



Tecnologie di fabbricazione dei compositi a matrice termoindurente-parte 5



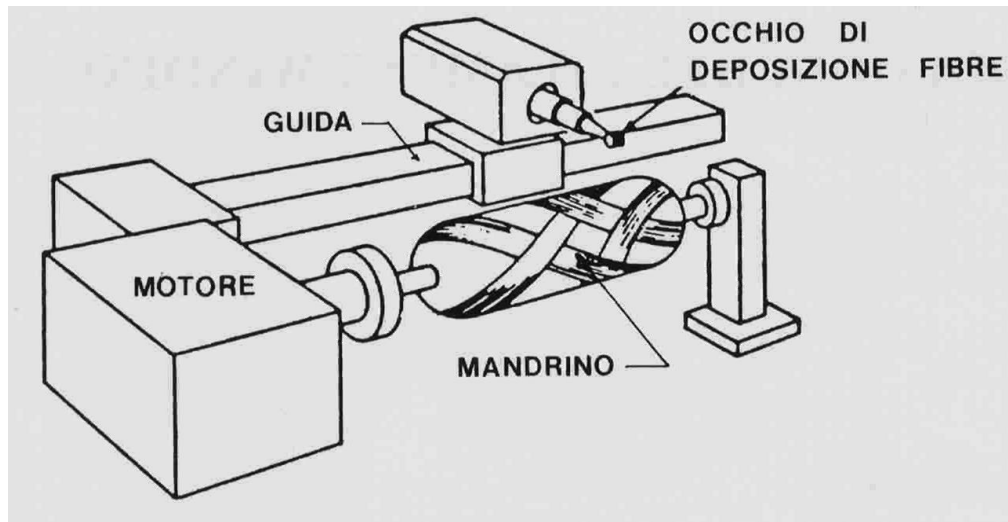
Avvolgimento (Filament Winding)



