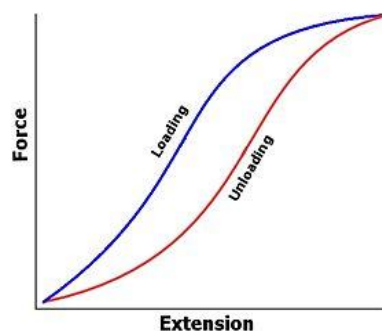


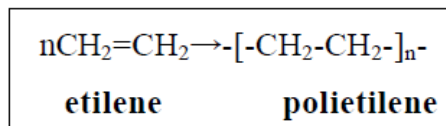
Figura 3.3: Ciclo di isteresi elastica

3.3.I materiali polimerici nello sci

La continua ricerca nel campo dei materiali polimerici ha portato nel corso degli anni allo sviluppo di polimeri in grado di soddisfare le difficili condizioni di esercizio presenti in campo sciistico: resistenza all'urto, resistenza all'abrasione, resistenza alle basse temperature sono requisiti fondamentali. Componenti realizzati in materiale polimerico sono principalmente le solette, i fianchetti e la copertura protettiva esterna. Seguirà un elenco ed un'analisi dei principali polimeri impiegati in questo settore.

3.4.II Polietilene

Il polietilene (PE) è il più semplice tra i polimeri termoplastici sintetici ed è la più comune tra le materie plastiche. E' un polimero ottenuto dal monomero ETILENE:



Le macromolecole di PE sono lineari, ma possono essere presenti ramificazioni la cui origine dipende dal processo di sintesi: tali ramificazioni condizionano la cristallinità, la densità e le proprietà meccaniche (durezza, rigidità), la trasparenza, la permeabilità ai gas del materiale in quanto incidono sulla possibilità di impaccamento delle catene. In generale all'aumentare delle ramificazioni delle macromolecole corrisponde una diminuzione del grado di cristallinità. Da questo deriva che il polietilene è un solido semicristallino a densità variabile tra 0.855 g/cm³, corrispondente al polimero completamente amorfo, e 1.000 g/cm³, relativa al polimero completamente cristallino. Una prima classificazione prevede la distinzione dei vari tipi di PE in base alla densità, come riportato nella seguente tabella:

Tabella 3.1: Classificazione del polietilene in base alla densità.

Nome	Simbolo	Intervallo di densità (g/cm ³)
Low Density PolyEthylene	LDPE	0.910 – 0.925
Linear Low Density PolyEthylene	LLDPE	0.915 – 0.940
High Density PolyEthylene	HDPE	0.942 – 0.970

Esistono poi altri tipi di polietilene che vengono differenziati per il valore di massa molecolare che possono raggiungere:

- **Polietilene ad alto peso molecolare (HMWPE)** che arriva fino a 1.5 milioni di uma⁴.
- **Polietilene ad altissimo peso molecolare (UHMWPE)** che supera il valore di 2 milioni di uma.

3.4.1. Polietilene ad altissimo peso molecolare (UHMWPE)

Il polietilene UHMWPE (*Ultra High Molecular Weight PolyEthylene*) è un polimero termoplastico in grado di assicurare la combinazione tra resistenza all'usura e basso coefficiente d'attrito, proprietà fondamentali per la realizzazione delle solette. La neve secca e il ghiaccio sono infatti dei mezzi molto abrasivi che possono degradare facilmente un polimero comune. Come gli altri tipi di polietilene, è un polimero ad altissimo peso molecolare semicristallino costituito da zone amorfe e zone cristalline: si arriva a valori di cristallinità non elevati, circa 40-60 %, a causa della lunghezza delle macromolecole, fino a 10 volte più lunghe rispetto ai polietilene tradizionali ad alta densità HDPE. Maggiori valori di cristallinità, fino al 95%, possono essere riscontrati nelle fibre di UHMWPE in cui il processo di estrusione favorisce l'allineamento delle macromolecole. Questa particolare struttura molecolare gli conferisce le sue eccezionali proprietà difficilmente trovabili in altri polimeri commerciali:

- elevata resistenza all'usura;
- elevata resistenza all'urto;
- basso coefficiente d'attrito, confrontabile con quello del teflon;
- basso assorbimento d'acqua;

UHMW-PE spesso può risultare un'ottima alternativa a materiali come l'acciaio inossidabile, il legno e a polimeri ingegneristici, come nylon e fluoropolimeri, in applicazioni dove l'usura e la resistenza agli urti sono molto importanti.

Cariche e additivi sono usati frequentemente per modificare le proprietà del UHMW-PE: microsfere di vetro, farina di legno e / o gesso sono i filler più utilizzati. Altri includono fibre di vetro, talco, silicati, carbonati, grafite e alluminio: questi additivi contribuiscono a migliorare la

⁴ Uma: *unità di massa atomica unificata*, è definita come la dodicesima parte di un atomo di carbonio 12.

resistenza a trazione, durezza, densità, resistenza al creep sotto carico e il coefficiente di dilatazione termica.

Nella produzione di UHMW-PE per la realizzazione di solette le cariche più utilizzate sono sicuramente: il nero fumo per migliorare la resistenza alla luce UV; grafite, talco e olio di silicone per ridurre ulteriormente il suo coefficiente di attrito. Il processo di raffreddamento deve avvenire lentamente perché è necessario garantire una elevata cristallinità del polimero; la contrazione di volume, associata alla formazione degli sferuliti⁵ cristallini, dà origine a microvuoti localizzati nelle zone di contatto tra gli sferuliti stessi. Questi microvuoti consentono l'assorbimento delle scioline da parte della soletta..

Oltre al campo sciistico questo materiale trova impiego nell'industria alimentare, farmaceutica ma anche nell'industria chimica, tessile e nel settore della depurazione delle acque reflue.

3.4.2. Tecnologie di trasformazione dell'UHMWPE

L'alta massa molecolare rende l'UHMWPE un materiale difficile da lavorare, in quanto la viscosità, ad una temperatura superiore a quella di fusione, risulta essere molto elevata, impedendo l'utilizzo delle convenzionali tecniche di trasformazione, quali lo stampaggio ad iniezione, soffiaggio e l'estrusione.

Le tecniche adottate per la trasformazione dell'UHMWPE sono:

- ***Ram extrusion***
- ***Stampaggio a compressione***
- ***Stampaggio a compressione diretta***
- ***Sinterizzazione***

Le prime due tecniche producono semilavorati, come barre o lastre, che verranno sottoposti a lavorazioni meccaniche per raggiungere la forma finale. Il prodotto di partenza per i primi tre processi è l'UHMWPE in granuli, mentre per la sinterizzazione la materia prima è polvere di polietilene.

3.4.2.1. Ram extrusion

Malgrado l'alta viscosità della massa fusa, l'UHMWPE può essere comunque lavorato mediante estrusione utilizzando però degli estrusori adatti. Il polimero viene caricato, per mezzo di una tramoggia di carico all'interno dell'estrusore e spinto da un pistone verso la filiera a sezione

⁵ Sferuliti: aggregati pressoché sferici di tante lamelle cristalline tenute insieme da polimero amorfo.

cilindrica; lungo questo tratto l'estrusore è riscaldato a temperature tra i 180 e i 200°C in maniera da fondere il materiale.

Il raffreddamento dei profilati estrusi deve avvenire con estrema cura per evitare l'insorgere di tensioni interne e la formazione di soffiature o cavità. Per ottenere un raffreddamento possibilmente uniforme del profilato estruso si impiegano linee di raffreddamento con una distribuzione della temperatura regolata. Possono essere necessarie linee di raffreddamento di oltre 20 metri di lunghezza. Con questo tipo di tecnica si ottengono in continuo dei profilati di forma cilindrica di diametro compreso tra i 20 e gli 80 mm.

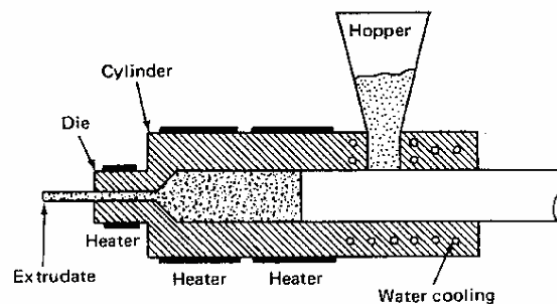


Figura 3.4: Rappresentazione schematica del processo di Ram extrusion

3.4.2.2. Stampaggio a compressione

Il ciclo di stampaggio mediante questa tecnica nota anche come *compression molding* è suddivisibile in due fasi principali. Inizialmente gli stampi contenenti polimero in polvere vengono riscaldati per il tempo necessario ad ottenere la plastificazione omogenea della polvere (circa 200-250°C) imprimendo una pressione di 10 – 20 bar.

Successivamente segue la fase di raffreddamento, in cui lo stampo viene raffreddato progressivamente alla temperatura ambiente per permettere la solidificazione del materiale. La pressione viene aumentata gradualmente a circa 40 bar, in modo da permettere una solidificazione omogenea tra bordi e centro del pezzo stampato. In caso di pressione insufficiente, all'interno del blocco stampato si potrebbero creare cavità, e risucchi in superficie. La velocità di raffreddamento è funzione del grado di cristallizzazione che vogliamo ottenere nel semilavorato finale. In genere, con questo tipo di trasformazione, si ottengono lastre o comunque semilavorati dalle geometrie poco complesse.

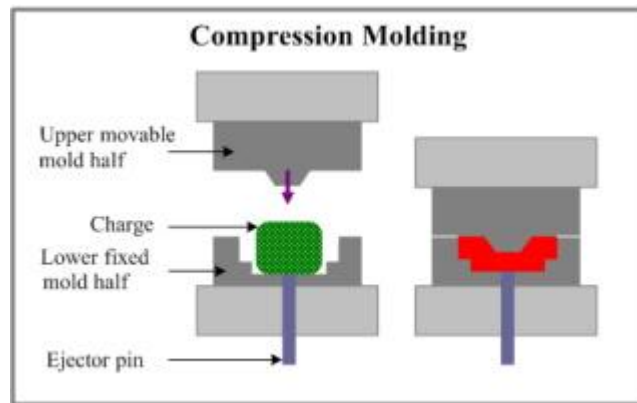


Figura 3.5: Rappresentazione dello stampaggio a compressione

3.2.3. Stampaggio a compressione diretta

Lo stampaggio a compressione diretta noto anche come *direct compression molding* è una variante dello stampaggio a compressione in cui l'UHMWPE viene convertito direttamente nella forma finale. Uno dei grandi vantaggi di questo processo è l'ottenimento di componenti che presentano elevate qualità superficiali con assenza di segni di lavorazione. Grazie alle elevate pressioni che possono essere raggiunte con questo processo si possono ottenere geometrie complesse senza l'ausilio di lavorazioni successive.

Il ciclo di riscaldamento e raffreddamento in questo caso è più breve in quanto i pezzi finiti, generalmente, sono di dimensioni ridotte rispetto ai semilavorati che possono essere ottenuti con i processi precedentemente descritti.

3.2.4. Sinterizzazione

La sinterizzazione (per flusso viscoso) è un processo produttivo attraverso il quale la polvere di polietilene UHMWPE, dapprima miscelata con additivi, viene introdotta in uno stampo di forma cilindrica e successivamente portata a una temperatura tra i 250°C ed i 350°C con una pressione che va dai 5 ai 10 bar a seconda della densità che si intende raggiungere.

Una volta raffreddato, molto lentamente, si ottiene una forma cilindrica che per mezzo di uno sfogliatore viene tagliata nelle misure desiderate. Le solette di alta gamma vengono tutte realizzate con questo processo in quanto permettono di ottenere elevate percentuali di cristallizzazione, sicuramente superiori ai processi di estrusione o compression molding.

3.5.ABS

L'acrilonitrile-butadiene-stirene o ABS è un copolimero termoplastico facente parte dei polimeri "stirenici" derivato dallo stirene polimerizzato insieme all'acrilonitrile in presenza di polibutadiene.

Le proporzioni possono variare dal 15% al 35% di acrilonitrile, dal 5% al 30% di butadiene e dal 40% al 60% di stirene.

L' ABS rappresenta una delle più pregiate mescolanze tra una resina e un elastomero e deve il suo successo alle ottime proprietà tecniche che lo caratterizzano.

5.1.Proprietà dell'ABS

Il vantaggio dell'ABS è quello di unire la resistenza e la rigidità del copolimero amorfo stirene-acrilonitrilene ($\approx 80\%$), allo stato vetroso a temperatura ambiente, con l'elasticità del polibutadiene($\approx 20\%$), anch'esso polimero amorfo ma allo stato gommoso a temperatura ambiente. Si ottiene così un sistema bifasico il cui comportamento tende a modificarsi al variare della temperatura:

- A $T < T_{g-PB}^6$ (tipicamente $< -90^\circ\text{C}$) entrambi i componenti sono vetrosi: il materiale sarà caratterizzato da elevata rigidità e fragilità;
- A $T > T_{g-PB}$, campo termico di normale utilizzo, la matrice è vetrosa mentre la fase dispersa è gommosa: vista la percentuale di PB il materiale conserva resistenza meccanica con modulo di elasticità dell'ordine del GPa;
- A $T > T_{g-SAN}^7$ ($\approx 100^\circ\text{C}$) matrice e fase dispersa sono entrambe gommose con notevole riduzione del modulo elastico che risulta dell'ordine del MPa.

La struttura bifasica permette di ottenere un materiale rigido e tenace anche a basse temperature, molto duro, resistente alle scalfitture, con elevata resistenza all'urto.

Queste caratteristiche lo rendono un ottimo materiale per la realizzazione dei fianchetti e della copertura protettiva degli sci, i quali devono essere resistenti agli urti e alle scalfitture prodotte dalle lamine, ma allo stesso tempo devono essere flessibili per seguire la deformata dello sci stesso. Un'altra importante applicazione dell'ABS è nella realizzazione di prodotti

⁶ T_{g-PB} : temperatura di transizione vetroso del polibutadiene.

⁷ T_{g-SAN} : temperatura di transizione vetroso dello stirene-acrilonitrile

mediante l'utilizzo di macchine per prototipazione rapida che utilizzano tecniche produttive quali la FDM (*Fluid Deposition Modelling*).

3.6.Poliammide (PA)

Le poliammidi sono stati tra i primi polimeri ad essere prodotti industrialmente attorno agli anni trenta. Sono polimeri termoplastici caratterizzati dal legame ammidico (figura 3.6) ottenuto dalla polimerizzazione per condensazione di un acido bicarbossilico e di una diammina. Esse sono disponibili in due forme principali:

- I **nylon**;
- Le **aramidi**, o poliammidi aromatiche cioè ottenute da acido bicarbossilico e da una diammina contenenti al loro interno anelli benzenici. A questa tipologia di poliammidi appartengono il Kevlar e il Nomex i quali saranno discussi ampiamente nel paragrafo dedicato alle fibre aramidiche.