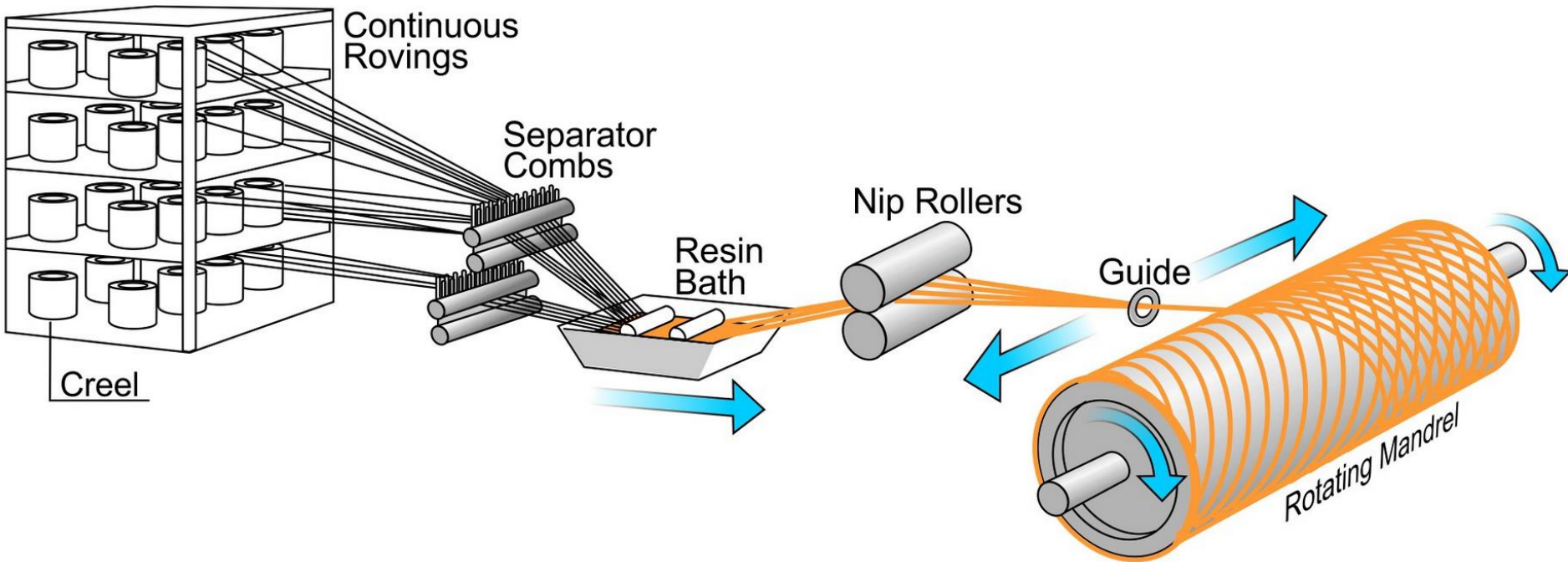
Schematizzazione

Il ***Filament Winding*** è un processo in cui fibre continue, impregnate di resina, vengono avvolte su di un supporto che può essere cilindrico, circolare o di qualsiasi altra forma che non presenti curvature rientranti detto **'mandrino'**.

Tale tecnologia permette la costruzione di pezzi assialsimmetrici o comunque a sezione convessa.



E' una tecnica molto usata per la costruzione di **serbatoi in pressione**, ma anche di grandi pezzi, come fusoliere di aerei, corpi di razzi vettori o serbatoi di ogni genere.



45- 180 Kg/h



Dipartimento di Ingegneria Chimica, dei Materiali e della Produzione Industriale Università di Napoli "Federico II"

Per soddisfare gli stringenti requisiti di efficienza strutturale tipici delle costruzioni aerospaziali, le tecnologie produttive dei materiali compositi devono **massimizzare la frazione volumetrica** del rinforzo ed **ottimizzarne la giacitura** in funzione della distribuzione degli sforzi.

Le tecnologie di avvolgimento (*filament winding*) e *braiding* rispondono appieno a questi criteri in quanto, limitatamente a geometrie assialsimmetriche cave, sono in grado di disporre le fibre di rinforzo secondo la giacitura degli sforzi principali; inoltre esse danno luogo a frazioni volumetriche del rinforzo pari a quelle della formatura in sacco da vuoto; infine il *filament winding* e il *braiding* sono tecnologie intrinsecamente automatizzabili ad elevato rateo produttivo e quindi economicamente convenienti.

Per questi motivi, esse costituiscono spesso la scelta più conveniente per realizzare aste di comando, tubazioni, serbatoi a pressione, involucri di missili a combustibile solido, quali *booster Ariane*



**Dipartimento di Ingegneria Chimica, dei Materiali e della Produzione Industriale
Università di Napoli “Federico II”**

**Esempio di
elemento ottenuto
con la tecnica del
filament winding o
braiding. Booster
del lanciatore
Ariane.**

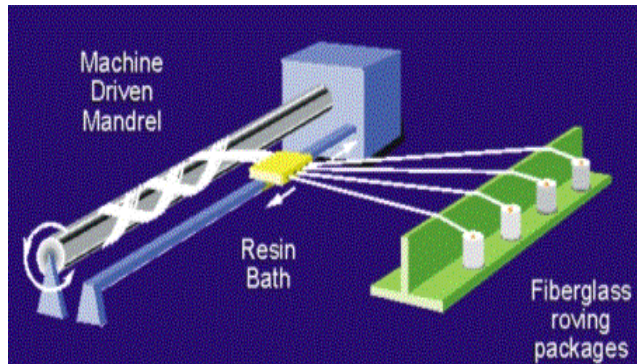




**Dipartimento di Ingegneria Chimica, dei Materiali e della Produzione Industriale
Università di Napoli "Federico II"**



**Esempio di struttura integrata e complessa
ottenuto con la tecnica del braiding. Gondole
motori e fusoliera del Boeing 767.**



Principali caratteristiche

- **Elevate proprietà meccaniche**
- **Completa automazione**
- **Elevata produttività**
- **Elevato costo macchina**
- **Processo discontinuo**
- **Limitazioni geometriche**