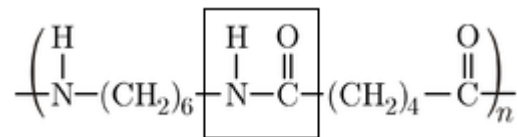


Figura 3.6: Composizione del Nylon 66 con in evidenza il legame ammidico.

Dal punto di vista della caratteristiche generali, le poliammidi presentano durezza e rigidità elevate, buona resistenza agli urti, ottima capacità di smorzamento delle vibrazioni, buona resistenza all'usura, basso coefficiente d'attrito, eccellenti proprietà di lavorabilità.

La tendenza alla cristallizzazione varia a seconda del tipo di poliammide; elevati gradi di cristallinità consentono di ottenere migliori proprietà meccaniche ad eccezione della resistenza agli urti che tende a calare.

Particolari proprietà possono essere raggiunte con l'introduzione di additivi: frequente è l'introduzione di fibra di vetro (fino al 35% in peso) per migliorare rigidità e resistenza, come l'aggiunta di ritardanti di fiamma in applicazioni ad alta temperatura.

In particolare i *nylon* possiedono buone proprietà meccaniche e di resistenza all'abrasione, sono autolubrificanti e resistono alla maggior parte degli agenti chimici. Tutti i nylon sono igroscopici (assorbono acqua) con conseguente riduzione delle proprietà meccaniche.

Le differenti composizioni tra i monomeri di partenza possono essere rilevate anche dai nomi dei diversi prodotti. Per esempio i due tipi di nylon più diffusi, il nylon 6 e il nylon 6.6, contengono nel loro nome l'indicazione del numero di atomi di carbonio contenuti nei monomeri utilizzati nel processo di polimerizzazione: nel primo caso il polimero è ottenuto mediante l'utilizzo di un unico monomero contenente 6 atomi di carbonio, mentre nel secondo si ha a che fare con due monomeri differenti ognuno con 6 atomi di carbonio. Spesso è possibile trovare anche il nylon 6/6.6: in questo caso i numeri stanno ad indicare che si tratta di un copolimero formato da nylon 6 e nylon 6.6.

In particolare, il nylon 66 è caratterizzato da un punto di fusione più alto ($255 \div 260^{\circ}\text{C}$), da una durezza superiore, una buona resistenza all'abrasione, dalla facilità di stampaggio di particolari molto sottili.

Il nylon 6, generalmente più economico, è di facile lavorabilità, ha un punto di fusione leggermente più basso ($217 \div 223^{\circ}\text{C}$), possiede un'ottima resistenza all'urto, è più morbido rispetto al nylon 66.

Le elevate proprietà fisico-meccaniche, consentono l'utilizzo di questi polimeri in svariati campi d'applicazione, tra cui il settore automobilistico (paraurti, alloggiamenti fari, corpi centraline), quello meccanico (ruote dentate, cuscinetti a strisciamento) e nell'industria tessile (abbigliamento sportivo).

In campo sciistico la poliammide è utilizzata nella realizzazione della copertura esterna ma anche nella realizzazione di particolari degli attacchi.

3.6.1. Tecnologie di trasformazione

Le poliammidi possono essere facilmente stampate ad iniezione, per soffiaggio e con il sistema rotazionale. Per estrusione, vengono realizzati anche film, lastre, barre, tondi, tubetti .

Le poliammidi in polvere vengono usate anche per rivestimenti protettivi, come polveri termoadesive o in soluzione come collanti, impermeabilizzanti, ecc. I semilavorati, lastre, barre, tondi possono essere lavorati con lavorazioni per asportazione di truciolo con estrema facilità.

3.7. Polioossimetilene (POM)

Il polioossimetilene noto anche come resina acetalica o con il nome commerciale di Derlin è un polimero termoplastico dalle elevate prestazioni con una combinazione unica di resistenza al creep, rigidità, durezza, resistenza all'usura e resistenza a fatica mantenute fino a temperature di -40°C.

POM è un polimero semicristallino (75 - 80% di cristallinità) che a seconda del processo produttivo può trovarsi sotto forma di omo-polimero o di co-polimero:

- **Omo-polimero** è ottenuto dalla sola polimerizzazione della formaldeide; Derlin ne è un tipico esempio;
- **Co-polimero** è ottenuto dalla polimerizzazione della formaldeide convertita in triossano alla quale viene aggiunto diossolano, anch'esso composto ottenuto dalla formaldeide.

Generalmente i co-polimeri non raggiungono le stesse proprietà meccaniche offerte dagli omo-polimeri. Omo-polimeri risultano significativamente migliori dei copolimeri nella loro durezza a temperature elevate (2x), resistenza alla fatica (100x) e nell'allungamento a snervamento (2x). L'omo-polimero presenta però un problema di porosità a causa di gas che si formano in fase di produzione: la presenza di porosità può influenzare l'assorbimento di umidità da parte del materiale.

Spesso possono essere aggiunte fibre di vetro o Kevlar per aumentare la resistenza e la rigidità; teflon può essere aggiunto per diminuire il coefficiente d'attrito.

POM, in forma di omo-polimero, ha molte applicazioni negli sport invernali grazie alla sua combinazione di elevata cristallinità, quindi elevate proprietà meccaniche, e bassa temperatura di transizione vetrosa. In particolare nello sci viene utilizzato per la produzione delle piastre porta attacchi e degli attacchi, applicazioni in cui resistenza all'usura e resistenza alla fatica sono molto importanti.

Viene inoltre impiegato per la realizzazione di particolari meccanici grazie alla sua elevata stabilità dimensionale: applicazioni tipiche sono cuscinetti, guide, leve, pezzi di precisione, ingranaggi con bassi moduli.

3.7.1. Tecnologie di trasformazione

Polioossimetilene è fornito in granuli e può essere formato nella forma desiderata mediante l'applicazione di calore e pressione. I due metodi più comunemente impiegati sono stampaggio ad iniezione ed estrusione.

Le applicazioni tipiche dello stampaggio ad iniezione sono per la produzione di componenti di elevate precisioni (ad esempio ruote dentate, attacchi da sci, sistemi di serratura). POM è comunemente estruso in continuo per l'ottenimento di barre o lamine a sezione costante destinate a successive lavorazioni alle macchine utensili o a processi di termoformatura.

Questo materiale infatti presenta ottime caratteristiche di lavorabilità, quindi lavorazioni di tornitura, fresatura, foratura sono molto impiegate quando i numeri di produzione non giustificano l'acquisto di uno stampo dedicato o quando il componente presenta complessità troppo elevata.

3.8. Matrici termoindurenti per materiali compositi

Tipicamente i polimeri impiegati come matrici per materiali compositi sono quelli termoindurenti (chiamati anche resine) i quali oltre a garantire migliori proprietà meccaniche, garantiscono una maggiore stabilità termica e una maggiore resistenza chimica. Tali resine sono disponibili in forma parzialmente polimerizzata e si presentano liquide o pastose a temperatura ambiente. Le fibre vengono immerse nella resina e solo successivamente viene completata la polimerizzazione raggiungendo uno stato solido. Il processo può essere velocizzato tramite la somministrazione di calore.

I principali svantaggi sono legati alla loro natura fragile che porta ad avere limitata deformabilità nel componente finale.

3.8.1. Resina epossidica

È uno dei materiali polimerici più impiegati per la realizzazione di compositi fibro-rinforzati.

Le sue principali caratteristiche sono l'eccellente adesione alle fibre nonché le ottime proprietà meccaniche e la grande resistenza ad agenti chimici e solventi. I reagenti principali della resina epossidica sono liquidi organici a basso peso molecolare che contengono un certo numero di gruppi epossidici, anelli composti da un atomo di ossigeno e da due atomi di carbonio.

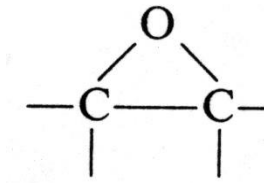


Figura 3.7: Gruppo epossidico

Il prepolimero epossidico, solitamente, è un fluido viscoso, la cui viscosità dipende dal grado di polimerizzazione.

Alla suddetta miscela, che in termini di composizione costituisce il reagente principale, viene aggiunto un agente reticolante (di solito un'ammina) per avviare il processo di reticolazione, che può essere condotto sia a temperatura ambiente che ad alta temperatura e seconda delle necessità tecnologiche.

Le proprietà della resina polimerizzata dipendono principalmente dalla densità di reticolazioni all'interno della sua struttura: in generale, la rigidità, la Tg e la stabilità termica aumentano all'aumentare della densità di reticolazione. Essa è controllata dalla struttura chimica dei reagenti di partenza, dall'agente reticolante utilizzato e dalle condizioni di reazione, come la temperatura.

Temperature massime di impiego si aggirano attorno ai 150°C tranne nel caso di resine epossidiche novolac che possono arrivare a temperature di 250°C.

In campo sciistico oltre ad essere utilizzata come matrice di materiali compositi viene utilizzata come adesivo strutturale per unire i vari strati nella costruzione sandwich.

3.8.2. Resine poliestere insature

Le resine poliestere insature sono caratterizzate da una viscosità inferiore rispetto a quella delle epossidiche e presentano una notevole versatilità ed un'elevata reattività. La resistenza meccanica e le proprietà adesive sono solitamente inferiori rispetto alle analoghe esibite dalle resine epossidiche ma come vantaggi presentano basso costo e brevi tempi di polimerizzazione. Trovano un'ottima applicazione in unione alle fibre di vetro (vetroresina).

I prodotti di partenza sono poliesteri insaturi, polimeri lineari ad alto peso molecolare, che contengono doppi legami C=C in grado di reagire chimicamente.

Tuttavia, a temperatura ambiente, la resina si presenta solitamente come una sostanza solida. Per poter essere impiegata deve quindi essere disciolta in un opportuno solvente (in genere *stirene*): il suo compito è quello di ridurre la viscosità della resina e facilitare quindi il processo di impregnazione delle fibre.

La reazione può essere condotta sia a temperatura ambiente che ad elevata temperatura a seconda delle necessità tecnologiche e delle proprietà desiderate.

Come nel caso delle resine epossidiche, le proprietà delle resine poliestere dipendono fortemente dalla densità di reticolazione. Modulo elastico, Tg e stabilità termica tendono ad aumentare all'aumentare della densità di reticolazione, invece la duttilità tende a diminuire. Tale densità di reticolazione può essere facilmente controllata agendo sul numero di doppi legami C=C presenti nelle molecole di poliestere. Come temperature di utilizzo siamo sulle temperature delle resine epossidiche, comprese tra i 200 e i 250°C.

3.8.3. Resine fenoliche

Sono una famiglia di polimeri termoindurenti ottenuti dalla reazione tra formaldeide e fenolo.

Note per l'eccellente resistenza al calore e per la grande stabilità chimica trovano numerose applicazioni industriali grazie alle eccellenti proprietà adesive.

Fino ad oggi il più ampio utilizzo delle resine fenoliche (quasi il 50% del totale) è stato nel campo degli adesivi termoformanti per compensato.

Materiali compositi prodotti con queste resine hanno una infiammabilità molto bassa, sono molto resistenti al creep e hanno un basso assorbimento dell'umidità. Esse vengono utilizzate per temperature che possono superare i 250°C garantendo proprietà simili alle resine epossidiche anche ad alte temperature.

Gli svantaggi principali, di quest'ultime, sono legati alla elevata pressione necessaria durante la polimerizzazione e al fatto che durante il processo di polimerizzazione, che avviene per condensazione, si ha la produzione di acqua che dovrà essere rimossa.

3.9. Matrici termoplastiche per materiali compositi

I limiti intrinseci delle resine termoindurenti, in particolare la modesta tenacità, hanno portato in anni recenti allo sviluppo di compositi a matrice termoplastica.

Tali polimeri sono caratterizzati dalla capacità di fluire tra le fibre una volta riscaldate ad una temperatura sufficientemente elevata, superiore alla T_g nel caso di materiali amorfi e superiore alla T_m nel caso di materiali semicristallini. La forma dei componenti in materiale compositi può quindi essere modificata a piacere, riscaldando semplicemente il materiale ad un'opportuna temperatura (formatura a caldo). E' possibile ripetere il ciclo per un numero limitato di volte poiché troppi riscaldamenti possono degradare il polimero. Al momento il loro impiego in campo industriale resta comunque inferiore a quello delle resine termoindurenti.

Rispetto alle resine termoindurenti, quelle termoplastiche sono mediamente più tenaci e, in alcuni casi, presentano temperature di esercizio più elevate. Tipicamente sono preferibili polimeri ad alta cristallinità in quanto limitano il fenomeno del creep rispetto a quelli amorfi.

Generalmente la macromolecole dei polimeri termoplastici impiegati come matrici presentano elevati pesi molecolari e contengono anelli benzenici: tutto ciò porta a massimizzare i legami intermolecolari aumentando la rigidità e la temperatura di transizione vetrosa.

La principale limitazione al loro uso è rappresentata dalla viscosità elevata dovuta all'elevato peso molecolare delle macromolecole, che rende problematica l'impregnazione delle fibre e richiede apparecchiature di lavorazione complesse e costose.

Queste matrici trovano grande impiego nella realizzazione di compositi a fibre corte: il polimero viene fuso e vengono aggiunte fibre come additivo, generalmente di vetro, le quali si dispongono in maniera casuale all'interni della matrice. Questa tipologia di materiali prendono il nome di GFTP, *glass-filled thermoplastics*. In seguito sono riportati i due principali polimeri termoplastici impiegati come matrici.

3.9.1. Il Polietereterchetone (PEEK)

È un polimero lineare termoplastico lineare semicristallino, in grado di presentare un grado di cristallinità massimo del 48% quando è raffreddato lentamente. Grazie alla sua struttura semicristallina può essere impiegato fino a temperature di 250°C.

Il grande vantaggio di questa resina è la grande tenacità, che può essere da 50 a 100 volte maggiore rispetto a quella di una comune resina epossidica.

3.9.2. Le Poliimidi

Sono un particolare polimero che presenta le caratteristiche strutturali di un termoplastico, ma le caratteristiche di non fusibilità di un termoindurente, cioè non fonde ma tende a degradare all'aumentare della temperatura. E' la matrice polimerica che permette di raggiungere le maggiori temperature di esercizio, fino a 300°C. Possiede buone proprietà meccaniche collegate a una buona tenacità, intermedia tra un termoindurente e un termoplastico.

Tabella 3.2: Principali caratteristiche a temperatura ambiente dei polimeri analizzati.

Materiale	Carico di rottura [MPa]	Modulo elastico E [GPa]	Densità [g/cm³]
ABS	28 - 55	1,4 – 1,8	1,03 – 1,12
Polietilene (UHMWPE)	27 - 40	0,1 – 0,14	0,927 – 0,944
Nylon	55 - 83	1,4 – 2,8	1,12 – 1,15
POM	63	2,6	1,41
Resine epossidiche	35 - 100	3 - 6	1,1 – 1,4
Resine poliestere	40 - 90	2 – 4,5	1,2 – 1,5
Resine fenoliche	28 - 70	3,1	1,3
PEEK	170	3,6	1,26 – 1,32
Poliimidi	185	3	1,3 – 1,4

Capitolo 4:

I materiali di rinforzo utilizzati nella costruzione dello sci

4.1.1 Materiali Compositi: Introduzione

I materiali compositi rappresentano una vasta ed importante categoria di materiali, realizzati per soddisfare l'esigenza di avere combinazioni particolari di proprietà in uno stesso materiale. Il classico esempio è la necessità, comune a molti ambiti dell'ingegneria meccanica, di avere un materiale ad elevata resistenza meccanica e elevata rigidità ma a bassa densità.

La combinazione di proprietà nasce dalla combinazione di due o più materiali, chimicamente distinti e insolubili, dando origine al materiale composito: l'idea di fondo di questa categoria di materiali è quindi quella di accoppiare materiali diversi, con proprietà significativamente diverse se non addirittura opposte, in modo tale che le proprietà dell'unione siano per lo più migliori delle proprietà dei singoli costituenti.

All'interno di un materiale composito si distinguono ben quattro fasi:

- **Fase matrice:** è il costituente continuo all'interno del quale sarà disposto il rinforzo. Essa permette il trasferimento del carico alla fase di rinforzo, proteggendola contro il danneggiamento fisico e dall'ambiente esterno.
- **Fase di rinforzo:** costituente che determina il miglioramento delle caratteristiche meccaniche della matrice e generalmente è costituito da fibre. Sono l'elemento del composito che sopporta la maggior parte del carico a cui è sottoposto il componente. Come alternativa, il rinforzo può essere costituito da particelle, tuttavia la capacità di rafforzamento della matrice è nettamente inferiore rispetto alle fibre.
- **Fase di interfaccia:** è la zona di contatto tra matrice e rinforzo. L'interfaccia è fondamentale per determinare l'effettiva sinergia tra matrice e rinforzo in quanto è sede di particolari interazioni chimico-fisiche che determinano il trasferimento del carico dalla matrice al rinforzo.

- **Porosità:** a causa della non perfetta infiltrazione della matrice all'interno degli spazi tra le fibre si può creare una certa porosità. Questo determina minori caratteristiche meccaniche del composito finale, quindi in fase produttiva si cercherà di adottare processi produttivi che garantiscano la massima compattazione. Particolarmente colpiti da questo fenomeno sono i compositi ad alto tenore di rinforzo fibroso.

4.2. Compositi fibro-rinforzati

Questi compositi sono di gran lunga quelli più utilizzati nell'ambito dell'ingegneria meccanica. Nascono dall'introduzione di fibre, per lo più ceramiche ad altissima resistenza e rigidità, all'interno di una matrice polimerica o più raramente metallica o ceramica.

Il loro successo è strettamente legato all'elevata resistenza specifica e rigidità specifica che si riescono ad ottenere utilizzando fibre ad elevata resistenza.

Le fibre utilizzate possono essere continue, ovvero lunghe quanto le dimensioni dell'oggetto finito in materiale composito, o discontinue, se più corte.

Un'altra importante classificazione è tra fibre corte e lunghe in base alla lunghezza critica, ossia quella lunghezza minima che garantisce un trasferimento di carico dalla matrice tale da portare a rottura la fibra stessa. Tale lunghezza è funzione del carico di rottura delle fibre, del loro diametro e dello sforzo di taglio massimo ammissibile all'interfaccia. Quindi una fibra è lunga se la sua lunghezza supera quella critica, che cambia in funzione della matrice, poiché varia lo sforzo di taglio ammissibile.

Fondamentale è la distinzione che riguarda l'orientamento delle fibre: esse possono essere distribuite casualmente, allineate lungo un'unica direzione o disposte lungo più direzioni (compositi biassiali o triassiali) tramite sovrapposizione di lamine monoassiali o utilizzando tessuti.

Una caratteristica dei compositi con fibre allineate è il loro comportamento anisotropo: avremo massimi valori di resistenza e rigidità lungo la direzione delle fibre. Questo non è visto come un difetto, in quanto nel campo dei materiali compositi a differenza di tutti gli altri, possiamo progettare il materiale in funzione della nostra applicazione: note le sollecitazioni andremo a disporre le fibre in modo tale da garantire il massimo delle prestazioni (minimo peso massima resistenza/rigidità).

Un'altra caratteristica unica di questi compositi è la loro grande capacità di smorzamento: questo comporta una grande capacità di assorbimento delle vibrazioni da parte del materiale stesso riducendone la trasmissioni alle strutture adiacenti.

La principale forma con cui i compositi fibro-rinforzati vengono impiegati in applicazioni strutturali è chiamata laminato. Esso è ottenuto dalla sovrapposizione e dal consolidamento di sottili fogli di fibre impregnate di matrice fino all'ottenimento dello spessore desiderato. L'orientamento delle fibre all'interno di ogni foglio, come la sequenza di sovrapposizione dei vari singoli fogli possono essere variate per ottenere dei compositi laminati con un ampio range di proprietà fisiche e meccaniche: per esempio sovrapponendo fogli con fibre in diverse direzioni si possono ottenere dei laminati con un'omogeneità di proprietà nelle varie direzioni. I materiali compositi fibro-rinforzati grazie alle loro elevate caratteristiche trovano impiego in numerose applicazioni ingegneristiche: si va dal campo aeronautico e aerospaziale al campo sportivo passando per l'automotive e le applicazioni militari.

Nella costruzione di sci si utilizzano esclusivamente compositi fibrosi con disposizione delle fibre sia monoassiale che triassiale.

4.3. Tipologie di fibre disponibili in commercio

Le fibre sono il principale elemento in un materiale composito fibroso, in quanto oltre a sopportare la maggior parte del carico esse occupano la maggior parte del volume del laminato.

Le fibre sono costituite da filamenti continui molto sottili (dell'ordine del μm) quindi risultano molto delicate e difficili da manipolare singolarmente e per questo vengono raccolte in fasci.

Le forme commerciali più comuni sono:

- **monofilamento**: elemento base con dimensioni di circa $10\ \mu\text{m}$ di diametro;



Figura 4.1: Monofilamento

- **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), praticamente senza intreccio, destinato ad essere filato, ritorto o strappato per l'utilizzazione sotto forma di fibra discontinua;



Figura 4.2: Strand

- **yarn**: fascio di fibre costituito da singole fibre o da strands avvolti ed uniti a trefolo. Le operazioni di costruzione di yarns e di trefoli variano la resistenza, il diametro, e la flessibilità degli yarns e sono tappe importanti nella produzione e diversificazione di una varietà notevole di prodotti;

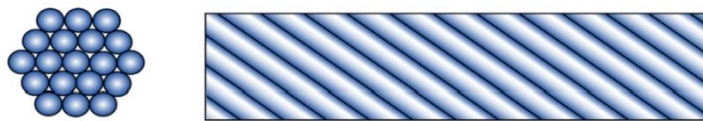


Figura 4.3: Yarn

- **roving**: è un fascio costituito da filati assemblati parallelamente non ritorti.



Figura 4.4: Roving

4.4.Fibra di vetro

La fibra di vetro è sicuramente la fibra più comunemente utilizzata nella costruzione di sci. Nella quasi totalità dei casi è abbinata a una matrice polimerica dando origine a un composito noto come GFRP, *glass-fiber reinforced plastics*.

I principali pregi di questa fibra sono il basso costo, l'elevata resistenza, l'elevata resistenza alla corrosione e l'eccellente capacità isolante. D'altro canto presenta basso modulo elastico, sensibilità all'abrasione e resistenza a fatica relativamente bassa. Sono fibre dalla struttura amorfa che presentano un comportamento isotropo.

Le principali tipologie di fibre di vetro impiegate in applicazioni strutturali sono:

- **Tipo E:** fibra formata da un vetro a base di CaO, Al₂O₃, e SiO₂, con un rilevante contenuto anche di B₂O₃. E' la fibra che presenta il più basso costo delle fibre utilizzabili per la realizzazione di compositi. La sua denominazione di vetro E, che sta per "elettrico", è dovuta alla sua grande resistività elettrica. Il modulo elastico di queste fibre è inferiore agli 80 GPa ma presentano un'ottima resistenza meccanica con tensioni di rottura che arrivano ai 3,5 GPa.
- **Tipo S:** sono le fibre di vetro che presentano le migliori caratteristiche meccaniche (S sta proprio per "strength") ma presentano anche un maggiore costo. Vengono ricavate da un vetro a base di MgO, Al₂O₃, e SiO₂ raggiungendo valori di modulo elastico pari a 90 GPa e resistenza a trazione si 4,5 GPa.

Esistono altre tipologie di fibre impiegate in applicazioni particolari sono:

- **Tipo C:** offre una maggiore resistenza alle alte temperature e alla corrosione da acidi.
- **Tipo M:** caratterizzate da un elevato modulo elastico, fino a 113 GPa.
- **Tipo D:** sviluppate per applicazioni elettroniche, presentano una bassa costante dielettrica.
- **Tipo L:** sono fibre che grazie alla loro composizione proteggono dalle radiazioni. Vengono utilizzate nella realizzazione di abiti protettivi dai raggi x.

Tabella 4.1: Composizioni chimiche delle due principali tipologie di fibra di vetro.

	VETRO E	VETRO S
Ossido di silicio	54.3	64.20
Ossido di alluminio	15.2	24.80
Ossido di ferro	-	0.21
Ossido di calcio	17.2	0.01
Ossido di magnesio	4.7	10.27
Ossido di sodio	0.6	0.27
Ossido di boro	8.0	0.01
Ossido di bario	-	0.20
Varie	-	0.03

I dati di resistenza a trazione precedentemente indicati riguardano fibre nuove. Tuttavia, il danneggiamento della superficie prodotto per esempio dallo strofinamento tra le fibre stesse, porta a una netta riduzione di tali valori: nel caso della fibra E si passa da 3,5 a 2 GPa. La degradazione della resistenza è aumentata nel caso in cui la fibra sia sottoposta a carichi ciclici: infatti in queste condizioni i difetti superficiali tendono a crescere e questo rappresenta uno dei maggiori difetti derivate dall'utilizzo di fibre di vetro in applicazioni di fatica.

4.4.1. Processo Produttivo

Nelle sue linee essenziali la tecnologia di produzione delle fibre di vetro è basata sulla filatura di una miscela costituita principalmente da sabbia, allumina e calcare. I componenti sono miscelati a secco e portati a fusione (circa 1300 °C) in una fornace a refrattari. Il vetro fuso alimenta direttamente delle filiere di platino nel quale viene fatto passare per gravità attraverso appositi fori praticati sul fondo. Il vetro fuso, colando attraverso i fori, assume la forma di molteplici bacchettine, le quali vengono raccolte e lanciate su un avvolgitore rotante ad altissima velocità in modo da creare un rapido stiramento del vetro fuso. In tal modo si ottiene un filamento del diametro compreso tra gli 8 e i 15 µm.

I filamenti, prodotti per filatura da fuso, sono quindi raggruppati, con l'imposizione eventuale di una leggera torsione per ottenere uno strand.

Le fibre di vetro devono essere necessariamente trattate con un "appretto" a base di silani⁸ dopo trafilatura: la primaria funzione dell'appretto consiste nella protezione delle fibre da fenomeni corrosivi e da abrasione reciproca per preservarne le proprietà meccaniche; in secondo luogo funge da agente di interfaccia, migliorando la bagnabilità e l'adesione alla matrice.

Tali trattamenti sono anche molto utili ai fini della durabilità e della resistenza a fatica del materiale composito.

Le fibre di vetro sono anche disponibili in forma di fogli sottili, denominati *mat*. Un *mat* può essere costituito sia da fibre lunghe continue che da fibre corte (cioè fibre discontinue di lunghezza tipica compresa tra 25 e 50 mm) disposte casualmente nel piano e tenute assieme da un legante chimico.

⁸ Silani: sono un composto chimico con formula chimica SiH₄.

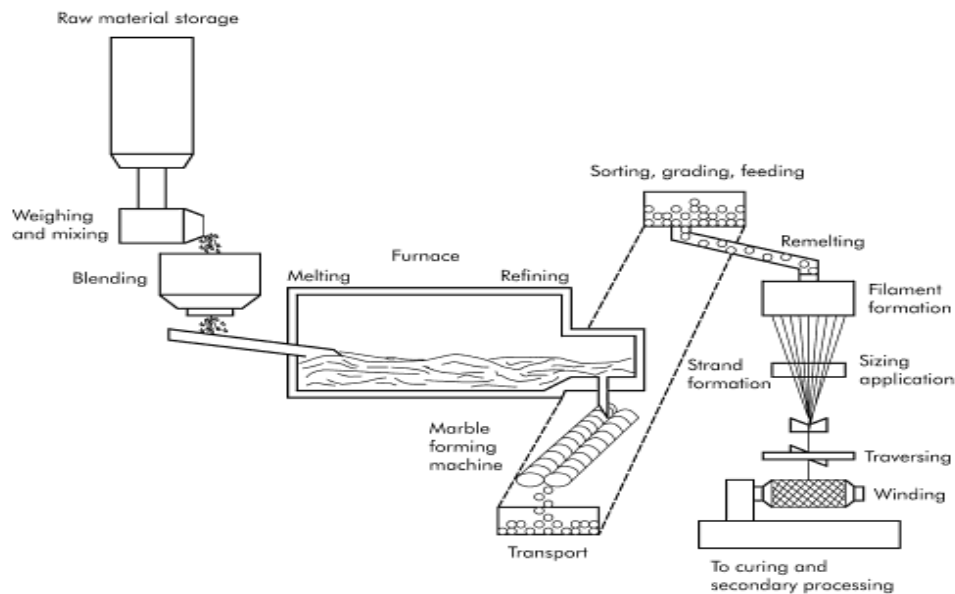


Figura 4.5: Rappresentazione schematica del processo produttivo delle fibre di vetro.

4.5.Fibra di carbonio

Sono le fibre sicuramente più conosciute in ambito meccanico, ma in campo sciistico solo negli ultimi anni stanno cominciando ad essere utilizzate. Risultano sicuramente più costose rispetto alle fibre di vetro ma allo stesso tempo garantiscono prestazioni superiori in termini di resistenza e rigidità specifica.