Principali applicazioni

- **tubi e serbatoi**
- **bombole per gas**
- **silos**



Fasi del processo

- 1. Montaggio del mandrino**
- 2. Applicazione del distaccante**
- 3. Applicazione del gelcoat (eventuale)**
- 4. Riempimento della vasca d' impregnazione**
- 5. Impregnazione della fibre attraverso la vasca e posizionamento sul mandrino**
- 6. Regolazione ed avviamento della macchina per realizzare avvolgimento**
- 7. Applicazione finale di un eventuale strato "shrink film"**
- 8. Polimerizzazione della resina (in forno o a temp. ambiente)**
- 9. Eventuale estrazione del mandrino**

Filament winding con pre impregnati





Materiali

- **Resine: poliestere, vinilestere, epossidiche**
- **Fibre: vetro, carbonio, aramidiche**
- **Formati: roving (prepreg)**

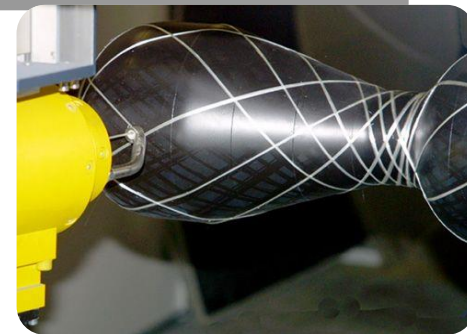
Stampi

- **Acciaio con rivestimento in cromo, alluminio**
- **Legno, plastica per prototipazione**
- **Sabbia o simili per mandrini collassabili**



Fattori caratterizzanti la tecnica di avvolgimento:

- **Il tipo di avvolgimento** : direzione di avvolgimento delle fibre.
- **Il tipo di impregnazione**: differente se si tratti di pre-preg o meno.
- **Il mandrino**: materiali, dimensioni e forma.
- **Il sistema di tensionamento**: fondamentale per l'esatta realizzazione del pezzo.
- **La macchina**: diversi g.d.l.
- **Il processo di polimerizzazione**: se viene realizzato a T_{amb} o meno.



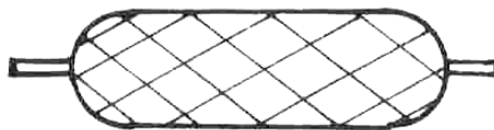


1) Angolo di avvolgimento

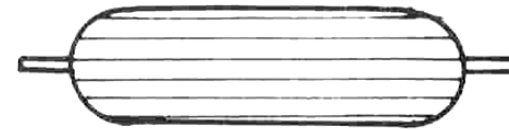
L'angolo compreso tra la direzione dei filamenti e la tangente al meridiano del mandrino



(a)



(b)



(c)

- a) **Avvolgimenti circonferenziale:** angoli di circa 90°
- b) **Avvolgimenti elicoidale:** angoli compresi tra 20° e 85°
- c) **Avvolgimenti polari:** angoli compresi tra 0° e 20°



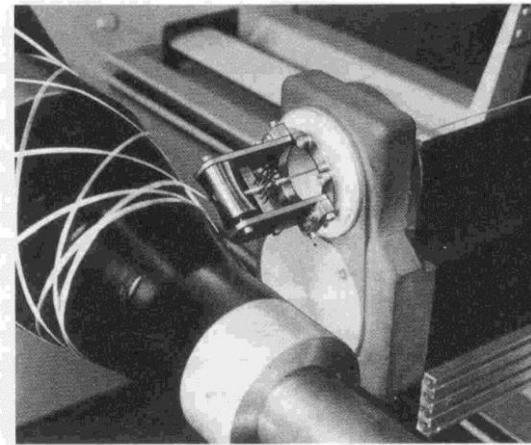
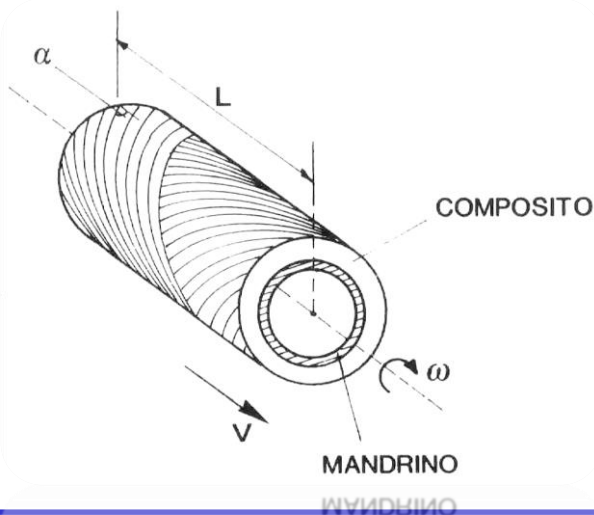
1) Angolo di avvolgimento