A confronto con le fibre di vetro e con quelle aramidiche, le fibre di carbonio risultano essere le meno sensibili ai fenomeni di scorrimento viscoso (creep) e di fatica e sono contraddistinte da una modesta riduzione della resistenza a lungo termine. Svantaggi di questa fibra sono la sua piccola resistenza agli impatti e l'elevata conduttività elettrica, che in applicazioni non isolate elettricamente può creare cortocircuito.

In campo sciistico non vengono utilizzate solo come materiale strutturale ma anche per la realizzazione di particolari esterni destinati all'irrigidimento dello sci stesso e all'assorbimento delle vibrazioni.

Strutturalmente le fibre di carbonio, contengono una miscela di carbonio amorfo e di grafite (forma cristallina del carbonio): il termine "fibre di grafite" viene tuttavia utilizzato nel linguaggio comune, anche se in modo improprio, per indicare fibre con un contenuto di carbonio maggiore del 99% che subiscono un trattamento termico sopra i 1700°C; il termine "fibre di carbonio" indica, invece, fibre con un contenuto di carbonio variabile tra l'80 ed il 95% che vengono processate a temperature inferiori ai 1700°C.

La struttura cristallina della grafite è di tipo esagonale, con gli atomi di carbonio organizzati in

strutture essenzialmente planari, tenute insieme da forze trasversali di interazione del tipo Van der Waals, di gran lunga più deboli rispetto a quelle che agiscono tra gli atomi di carbonio nel piano (legami covalenti). Per tale motivo il loro modulo di elasticità e la loro resistenza sono estremamente elevati nelle direzioni contenute nei suddetti piani, mentre risultano notevolmente inferiori nella direzione trasversale (comportamento anisotropo). Le fibre stesse saranno caratterizzate da una forte anisotropia, e la disposizione dei piani cristallini varierà in funzione del processo produttivo impiegato.

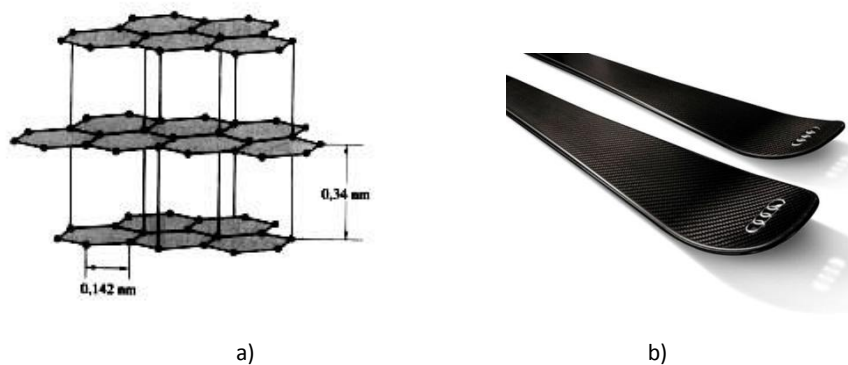


Figura 4.6: a) Struttura cristallina della grafite; b) Esempio di sci realizzato in fibra di carbonio.

4.5.1. Processo produttivo e classificazione delle fibre di carbonio

La moderna tecnologia di produzione delle fibre di carbonio si basa essenzialmente su una prima ossidazione e una successiva pirolisi, cioè la decomposizione termica in assenza di ossigeno di sostanze organiche, dette precursori, tra le quali le più usate sono le fibre di poliacrilonitrile⁹ (PAN), il rayon e le peci di petrolio. Essenzialmente il processo è lo stesso per ogni tipo di precursore, eventuali differenze possono essere riscontrate nella parte iniziale.

Il processo produttivo dove come precursore si usano fibre il PAN si articola in 3 fasi:

- **Stabilizzazione:** in questa fase le fibre vengono riscaldate in aria a una temperatura di circa 300°C subendo un'ossidazione sotto stiro. Questo comporta la trasformazione del gruppo laterale nitrilico in una struttura ciclica.
- **Carbonizzazione:** operazione di riduzione in atmosfera inerte a una temperatura compresa tra i 1000 e i 1700°C. In questa fase vengono eliminati la maggior parte degli elementi chimici diversi dal carbonio portando alla formazione di anelli grafici più o

⁹ Poliacrilonitrile: è un polimero lineare che possiede più gruppi nitrile (carbonio-azoto).

meno regolari. Durante questa fase si ha una notevole perdita di massa: per una carbonizzazione a 1600°C si arriva a perdere il 55-60% del peso iniziale delle fibre PAN. Per riduzioni a queste temperature le fibre contengono fogli di grafite non perfettamente paralleli, ma arrotolati.

- **Grafitizzazione:** trattamento termico alla quale le fibre carbonizzate possono essere sottoposte per far aumentare il loro modulo elastico. Consiste nel completare la riduzione portando le fibre, sempre mantenute in atmosfera inerte, a una temperatura di circa 2000°C. Grazie a queste particolari condizioni migliora la struttura cristallina delle fibre nelle quali si formano piani grafite paralleli all'asse della fibre stesse.

La differenza di struttura tra fibre che hanno e non hanno subito la grafitizzazione determina un'importante classificazione delle fibre:

- **Fibre HS**, "high strength", ovvero ad alta resistenza, con valori di tensione di rottura di circa 3,5 GPa ma modulo elastico che si ferma a 250 GPa. Sono le fibre ottenute con semplice carbonizzazione.
- **Fibre HM**, "high modulus", con modulo elastico E compreso tra 380 e 500 GPa ma tensione di rottura inferiore ai 2,5 GPa. Sono le fibre che presentano una struttura altamente grafite, cioè che hanno subito la grafitizzazione.

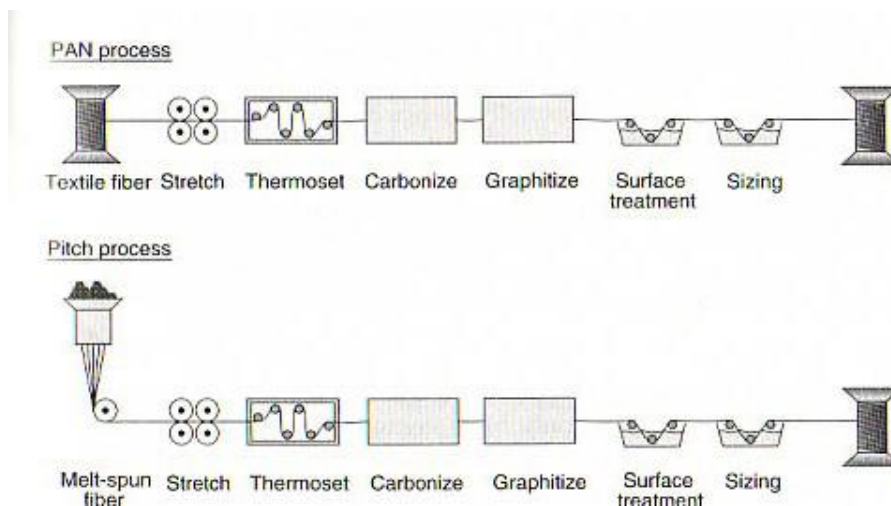


Figura 4.7: Rappresentazione schematica dei processi produttivi per l'ottenimento di fibre di carbonio, a partire da fibre PAN o da pece (Pitch).

Le peci, sottoprodotto della raffinazione del petrolio, sono un precursore più economico rispetto alle fibre PAN. Riscaldando le peci a una temperatura superiore ai 300°C esse polimerizzano dando luogo a macromolecole. Questo composto viene successivamente filato per ottenere delle fibre, favorendo un allineamento delle macromolecole. Dopo l'ossidazione sotto stiro, queste fibre subiscono un primo trattamento di carbonizzazione a 1000°C e poi sempre il trattamento di grafitizzazione a temperature che possono andare dai 1200 ai 3000°C. La temperatura di questo trattamento termico influenzerà le proprietà meccaniche delle fibre, soprattutto il modulo elastico come è possibile osservare dalla figura 4.9.

La resistenza a trazione tende anch'essa ad aumentare all'aumentare della temperatura del trattamento raggiungendo un valore massimo di 2,2 GPa, comunque inferiori ai valori delle fibre PAN. Un confronto in termini di modulo elastico e resistenza meccanica tra fibre PAN e fibre pitch può essere osservato in figura 4.10.

Le elevate temperature necessarie per conferire a questa tipologia di fibre delle proprietà meccaniche confrontabili con le fibre PAN le rendono generalmente più costose rispetto a quest'ultime.

A differenza delle fibre PAN la maggiore regolarità strutturale comporta una conducibilità termica ed elettrica molto elevata, superiore a quella del rame.

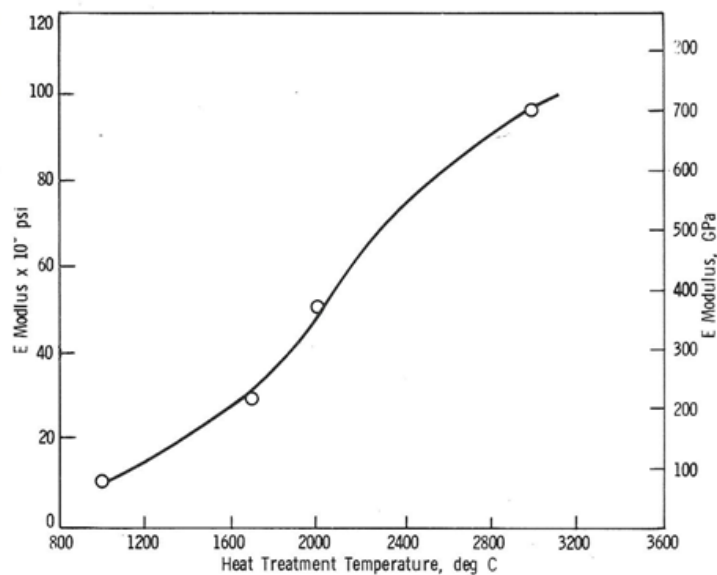


Figura 4.8: Andamento del modulo elastico E in funzione della temperatura di trattamento delle fibre ottenute da pece.

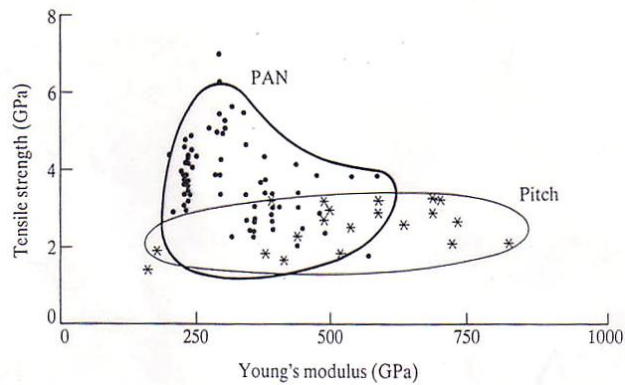


Figura 4.9: Il grafico evidenzia la differenti proprietà meccaniche tra le fibre PAN e le fibre ottenute da pece.

4.6. Le fibre aramidiche

Le fibre aramidiche sono fibre di natura organica, costituite da poliammidi aromatiche chiamate appunto arammidi (ovvero contenenti anelli benzenici) in forma estremamente orientata. Le poliammidi sono polimeri caratterizzati dal legame ammidico CO-NH, derivanti dalla condensazione di un acido bicarbossilico e di una diammina, contenenti al loro interno anelli benzenici. La presenza degli anelli benzenici, conferisce al polimero grande stabilità termica e grande rigidità.

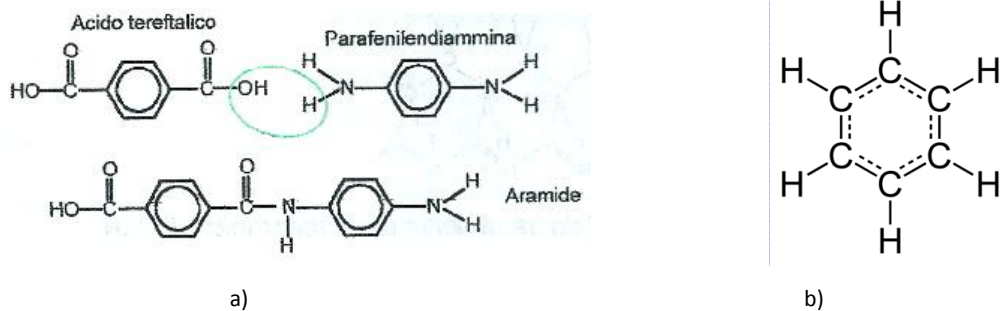


Figura 4.10: a) Processo costitutivo di un'aramide; b) Anello benzenico.

Introdotte per la prima volta dalla DuPont¹⁰ nel 1971, esse si distinguono per l'elevata tenacità e per la loro resistenza alle operazioni di manipolazione. Il modulo di elasticità e la resistenza a trazione sono intermedi tra quelli delle fibre di vetro e quelli delle fibre di carbonio.

Le fibre aramidiche possono degradarsi per esposizione prolungata alla luce solare, con perdita della resistenza a trazione fino al 50%. Inoltre possono risultare sensibili all'umidità, che ne riduce le proprietà e rende più complicata la loro applicazione.

Il comportamento a creep è simile a quello delle fibre di vetro, ma rispetto a queste ultime la resistenza a rottura è molto più elevata. Anche la resistenza a fatica flessionale è più elevata di quella delle fibre vetro. Esempi tipici di fibre aramidiche sono il **Kevlar** e il **Nomex**.

4.6.1.Kevlar

Fibre ricavate dalla filatura del Kevlar sono note per le eccezionali rigidità e resistenza specifiche grazie alla loro densità, $1,45 \text{ g/cm}^3$, che risulta la più bassa delle fibre elencate.

Tale polimero gode di interazioni intermolecolari significative: essendo le macromolecole ben allineate e molto regolari si formano molti ponti idrogeno, i quali seppur deboli presi singolarmente, essendo ripetuti molte volte danno vita a un notevole rafforzamento della struttura.

Un problema che caratterizzano queste fibre è la scarsa resistenza a compressione. Si assiste infatti a una inflessione non solo delle fibre ma anche delle macromolecole al loro interno, con conseguente rottura dei ponti idrogeno.

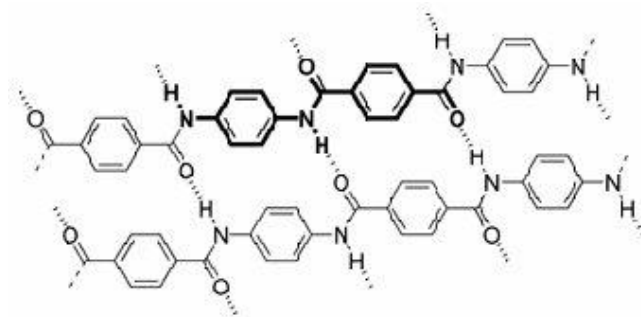


Figura 4.11: Allineamento delle catene di Kevlar e formazione dei ponti idrogeno.

I campi di utilizzo del Kevlar sono innumerevoli. La fibra viene utilizzata in campo automobilistico per rivestire e rinforzare i pneumatici di automobili e di altri veicoli; è stato il materiale preferito per sostituire l'amianto (altamente cancerogeno) nei rivestimenti di freni, guarnizioni e frizioni. Case automobilistiche come Audi, BMW e hanno scelto prodotti

¹⁰ DuPont: azienda chimica americana tra le più note al mondo fondata nel 1802

rinforzati con il Kevlar per componenti del motore, ottenendo superiori prestazioni di resistenza al calore e di durevolezza.

Il Kevlar è un materiale all'avanguardia nel campo delle applicazioni per protezioni balistiche: per le sue caratteristiche di leggerezza e resistenza agli urti viene utilizzato per la realizzazione di elmetti e giubbotti antiproiettile. Le fibre infatti impediscono il passaggio di schegge metalliche, pallottole ed altri oggetti taglienti.

Infine, il Kevlar può essere utilizzato nell'equipaggiamento sportivo, oltre che per le sue caratteristiche di resistenza, anche per le sue doti di smorzamento delle vibrazioni: la vela, il tennis e lo sci sono applicazioni ormai consolidate.

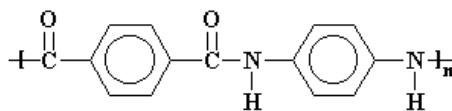


Figura 4.12: Composizione del Kevlar.

4.6.2. Nomex

È una tipologia di fibra che non trova impiego in campo sciistico come materiale di rinforzo, ma può essere impiegata sotto forma di fogli impregnati di resina per la realizzazione di strutture honeycomb per il core.

Introdotta nel mercato a partire dalla metà degli anni sessanta da DuPont, Nomex è una fibra che presenta una resistenza stupefacente al calore e alla fiamma ed eccellenti caratteristiche di isolamento elettrico. Questa combinazione di proprietà la rende adatta a una vasta gamma di applicazioni. Sotto forma di fibra (fiocco e filati) viene impiegata principalmente per indumenti protettivi, come tute per vigili del fuoco o per piloti da auto da corsa.

Attualmente sono stati messi appunto dei mix di fibra nomex-kevlar per la realizzazione di filtri molto efficienti nell'eliminazione di agenti atmosferici inquinanti.

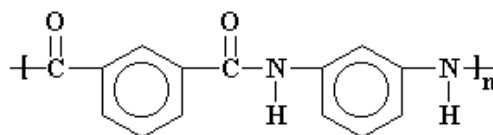


Figura 4.13: Struttura del Nomex.

4.6.3. Processi produttivi per la realizzazione di fibre polimeriche

La tecnologia di produzione si basa sull'estrusione ad alta temperatura ed alta velocità del polimero con successivo raffreddamento veloce ed essiccamento. Se i polimeri sono termoplastici, si deve dapprima provvedere a fonderli nell'estrusore; nel caso di polimeri termoindurenti la sintesi del polimero viene effettuata a monte e successivamente subiscono trattamenti termici o di diluizione per permetterne l'estrusione.

Queste operazioni sono condotte a elevati ritmi produttivi con un'affidabilità del prodotto molto alta. Segue la fase di stiratura delle fibre per avvolgimento su bobine rotanti a forte velocità al fine di incrementare le caratteristiche meccaniche e di raggiungere il diametro desiderato.

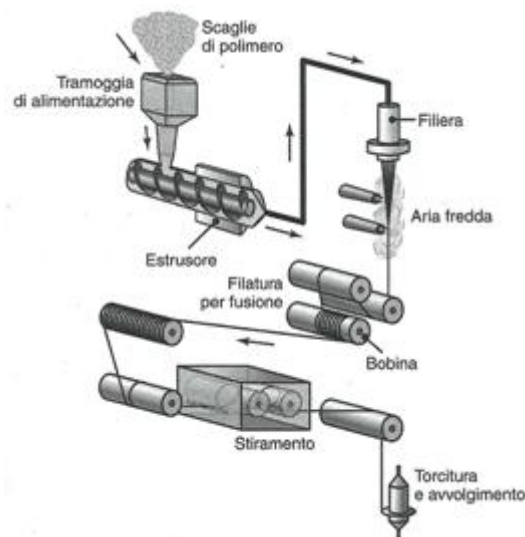


Figura 4.14: Processo produttivo per la realizzazione di fibre polimeriche.

4.7. Fibra di basalto

Il basalto è una dura roccia vulcanica composta da tre silicati, il plagioclasio, il pirosseno e l'olivina. Tuttavia questi tre composti possono presentare delle differenze a seconda dell'area geografica in cui è stata estratta la roccia.

Per molti anni il basalto è stato utilizzato in processi di colata per la realizzazione di piastrelle e lastre per applicazioni architettoniche. Solo più recentemente, a partire dagli anni sessanta/settanta si è capita la potenzialità di questa roccia sotto forma di filamenti continui ottenuti dal fuso.

Inizialmente usata solo per scopi militari (basti pensare ai sottomarini sovietici i quali venivano isolati termicamente mediante fibre corte in basalto), a partire dagli ultimi dieci anni viene impiegata in vari settori industriali come fibra di rinforzo in materiali compositi per la

realizzazione di manufatti leggeri ed estremamente resistenti.

Appartiene alla categoria delle fibre minerali assieme alle fibre di carbonio e di vetro ma, rispetto a quest'ultime, hanno migliori proprietà meccaniche e fisiche, oltre che un costo significativamente inferiore rispetto alle prime. In commercio possiamo trovare fibre con diametro che va dai 9 ai 24 μm .

Come le fibre di vetro sono molto fragili e facilmente danneggiabili se vengono maneggiate. Per questo subiscono un rivestimento con un appretto a base di silani del tutto simile a quello utilizzato per le fibre di vetro.

Le caratteristiche principali di questa fibra sono l'elevata resistenza e stabilità termica che permettono un range di temperatura di lavoro molto ampio ($-260 \div 700 \text{ }^\circ\text{C}$) e la resistenza alla corrosione.

Da un punto di vista delle caratteristiche meccaniche, riportate nella tabella 4.3, presentano prestazioni leggermente superiori a quelle delle fibre di vetro di tipo S, ma un costo compreso tra le fibre S e le fibre E.

La fibra di basalto trova largo impiego nel settore edile come fibra di rinforzo del cemento armato in sostituzione della fibra di amianto nonché come materiale isolante nel settore della bioedilizia essendo un materiale bio-compatibile. Nel settore meccanico, oltre che nella realizzazione di compositi tradizionali, grazie alla sua elevata resistenza al calore viene impiegato in applicazioni d'attrito, come pastiglie dei freni in materiale composito. Nel settore sportivo trovano impiego come fibra di rinforzo per la costruzione di sci e di racchette da tennis in alternativa alla fibra di vetro; ultimamente certe aziende stanno cominciando ad utilizzare questa fibra in quanto è un materiale più naturale e meno tossico della fibra di vetro.

Tabella 4.2: Confronto tra la composizione chimica delle fibre di vetro (E) e le fibre di basalto.

Componenti chimici	Fibra di Basalto (% in peso)	Fibra di Vetro-E (% in peso)
SiO ₂	51.6-57.5	52-56
Al ₂ O ₃	16.9-18.2	12-16
Fe ₂ O ₃	4.0-9.5	≤ 0.3
CaO	5.2-7.8	16-25
MgO	1.3-3.7	0-5
Na ₂ O	2.5-6.4	0.8
TiO ₂	1.1	-
K ₂ O	0.8-4.5	0.2-0.8
B ₂ O ₃	-	5-10
F	-	0.3

4.7.1. Processo Produttivo

La fibra di basalto è prodotta in un processo continuo per molti aspetti simili a quello utilizzato per realizzare le fibre di vetro. La roccia viene dapprima estratta, macinata, lavata e poi inviata ai forni di fusione. Il processo in questa fase è in realtà più semplice della lavorazione della fibra di vetro: il vetro deriva dalla fusione di una miscela di più componenti che devono essere ben dosati e ben miscelati, mentre la roccia di basalto grezza possiede un certa costanza nella composizione chimica rendendo non necessario un controllo approfondito.

Maggiori difficoltà si riscontrano nel processo di fusione che avviene a una temperatura di circa 1450°C: mentre il vetro essendo trasparente garantisce un'uniformità di temperatura in tutto il bagno con il semplice utilizzo di bruciatori a gas che forniscono il calore dall'alto, il basalto essendo di colore nero assorbe energia ad infrarossi in superficie riscaldandosi superficialmente. Questo determina disomogeneità di temperatura nel bagno e la necessità di scaldare il bagno per molte ore per raggiungere condizioni di equilibrio termico.

Attualmente si è cercato di ovviare a questo problema utilizzando degli elettrodi immersi nel bagno di basalto fuso.

Il passo successivo è quello di estrusione e di stiramento: il fuso passa attraverso una matrice contenente più boccole in platino-rodio che permettono l'ottenimento dei filamenti che verranno poi stirati ad alta velocità, necessario per l'incremento delle proprietà meccaniche della fibra.

4.8. Fibre di boro

Un'altra fibra che trova qualche rara applicazione nella costruzione di sci è la fibra di boro. Sono fibre facenti parte del gruppo delle fibre ceramiche e presentano elevati valori di rigidità e resistenza sia in trazione che in compressione, insieme a un'elevata resistenza alle alte temperature.

Inizialmente il campo di applicazione di queste fibre era quello aerospaziale, successivamente si sono cominciate ad impiegare anche in attrezzature sportive come appunto nello sci o nelle racchette da tennis. Ciò che limita l'applicazione di queste fibre è il costo, generalmente superiore a quello di altre fibre, e la non bassissima densità (2,6 g/cm³).

Le fibre di boro non possono essere ottenute con le normali tecniche di filatura viste per altre tipologie di fibre; esse sono ottenute sotto forma di monofilamenti prodotti con tecniche CVD (*chemical vapor deposition*) a partire da monofilamenti di tungsteno o raramente di carbonio. Le fibre di partenza (appunto tungsteno o carbonio), tipicamente del diametro di 12µm vengono fatte passare in una camera di deposizione in cui vapori di boro, ottenuti dalla

reazione del cloruro di boro con idrogeno, vengono depositati a una temperatura di 1100 – 1300°C. Controllando il tempo di permanenza della fibra all'interno della camera si riesce a controllare lo spessore di deposizione e quindi il diametro finale della fibra stessa. In genere si ottengono delle fibre piuttosto spesse con diametri commerciali compresi tra gli 0,1 e 0,2 mm.

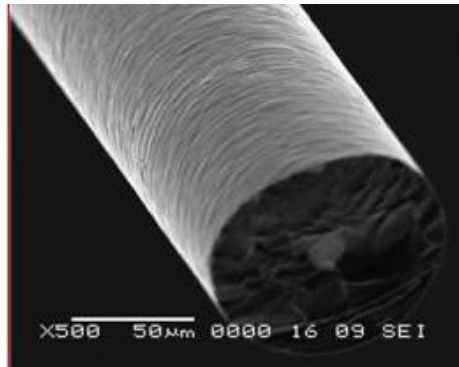


Figura 4.15: Micrografia di una fibra di boro; all'interno è possibile notare la fibra di partenza.

Tabella 4.3: Proprietà tipiche delle fibre analizzate.

Materiale	Resistenza a trazione [GPa]	Modulo elastico [GPa]	Densità [g/cm³]	Costo relativo
Boro	3,5	380	2,6	Altissimo
Basalto	4,15 – 4,8	100 - 110	2,65	Basso
Carbonio HM	2 – 2,4	380 - 400	1,95	Elevato
Carbonio HS	3 – 3,4	230 - 270	1,75	Elevato
Vetro E	2 – 3,5	73 - 76	2,56	Molto basso
Vetro S	4 – 4,6	85	2,48	Basso
Kevlar	2,8 - 3	130	1,45	Elevato

4.9. Le matrici polimeriche

Come si è visto nella prima parte di questo capitolo il ruolo della matrice da un punto di vista della sopportazione del carico è sicuramente secondario rispetto a quello delle fibre. I ruoli fondamentali di una matrice sono quelli di trasferire il carico alle fibre e di proteggere le stesse da agenti esterni che possono danneggiarne le proprietà di resistenza.

Le proprietà meccaniche della matrice andranno a loro volta ad influenzare le caratteristiche del composito finale. Per questo si ricercano matrici che abbiano:

- **Alto modulo elastico**, il quale influenzerà la rigidità complessiva del composito;
- **Alta resistenza**, per evitare rotture nella matrice;
- **Alta tenacità**, la quale controlla la crescita di eventuali cricche.

Naturalmente nell'ambito dei materiali polimerici le prime due proprietà non sono eccellenti, nettamente inferiori a metalli e ceramici, ma il vantaggio di queste matrici sta nella bassa densità e nell'elevata tenacità.

La totalità dei materiali compositi utilizzati per la realizzazione di sci sono a matrice polimerica. Naturalmente il campo sciistico non è l'unico campo di applicazione di questa tipologia di materiale: parti di aerei, parti di carrozzerie di auto, biciclette sono applicazioni tipiche.

Il limite è però rappresentato dalle temperature di esercizio: si tratta sempre di materiali polimerici che possono resistere al massimo, nel caso delle poliimidi, a temperature di 300 °C.

Le matrici polimeriche si dividono in due grandi gruppi:

- **Matrici termoindurenti**
- **Matrici termoplastiche**

Per una loro dettagliata descrizione si rimanda al capitolo 3 riguardante i materiali polimerici, in particolare ai paragrafi 3.7 e 3.8.

4.10. I pre-preg: generalità e processi di manifattura

Nella realizzazione di sci i materiali compositi che tipicamente vengono impiegati si trovano sotto forma di lamine pre-preg.

Con il termine *pre-preg* o *preimpregnati* si identifica un semilavorato, costituito da fibre continue incorporate all'interno di fogli o nastri di matrice non completamente polimerizzata.

Queste lamine pre-preg si possono trovare con disposizione delle fibre sia uni assiale che triassiale, tuttavia nel componente finale una distribuzione delle fibre lungo più assi può essere ottenuta anche mediante sovrapposizione e laminazione di fogli monoassiali.

Il processo produttivo di questi semilavorati consiste in una prima fase in cui le fibre continue sono allineate 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. Ne segue un breve riscaldamento che produce una prima parziale polimerizzazione che conferisce al prodotto la compattezza necessaria a poter essere stoccato sotto forma di bobine. Per rallentare il processo di polimerizzazione, che continuerebbe a temperatura ambiente e che renderebbe i pre-preg inutilizzabili, le bobine vengono conservate in condizioni di refrigerazione a una temperatura di circa -18°C .