Progettazione degli avvolgimenti: allineare le fibre lungo la direzione in cui la struttura è maggiormente sollecitata

Gestione parametri di avvolgimento: $\omega(t)$; $v(t)$

Il rapporto $\omega(t)/v(t)$ fissa in ogni istante l'angolo di avvolgimento $\rightarrow \alpha$

$$= \tanh^{-1}\left(\frac{\omega R}{v}\right)$$



1) Angolo di avvolgimento

Velocità avvolgimento??

Le più moderne macchine per avvolgimento hanno capacità che raggiungono i 150m lineari al minuto. In realtà i valori medi sono di circa 100m al minuto, i quali scendono però fino a 15-30 m al minuto per avvolgimenti che richiedono grande accuratezza.



2) Impregnazione tra fibre e matrice

Il **tipo di impregnazione** delle fibre varia a seconda delle fibre che utilizziamo ed implica o meno l'utilizzazione di una **vaschetta di impregnazione** con resina

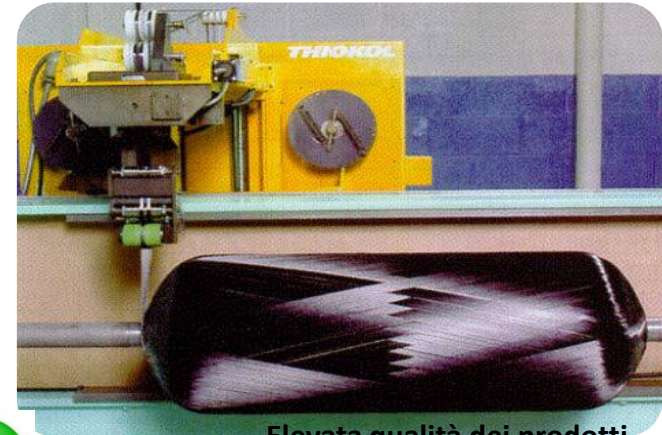
Wet Winding- (con vaschetta)



Economico

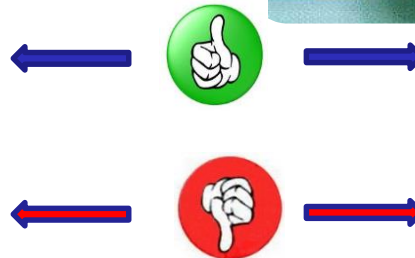
Difficoltà nel dosaggio resina
Scarsa qualità dei prodotti
Limitata velocità di produzione

Dry Winding



Elevata qualità dei prodotti
Elevata velocità di produzione
Alta Automazione del processo