Nonostante ciò questi prodotti hanno comunque una data di scadenza entro il quale devono essere impiegati: oltre tale data le proprietà della resina risultano alterate rendendo inutilizzabili le lamine. Tipici valori dello spessore dei nastri variano tra 0,08 e 0,25 mm, con larghezze tra 25 e 1500 mm. Pre-preg possono essere ottenuti con qualsiasi fibra di quelle precedentemente descritte abbinata a matrici sia termoplastiche che termoindurenti. Le resine epossidiche sono indubbiamente le più utilizzate in quanto i pre-preg vengono impiegati in settori come quello sportivo e aeronautico in cui le proprietà meccaniche sono fondamentali.

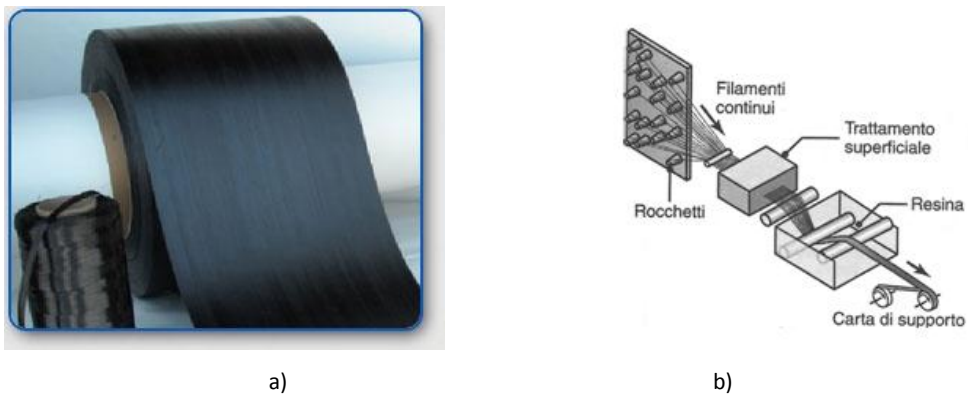


Figura 4.16: a) Bobina di composito pre-preg; b) Processo produttivo per la realizzazione di lastre preimpregnate.

4.10.1. Impiego dei Pre-preg

La realizzazione di molti componenti in materiale composito avviene con l'impiego di fogli preimpregnati grazie alla loro flessibilità di impiego permettendo l'ottenimento di geometrie complesse. I fogli di pre-preg opportunamente sagomati vengono disposti sulla superficie dello stampo che riproduce il componente da realizzare, il quale viene precedentemente rivestito con un agente distaccante. Si sovrappone strato dopo strato fino ad arrivare allo spessore desiderato ottenendo dei laminati, che come specificato precedentemente, possono avere disposizione delle fibre monoassiale o pluriassiale.

Una volta disposti i vari strati essi devono essere consolidati in modo da realizzare una struttura unitaria, la quale viene ottenuta con l'applicazione di pressione e calore. Il calore è necessario per far completare il processo di polimerizzazione della matrice, mentre la pressione che può essere ottenuta mediante una pressa o con l'applicazione del vuoto è necessaria per l'eliminazione dell'aria e dei gas presenti tra gli strati di pre-preg.

Il processo che porta alla realizzazione di uno sci è molto simile: in fase di assemblaggio dai fogli di pre-preg si ricavano le sagome di materiale composito delle opportune dimensioni e interponendo dei sottili strati di adesivo strutturale a base di resine fenoliche o epossidiche le si assemblano con le altre parti dello sci (core, soletta, ecc.). Il tutto viene poi riscaldato sotto pressione in modo tale che avvenga l'irrigidimento della matrice e dell'adesivo.

4.11. L'Alluminio: classificazione delle sue leghe

Un altro materiale strutturale impiegato nella costruzione di sci è l'alluminio.

Come si è visto nell'introduzione storica, l'utilizzo di alluminio nella costruzione di uno sci ha già una lunga tradizione, portando fin da subito evidenti vantaggi.

L'alluminio è il metallo più abbondante sulla crosta terrestre seguito a notevole distanza dal ferro e deve il suo sempre maggiore successo nelle applicazioni industriali principalmente per la sua densità, $2,7 \text{ g/cm}^3$, circa un terzo di quella dell'acciaio.

Raramente esso è utilizzato sotto forma di metallo puro ma lo si trova sotto forma di numerose leghe.

Una prima fondamentale classificazione delle leghe di alluminio è tra leghe *da lavorazione plastica* e *da fonderia*.

Le leghe da "*lavorazione plastica*" rappresentano la frazione più importante delle leghe leggere sia in termini numerici che di applicazioni. Sono quelle il cui utilizzo avviene allo stato di

semilavorati (estrusi, laminati ecc.) ottenuti mediante processi di trasformazione plastica di prodotti primari.

I numerosi tipi di leghe adatte alla lavorazione plastica (come riportato nella tabella successiva) sono identificate commercialmente da una sigla di quattro cifre, dal 1000 al 9000.

La sigla e' accompagnata anche da lettere maiuscole che servono per distinguere il trattamento termico che le leghe hanno subito.

Es. Xxxx - Tn

dove:

- la prima X indica la famiglia di leghe;
- la seconda X indica eventuali varianti dalla lega originaria, alla quale è riservata la cifra 0;
- Le due X finali indicano gli elementi secondari;
- Tn indica il tipo di trattamento termico subito, dove in caso di nessun trattamento si indica con la lettera O.

Tabella 4.4: Classificazione delle leghe di alluminio per lavorazioni plastiche.

Serie	Alligante principale	Serie	Alligante principale
1xxx	Alluminio puro	5xxx	Magnesio
2xxx	Rame	6xxx	Silicio e Magnesio
3xxx	Manganese	7xxx	Zinco
4xxx	Silicio	8xxx	Varie

Con il termine "*da fonderia*" si intendono le leghe particolarmente adatte alla realizzazione di getti e quindi ad essere colate allo stato liquido e a solidificare in una forma che riproduce l'oggetto da realizzare. Per questa leghe esiste una duplice classificazione, una secondo le norme europee EN 1706 e 1780 mentre l'altra in uso negli Stati Uniti, entrambe basate su codici numerici.

Tabella 4.5: Classificazione delle leghe di alluminio per fonderia secondo le norme europee EN 1706 e 1780.

CASTING ALLOYS*) EN AB- EN AC- EN AM-	1XXX0	None (min. 99.00% Al)	*) letters preceding the alloy numbers have the following meaning EN = European Standard A = Aluminium B = Ingot C = Cast Alloy M = Master Alloy W = Wrought Alloy
	2XXX0	Cu	
	4XXX0	Si	
	5XXX0	Mg	
	7XXX0	Zn	
	8XXX0	Sn	
	9XXX0	Master Alloys	

Sources: according to EN 573; prEN 1780

Tabella 4.6: Sistema di designazione delle leghe da fonderia in uso negli USA.

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

4.12. Il Titanal

L'azienda austriaca AMAG rolling si è dedicata già da molti anni allo sviluppo di una lega di alluminio adatta agli sport invernali arrivando circa 25 anni fa alla creazione del Titanal.

Il Titanal, al contrario di quello che potrebbe suggerire il nome, non è né un titanio né una lega di alluminio contenente titanio, ma una lega alto resistenziale appartenente alla famiglia delle leghe 7xxx (Al-Zn), molto note nel campo aerospaziale.

Fin da subito questo materiale ha trovato un importante impiego come materiale strutturale nella realizzazione di sci con costruzione sandwich rispondendo a pieno alle esigenze di leggerezza e alta resistenza tipiche del campo sciistico. L'uso di compositi in fibra ad alto modulo elastico in combinazione con il Titanal, quindi l'abbinamento di un materiale isotropo con uno anisotropo, risulta oggi la migliore tecnica costruttiva di uno sci garantendo ottima presa di spigolo anche su nevi dure e buon funzionamento alle velocità elevate.

Altri importanti utilizzi del Titanal, in cui spesso viene preferito ai materiali compositi, sono nella produzione di ramponi e di bastoncini, sia da sci che da camminata. Ciò è dovuto al mix di leggerezza, resistenza meccanica e duttilità che questo materiale riesce a garantire a differenza dei compositi che, da un punto di vista di resistenza e leggerezza risultano migliori, ma sono molto più sensibili ad eventuali impatti.

Tabella 4.7: Confronto tra le quantità di elementi in lega tra il Titanal e le principali leghe 7000.

Alloy	Cu %	Mg %	Zn %	Zr %
AMAG Titanal®	~ 1.7	~ 2.5	~ 7	~0.1
7075	~ 1.2-2.0	~ 2.1-2.9	~ 5.1-6.1	-
7050	~ 2.2	~ 2.2	~ 6.2	-

4.12.1 Processo produttivo: l' EMC

Come è possibile notare dalla tabella delle composizioni chimiche, rispetto alle altre due leghe commerciali, il Titanal contiene più elevate percentuali di leganti il che comporta maggiori difficoltà nel processo di fusione.

Per la realizzazione dei lingotti si utilizza l' EMC (electro-magnetic casting), tecnologia all'avanguardia per la colata delle leghe di alluminio delle serie 2xxx, 3xxx, 5xxx e 7xxx. E' un processo che generalmente può essere classificato come appartenente ai processi di colata semicontinua, e permette la realizzazione di lingotti di notevoli dimensioni

(fino a 2320 x 600 x 7200 mm) con qualità nettamente superiori rispetto a quelle ottenute con tecnologie convenzionali.

Com'è noto la microstruttura del materiale solidificato è determinata dalle modalità di asportazione del calore da parte dello stampo, che generalmente è raffreddato mediante acqua. Durante i processi convenzionali di colata in lingotti, per effetto del diretto contatto del materiale fuso con lo stampo si crea un forte gradiente termico che porta a una microstruttura non omogenea e una segregazione inversa¹¹ degli elementi leganti.

Al contrario, l'EMC, grazie a un campo magnetico generato da induttori percorsi da correnti alternate ad alta frequenza, permette al materiale fuso di stare staccato dalle pareti dello stampo garantendo un raffreddamento omogeneo anche su lingotti di dimensioni elevate grazie alla convezione forzata che si riesce a generare. La convezione favorisce una nucleazione eterogenea portando a una struttura molto più omogenea, notevole riduzione delle macrosegregazioni, qualità superficiale del lingotto superiore.

Se si considera l'EMC unicamente dal punto di vista della produzione di lingotti, rispetto ai sistemi convenzionali, presenta degli svantaggi economici tra i quali:

¹¹ Segregazione inversa: avviene nelle strutture dendritiche, le quali sono caratterizzate da una concentrazione degli elementi in lega maggiore in superficie rispetto al centro.

- Costo iniziale dell'impianto;
- Elevata complessità dell'automazione presente nell'impianto;
- Fabbisogno energetico elevato.

Tuttavia se estendiamo il campo di analisi al successivo processo di laminazione, questi problemi possono essere chiaramente controbilanciati. Il principale vantaggio che è possibile osservare è la riduzione o l'eliminazione della fessurazione dei bordi nel processo di laminazione a caldo: la formazione di cricche nei bordi è dovuto alla presenza della calotta di materiale raffreddato ad alta velocità che riduce la resistenza del lingotto nella parte esterna. I bordi dovranno essere quindi rifilati per eliminare la zona difettosa.

I lingotti ottenuti con processo EMC grazie alla loro struttura omogenea e all'ottima qualità superficiale non subiscono fessurazione dei bordi permettendo l'eliminazione dell'operazione di rifilatura aumentando così l'efficienza del processo.

4.12.2.Preparazione superficiale

I prodotti destinati all'utilizzo nell'industria dello sci o aeronautica subiscono un trattamento superficiale di anodizzazione con acido fosforico. Questo trattamento permette di ottenere un sottile strato di materiale superficiale caratterizzato da una struttura a poro aperto capace di offrire un'eccezionale adesione alle resine epossidiche o fenoliche utilizzate per l'incollaggio.

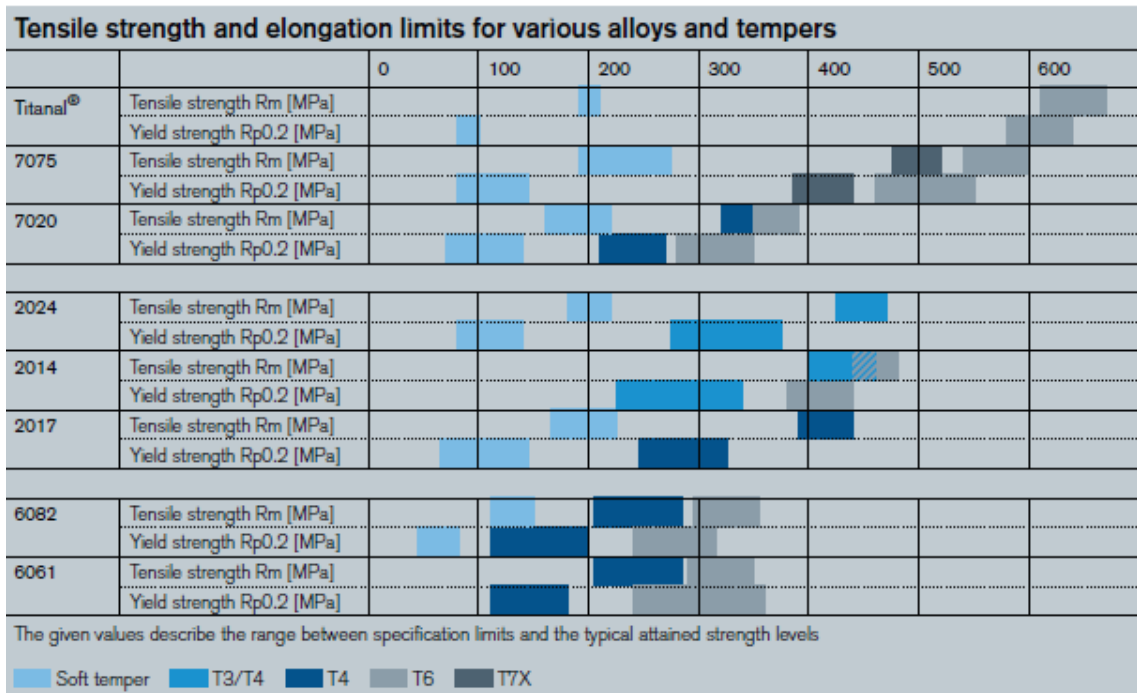
4.12.3.Caratteristiche meccaniche

Il Titanal utilizzato in campo sciistico subisce come ultima operazione un trattamento termico T6 (tempra più invecchiamento artificiale) arrivando ad ottenere caratteristiche meccaniche quasi del 20% superiori rispetto alle analoghe leghe commerciali. Si riportano in seguito due tabelle che riassumono le proprietà fisiche e meccaniche del Titanal.

Tabella 4.8: Proprietà fisiche del Titanal.

Technical-physical characteristics		
Density g/cm ³	Mean lin. heat expansion co-efficient 20 – 100°C in cm/cm°C	Elasticity module MPa
2.82	23.10 ⁻⁶	approx. 72,000

Tabella 4.9: Proprietà meccaniche del Titanal e di altre leghe utilizzate per impieghi strutturali.



Capitolo 5:

I materiali impiegati nella realizzazione del core dello sci

5.1. Il core

Il core di uno sci, cioè la parte racchiusa tra gli strati di materiale strutturale, è una parte fondamentale per la determinazione del comportamento dinamico dello sci.

Il suo compito è quello tipico di un core all'interno di un pannello sandwich: aumentare la distanza tra gli strati di materiale strutturale aumentando così la rigidità ma con l'obiettivo di rendere il più basso possibile l'incremento di peso. Il suo spessore è variabile lungo la lunghezza dello sci, determinando variazioni di rigidità.

Intuitivamente si può affermare che tanto più il materiale impiegato per la realizzazione del core presenta caratteristiche di rigidità e di resistenza a taglio, tanto più questo dà un contributo efficace alla struttura sandwich in generale. Le caratteristiche principali che deve presentare un materiale destinato alla realizzazione di un core sono la bassa densità e una buona resistenza a compressione, per mantenere la distanza tra le pelli anche sotto l'azione di carichi localizzati.

I materiali impiegati nella realizzazione del core di uno sci sono il legno, le schiume polimeriche e più raramente le strutture honeycomb. Da questo dipende fortemente il comportamento dello sci stesso, tanto che in base al materiale impiegato si differenzia tra sci di qualità e sci economico.

5.2. IL Legno

Il legno è stato il primo materiale ad essere impiegato, tuttavia continua ad essere ritenuto il miglior materiale per la realizzazione del core dello sci. A partire dagli anni 70 con l'introduzione delle schiume questo materiale era stato accantonato ma è stato ripreso per le sue eccellenti qualità.

Oggi è utilizzato per la realizzazione di sci di alto livello: sci nettamente più costosi rispetto a quelli realizzati in schiuma ma che garantiscono ottime prestazioni.

Il legno, è un composito naturale in cui la cellulosa rappresenta il tessuto e la lignina occupa il posto della matrice resinosa. L'insieme delle fibre cellulosiche danno un alto grado di elasticità e resistenza meccanica mentre la lignina ha caratteristiche contrarie, di rigidità e fragilità.

Il legno è molto apprezzato in quanto riesce a garantire una reattività ed elasticità naturale che nessun altro materiale artificiale riescono a produrre permettendo allo sciatore di avere un grande feeling con l'attrezzo. Il suo comportamento vivace è per di più duraturo nel tempo e insensibile alla temperatura.

Esso infatti conserva nello sci, sia a temperatura ambiente che sotto zero, una grande stabilità dimensionale. L'anima di legno se paragonate alle materie plastiche ha maggiori capacità di smorzamento delle vibrazioni derivanti delle asperità del terreno.

Il legno con una buona stagionatura e con un tasso d'umidità equilibrato determina nell'anima dello sci costanti caratteristiche di portanza, favorisce la stabilità della centina¹² nei cambiamenti di temperatura e facilita la conduzione anche ad alte velocità. La principale controindicazione dell'utilizzo del legno è il suo peso che è sicuramente superiore a quello di una schiuma; un modo per ovviare a questo problema è la realizzazione di core ibridi che combinano legno e schiuma.

Generalmente non si utilizza un legno unico nella realizzazione del core, ma piuttosto un mix di due o più legni (uno duro e uno più flessibile) disposti a listelli longitudinalmente per ottenere un giusto compromesso di rigidità.

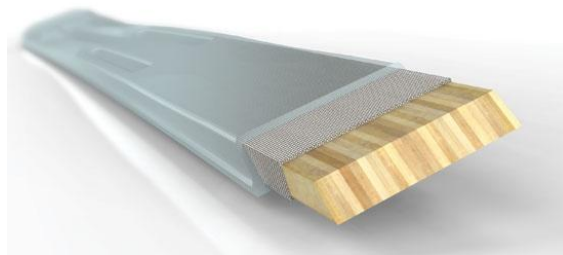


Figura 5.1: Disposizione dei diversi tipi di legno all'interno del core.

I parametri più importanti che determinano la scelta della tipologia di legname sono: la rigidità (modulo elastico), la resistenza (resistenza a trazione) e la densità. I tipi più comuni di legno utilizzati nel settore dello sci sono: frassino, acero, betulla, abete, pioppo, faggio.

¹² Centina: La centina è il profilo ad arco generato dallo sci posto su un piano tra i due punti di contatto (coda e punta). Questo ponte longitudinale permette di distribuire il peso dello sciatore su tutta la lunghezza dello sci determinandone la portanza.

Il frassino offre prestazioni eccellenti dal punto di vista della resistenza agli urti e della resistenza e durezza specifiche. L'abete è un legno anch'esso duro ma più leggero che combinato al frassino permette di ottenere core non troppo pesanti ma in grado di garantire elevata rigidità e resistenza.

La seguente tabella mette a confronto queste proprietà per diversi tipi di legno comune.

Tabella 5.1: Proprietà dei principali legni impiegati nello sci.

Tipologia	Modulo Elastico [GPa]	Resistenza [MPa]	Densità [g/cm ³]
Frassino, nero	11	88	0,526
Frassino, bianco	12	108	0,638
Pioppo	8	60	0,401
Betulla	13	95	0,720
Abete bianco	14	84	0,410

5.3.Core schiumoso

Le schiume polimeriche sono state introdotte come materiale per il core a partire dagli anni '70 in sostituzione del legno. Il basso costo e l'elevata produttività che garantiva questo materiale sono stati i fattori vincenti che hanno determinato la quasi scomparsa dell'utilizzo del legno. Le schiume riscossero successo fin da subito non solo nel settore dello sci, ma rapidamente cominciarono ad essere impiegate per la realizzazione di pannelli sandwich destinati all'automotive e al settore aeronautico.

Solo successivamente si è capito che le schiume non riuscivano a dare allo sci lo stesso comportamento che era in grado di dare il legno: questo si traduceva in sci con prestazioni inferiori ad uno sci in legno. Da questo momento, e tutt'ora, le schiume vengono impiegate per la realizzazione di sci di medio e basso livello, che comunque numericamente rappresentano la maggioranza degli sci prodotti.

Grazie all'impiego di schiuma si riescono ad ottenere degli sci economici, leggeri, flessibili e quindi di facile impiego.

La schiuma all'interno dello sci si può trovare in due forme: iniettata o fresata.

Nel caso della schiuma iniettata, che risulta essere la forma di gran lunga più usata, la schiuma viene iniettata dalla coda all'interno dello sci già assemblato il quale presenta una cavità all'interno. E' il metodo più economico fra i due, ma anche quello meno preciso.

Le schiume fresate invece sono ricavate da grossi blocchi di schiuma già pronta: attraverso operazioni di taglio e fresatura viene realizzata la porzione di schiuma da inserire all'interno dello sci in fase di assemblaggio. E' un metodo più preciso e più flessibile.

Le schiume utilizzate nella quasi totalità dei casi sono le schiume polimeriche espanse.

5.4. Le schiume polimeriche espanse

I materiali espansi possono essere considerati materiali compositi costituiti da un materiale polimerico e da gas.

Presentano una struttura cellulare che conferisce loro una densità notevolmente inferiore rispetto ai comuni materiali polimerici (densità molto variabili comprese tra 20 - 400 Kg/m³).

Sono degli ottimi isolanti termici e acustici e per questo trovano impiego anche in settori diversi da quelli dell'ingegneria meccanica quali l'edilizia e il packaging.

I materiali espansi si possono ottenere da polimeri sia termoplastici sia termoindurenti, tuttavia non tutti i polimeri sono buoni candidati per essere espansi.

La formazione delle cavità avviene mediante un processo di espansione, chiamato anche schiumatura, la cui struttura ottenuta dovrà essere "congelata", tramite brusco raffreddamento per i termoplastici e tramite reticolazione per i termoindurenti, ottenendo una struttura schiumosa rigida con cavità piene di gas o aria.

Le celle possono essere chiuse o aperte, possono avere diversa forma e distribuzione. Se le celle sono aperte l'aria può uscire e entrare, se sono chiuse il gas vi rimane intrappolato.

Le proprietà del materiale polimerico espanso sono determinate dalle caratteristiche chimiche e fisico-meccaniche del materiale di partenza (matrice), dalla densità e della tipologia di struttura. Al diminuire della densità diminuiscono le caratteristiche meccaniche, mentre aumentano il potere isolante, l'assorbimento acustico.

A causa della presenza delle cavità, come è immaginabile pensare presentano una scarsa resistenza a trazione; tuttavia possono avere una buona resistenza a compressione, soprattutto nel caso dei materiali con matrice rigida e celle chiuse.

La struttura delle celle è molto importante per definire le caratteristiche del materiale. Una struttura a celle aperte con una matrice elastica e flessibile consente di avere un materiale che si deforma facilmente e recupera la deformazione. Un materiale a celle completamente chiuse,

in cui non sono possibili movimenti convettivi dei gas all'interno, sarà un ottimo isolante termico.

Nella pratica si ha quasi sempre a che fare con strutture intermedie a queste due famiglie, per cui è sempre presente una certa percentuale di celle rotte nelle strutture a celle chiuse, così come esistono celle chiuse all'interno di una struttura prevalentemente a celle aperte.

Tendenzialmente, le schiume termoindurenti possono essere ottenute sia a celle chiuse che aperte, mentre quelle termoplastiche tendono più facilmente ad essere a celle chiuse.

Le pareti delle celle possono essere flessibili o rigide. Più sono rigide più il materiale è resistente a compressione.

5.4.1. Tecnologie di formazione

Il processo di espansione, chiamato anche schiumatura, si può ottenere principalmente in tre differenti modalità:

- **Espansione meccanica:** il polimero allo stato fluido incorpora aria per forte agitazione meccanica. È un metodo poco utilizzato.
- **Espansione fisica:** nella schiumatura fisica, inizialmente, si ha una fase liquida continua, che nel caso di polimeri termoplastici consiste nel polimero stesso portato allo stato fluido, mentre nel caso di termoindurenti consiste in un prepolimero non ancora reticolato. Questa fase liquida viene additivata con opportuni agenti, detti espandenti, che hanno lo scopo di generare, successivamente, delle bolle di gas all'interno della massa liquida. Gli espandenti sono in genere liquidi basso bollenti (idrocarburi come pentano e eptano) disciolti nel polimero, vaporizzano alla temperatura di lavorazione creando una struttura cellulare. È un metodo generalmente applicato ai polimeri termoplastici;
- **Espansione chimica:** genera il fenomeno attraverso una reazione chimica. Gli espandenti chimici sono sostanze introdotte nella massa liquida che, in opportune condizioni di temperatura e pressione, reagiscono tra loro rilasciando gas come CO₂, CO, N₂, NH₃.

Componenti in schiuma vengono realizzati con lo *stampaggio a iniezione di schiuma*, detto anche stampaggio assistito dal gas. L'agente espandente viene mescolato precedentemente al polimero in fase liquida e poi iniettato all'interno della cavità nella quale avviene la vera e

propria reazione di espansione. La cavità da riempire può essere rappresentata dai due semistampi chiusi oppure, come nel caso degli sci, da una cavità interna derivante dal precedente assemblaggio.

5.5. Le principali schiume polimeriche espanse

5.5.1. Schiume poliuretaniche

Le schiume poliuretaniche sono senza dubbio le schiume più utilizzate nel settore dello sci. Appartengono alla famiglia delle sostanze polimeriche chiamate poliuretani contenenti più legami uretanici. La sintesi di questo polimero è basata sulla reazione tra isocianati e polioli. Le proprietà e le caratteristiche del prodotto ottenuto dipendono sia dalla struttura dei prodotti di base, polioli e isocianati, sia dal tipo di catalizzatori e additivi impiegati; catalizzatori e additivi vengono spesso premiscelati con i polioli e contribuiranno, durante la reazione con l'isocianato, sia a controllare la reazione di sintesi del poliuretano, sia a modificarne le proprietà. A seconda dei reagenti infatti è possibile realizzare schiume molto differenti: si possono ottenere così schiume molto flessibili, semirigide o rigide variando il grado di reticolazione del polimero.

I due isocianati più largamente impiegati nella fabbricazione di queste schiume sono il TDI e il PMDI: generalmente TDI viene impiegato per la sintesi di schiume flessibili, mentre il PMDI trova maggiore applicazione nella produzione di schiume rigide.

Una proprietà importante di queste schiume è la facilità di adesione che presentano verso svariati materiali; questa caratteristica è molto sfruttata nella tecnologia delle costruzioni.

Le schiume rigide presentano un ottimo comportamento verso gli agenti chimici, non si decompongono e possono essere impiegate in un range di temperatura piuttosto elevato, compreso tra -200° e +150°C.

Nella costruzione di sci si impiegano schiume rigide o semirigide a seconda della rigidità che vogliamo dare allo sci. Schiume flessibile posseggono proprietà meccaniche troppo basse per impieghi strutturali e il loro campo di utilizzo è il packaging e l'imbottitura.

5.5.2. Le schiume polistireniche

Tra i polimeri espansi le schiume polistireniche rappresentano una famiglia molto importante sia dal punto di vista dei volumi produttivi che, da quello della vastità delle applicazioni. La diffusione di questi materiali è tale che, nel linguaggio comune, parlando di “polistirolo” si intende sempre la forma espansa. La loro applicazione non è sicuramente nel mondo dello sci bensì vengono utilizzate principalmente per l’imballaggio e nell’edilizia.

5.5.3. Le schiume in PVC

Le schiume in polivinilcloruro, anch’esse molto impiegate come core per strutture sandwich, possono essere sia termoplastiche che termoindurenti. Le versioni termoplastiche sono più flessibili, più facili da termoformare mentre quelle reticolate presentano migliori caratteristiche meccaniche, sono più resistenti ai solventi e hanno una maggiore resistenza alla temperatura ma presentano maggiore fragilità. Le schiume in PVC spesso subiscono un trattamento termico di stabilizzazione per migliorare la loro stabilità dimensionale. Sono molto impiegate nel settore navale.

5.6. Honeycomb

Un terzo tipo di struttura impiegata nella realizzazione del core dello sci, oltre al legno e alla schiuma, è la struttura honeycomb. Tale struttura prende questo nome per la forma ad alveare composta da tante celle che possono avere forma e dimensioni diverse.

Le tre forme di base più diffuse sono quella *esagonale*, *flex-core*, e *sovra-espansa*. La forma esagonale è di gran lunga la configurazione più comunemente utilizzata: è strutturalmente molto efficiente l’unico svantaggio che presenta è la limitata deformabilità. Flex-core, come indica il nome stesso è stato sviluppato per honeycomb che necessitano di elevata deformabilità.

Presentano densità che possono variare tra i 20 e i 200 Kg/m³ e possono essere realizzati con diversi materiali: in campo sciistico i più impiegati sono le carte aramidiche come il Nomex e in qualche caso anche l’alluminio.

Le caratteristiche degli honeycomb ovviamente dipendono fortemente dal tipo di materiale impiegato, ma anche dalla conformazione delle celle e dallo spessore delle pareti. In genere hanno eccellenti proprietà per unità di peso, mentre tra gli svantaggi oltre alla difficoltà di manifattura, anche l’incollaggio con le pelli del sandwich è più delicata.

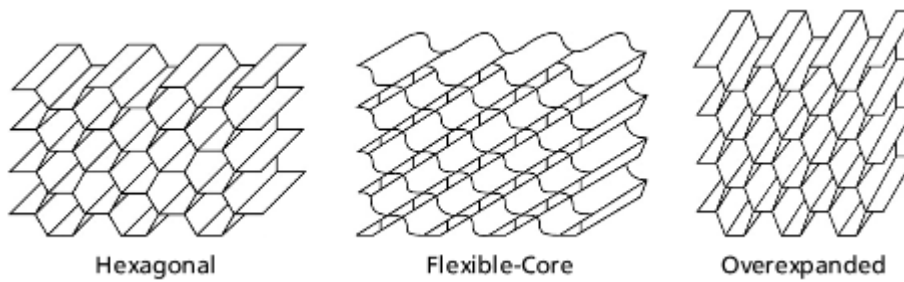


Figura 5.2: Differenti forme di honeycomb.

5.6.1.Honeycomb in alluminio

Grazie alle sue caratteristiche di durata, resistenza e non ultima facilità di produzione è forse il materiale più impiegato nella realizzazione di honeycomb. Tipicamente è quello che offre le migliori prestazioni in termini di rigidità e resistenza unendo una grande capacità di assorbire energia durante le deformazioni. I suoi campi applicativi sono soprattutto quello aeronautico mentre nel settore sciistico è stato utilizzato in passato.

5.6.2.Honeycomb in Nomex

Le carte aramidiche come il Nomex generalmente vengono impregnate con resina fenolica o con una poliimide. E' il prodotto più utilizzato nella realizzazione di honeycomb per sci in quanto ha caratteristiche di rigidità e leggerezza tipiche per la realizzazione di sci. Altri campi applicativi sono il settore ferroviario, aeronautico e navale.

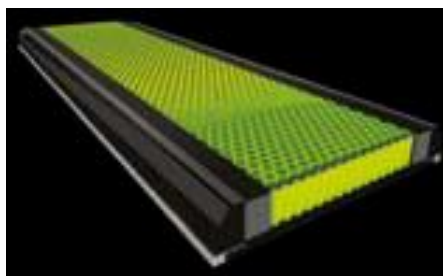


Figura 5.3: Core di uno sci realizzato in Nomex

5.6.3. Processi Produttivi

Essenzialmente esistono due metodi per la produzione di honeycomb: processo per *espansione* e il processo per *corrugazione*.

Il processo per espansione è principalmente impiegato per la realizzazione di honeycomb a bassa densità. I fogli piani di materiale vengono sovrapposti interponendo tra uno e l'altro dei fogli di materiale adesivo opportunamente sagomato in modo da creare la giunzione solo in alcuni punti. Il tutto viene posto in una pressa a caldo in cui viene fatta polimerizzare la resina adesiva. Successivamente il blocco viene ancorato nei due fogli estremi e tirato. I fogli cedono deformandosi plasticamente creando le celle.

Il processo per corrugazione è un processo più lento e più costoso impiegato per la realizzazione di honeycomb a alta densità o per materiali che non resistono al processo di espansione. I singoli fogli vengono prima deformati plasticamente tramite rulli e successivamente incollati insieme.

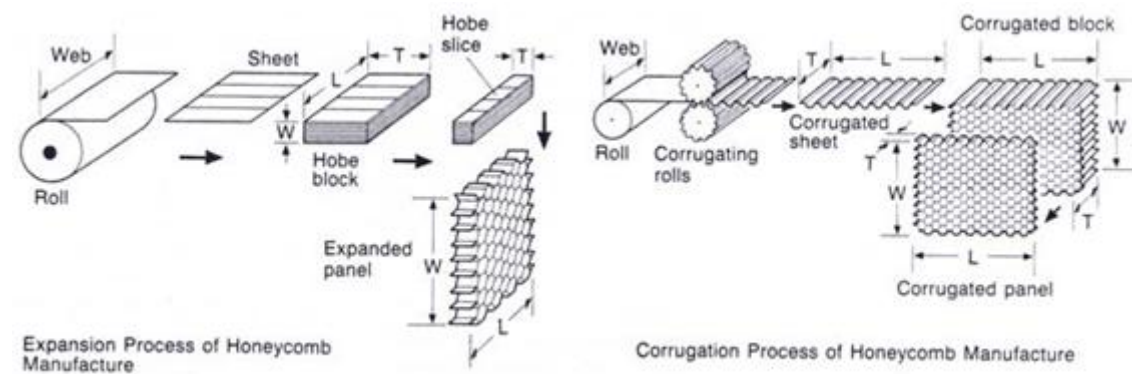


Figura 5.4: Processi produttivi per la realizzazione di honeycomb; a sinistra il processo per espansione, a destra il processo per corrugazione.

5.7. Metodo di selezione

Come si è visto già nel capitolo 1, lo sci in esercizio è sottoposto a sollecitazioni di torsione e flessione.

In questo paragrafo si cercherà di capire quale sia il materiale più adatto per la realizzazione del core, cioè il materiale che minimizza la massa una volta fissata la rigidità. Il metodo di confronto utilizzato si basa sugli indici di rigidità flessionale. Si metteranno a confronto alcuni dei principali materiali impiegati nel core analizzati precedentemente.

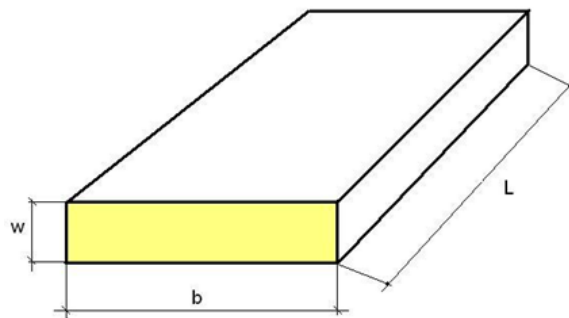
Si riportano in seguito le proprietà meccaniche dei materiali che andremo ad indagare.

Tabella 5.2: Proprietà dei principali materiali impiegati nel core.

Materiale	Densità [Kg/m ³]	Modulo Elastico [GPa]
Poliuretano (schiuma rigida)	62	0,02
Legno (Pioppo)	400	8
Honeycomb in Nomex	128	0,54
Honeycomb in Alluminio (lega 5052)	90	1,3

5.7.1 Ottimizzazione della rigidità flessionale

Per semplicità si approssima che il core dello sci abbia una sezione rettangolare costante per tutta la lunghezza dello sci. Siano noti tutti parametri geometrici.



- b , larghezza ;
- w , spessore;
- L , lunghezza della trave;

- ρ , densità del materiale impiegato;
- A , area della sezione;
- M , massa della trave definita come $M = A \cdot L \cdot \rho$.

Noti i parametri geometrici della sezione possiamo subito determinare il momento d'inerzia di quest'ultima:

$$I = \frac{1}{12} \cdot b \cdot w^3 \quad (5.1)$$

Essendo l'area della sezione costante, è possibile stabilire un legame di proporzionalità tra b e w :

$$b = C_1 \cdot w \quad (5.2)$$

questo ci permette di ottenere l'area nella forma:

$$A = C_1 \cdot w^2 \quad (5.3)$$

A questo punto è possibile sostituire quest'ultimo risultato all'interno della (5.1) ottenendo la seguente espressione:

$$I = \frac{1}{12} \cdot \frac{A^2}{C_1} \quad (5.4)$$

La rigidità flessionale può essere definita come $R = \frac{F}{\delta}$, dove F è il carico applicato e δ è la freccia. Naturalmente δ dipenderà dal momento d'inerzia della sezione e dalla conformazione di carico:

$$\delta = \frac{F \cdot L^3}{C_2 \cdot E \cdot I} \quad (5.5)$$

dove C_2 è una costante che dipende appunto dalla conformazione di carico, i cui valori si trovano tabellati nella tabella 2. . Ricaviamo ora la rigidità sostituendo la (5.5) alla definizione di rigidità:

$$R = \frac{F}{\delta} = \frac{C_2 \cdot E \cdot I}{L^3} \quad A = \frac{M}{L \cdot \rho} \quad (5.6)$$

A questo punto è possibile sviluppare una formulazione della massa in funzione di densità e modulo di elasticità. Alla (5.6) si può sostituire la (5.4) :

$$R = \frac{C_2 \cdot E \cdot A^2}{12 \cdot L^3 \cdot C_1} \rightarrow A^2 = \frac{12 \cdot R \cdot L^3 \cdot C_1}{C_2 \cdot E} \quad (5.7)$$

A quest'ultima relazione sostituiamo $M = A \cdot L \cdot \rho$ ottenendo:

$$M = \sqrt{\frac{12 \cdot R \cdot L^5 \cdot C_1 \cdot \rho^2}{C_2 \cdot E}} \rightarrow M = L^2 \cdot \sqrt{\frac{12 \cdot R \cdot C_1 \cdot L}{C_2}} \cdot \frac{\rho}{(E)^{\frac{1}{2}}} \quad (5.8)$$

E' possibile notare dall'ultima relazione come la massa dipenda dal rapporto $\frac{(E)^{\frac{1}{2}}}{\rho}$, noto con il nome di *indice di rigidezza*, il quale una volta fissati tutti i parametri geometrici e il valore di rigidezza, deve essere massimizzato per far si che la massa sia minima. Si esegue ora il confronto tra i vari materiali presi in considerazione:

Tabella 5.3: Valori dell'indice di rigidezza per i vari materiali.

Materiale	$\frac{(E)^{\frac{1}{2}}}{\rho}$
Poliuretano	$2,28 \cdot 10^{-3}$
Legno	$7,07 \cdot 10^{-3}$
Honeycomb in Nomex	$5,74 \cdot 10^{-3}$
Honeycomb in Alluminio	$12 \cdot 10^{-3}$

5.7.2.Osservazioni

Dall'osservazione dei risultati ottenuti si nota come il materiale più adatto alla realizzazione di core sia l'honeycomb in alluminio, seguito dal legno. Questo è dovuto al fatto che l'honeycomb è una struttura specializzata e studiata appositamente per la realizzazione di core, ma allo stesso tempo comporta costi nel componente finale sicuramente superiori. Il legno tende a risultare il miglior materiale per la realizzazione di core di sci perché oltre a un buon indice di rigidezza e a un costo nettamente inferiore all'honeycomb in alluminio, conferisce allo sci doti di elasticità che nessun materiale artificiale riesce a conferire. La schiuma poliuretana presenta prestazioni inferiori a tutti gli altri materiali presi in considerazione infatti il suo utilizzo è relegato a sci di basso livello dove il costo è una componente fondamentale.

BIBLIOGRAFIA

- Serope Kalpakjian, Steven R. Schmid, 2008, *Tecnologia Meccanica*, Pearson Education.
- George Lubin, 1982, *Handbook of Composites*, Van Nostrand Reinhold.
- Anthony Kelly, 1994, *Coincise Encyclopedia of Composite Materials*, Pergamon.
- P. K. Mallik, 1993, *Fiber – reinforced composites materials, manufacturing and design*, Marcel Dekker.
- Steven M. Kurtz, 2004, *UHMWPE Handbook*, Elsevier Ltd.
- Lorna J. Gibson, Michael F. Ashby, 1999, *Cellular Solids*, Cambridge University Press.
- Erich Muller, Stefan Lindinger, Thomas Stoggl, 2009, *Science and Skiing IV*, Meyer & Meyer Sport (UK) Ltd.
- F. C. Campbell, 2006, *Manufacturing technology for aerospace structural materials*, Elsevier Ltd.
- Consiglio Nazionale delle Ricerche, “Istruzioni per la progettazione, l’esecuzione ed il controllo di interventi di consolidamento statico mediante l’utilizzo di compositi fibro – rinforzati”, CNR – DT 200/2004, Roma (IT), 2004.
- Choon Chiang Foo, Gin Boay Chai, Leong Keey Seah, 2006, “Mechanical properties of Nomex material and Nomex honeycomb structure”, *Science Direct*, Composite structures 80 (2007), pp. 588 – 594.
- Sangeeta Hambir, J. P. Jog, 1999, “Sintering of ultra high molecular weight polyethylene”, *Bulletin of Material Science*, Vol. 23, June 2000, pp. 221 – 226.

- Wit Witkiewicz, Andrzej Zieliński, “Properties of the polyurethane (PU) light foams”, *Advances in Materials Science*, Vol. 6, No. 2 (10), October 2006
- Patric, Z. Gulisija, B. Jordovic, 2007, “Microstructure and characterization of electromagnetic casting Al 2024 alloy ingots”, *Metalurgija*, Vol. 47, 2008, pp. 343 – 346.
- E. Bernardo, Unità didattiche per il corso di Scienza dei Materiali per la Laurea Triennale in Ingegneria Meccanica (sede di Vicenza),
<http://www.dim.unipd.it/materiali/Personale/Bernardo/scimatvi.html>
- B. Innocenti, *Corso di Biomateriali*,
<http://www.masteringegneriaclinica.it/Bioingegneria>
- F. Bonollo, *Leghe di alluminio*,
http://static.gest.unipd.it/esercizi/IG_applicazioni_industriali_metallurgiche
- Licciulli, A. Chiechi, *Corso di scienza e tecnologia dei materiali ceramici*
http://www.antonio.licciulli.unisalento.it/didattica_2005
- F. Casolo, *Appunti sulla meccanica dello sci*, 2003
http://mecc.polimi.it/azionamenti/gruppo_lavoro/casolo/index.htm
- <http://www.nordica.com>
- <http://www.rossignol.com>
- <http://www.dynastar.com>
- <http://www.fischersports.com>
- <http://www.elanskis.com>
- <http://www.kastle-ski.com>
- <http://www.amag.at>

- <http://www.skibuiders.com>
- <http://www.grooveski.com>