Elevati costi di produzione
Elevati costi di
immagazzinamento



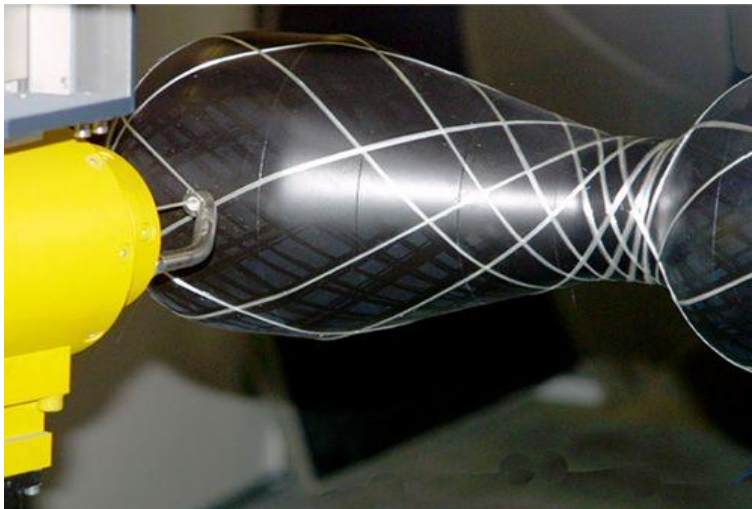


3) Il mandrino

Mandrino (Tamb o Riscaldato): elemento sul quale vengono deposte le fibre con un determinato grado di tensionamento.

Rimovibile: viene estratto o sciolto dal composito

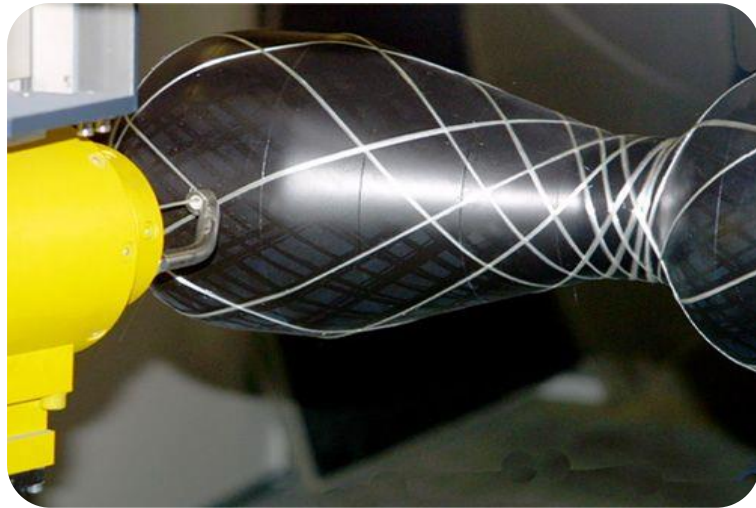
Fisso: nel caso in cui rimanga parte integrante del pezzo.



N.B.: Nel caso di mandrini rimovibili bisogna prevedere l'insorgere di **tensioni residue**.



3) Il mandrino



Materiali:

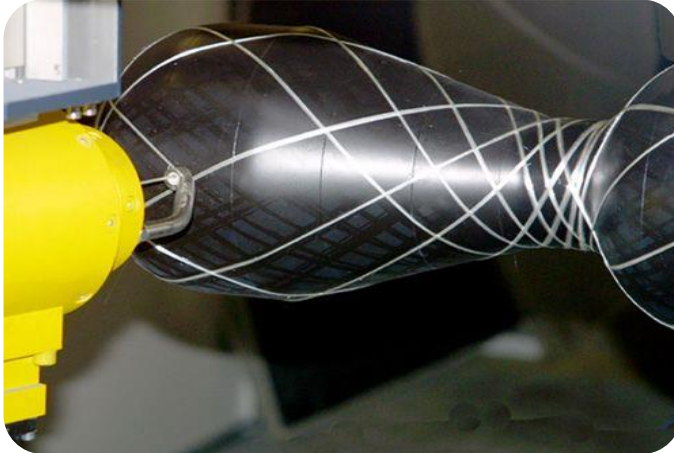
- Sabbia
- Sali solubili in acqua
- Leghe metalliche basso-fondenti
- Materiali termoplastici
- Gonfiabili in gomma
- Metallici scomponibili
- Composito



3) Il mandrino

Caratteristiche:

- Elevata rigidità strutturale
- Indefornabilità: geometria componente
- Elevata resistenza al calore
- Peso limitato
- Bilanciamento dinamico del mandrino
- Coefficiente di espansione termica
- Ecologico, smaltimento
- Costo

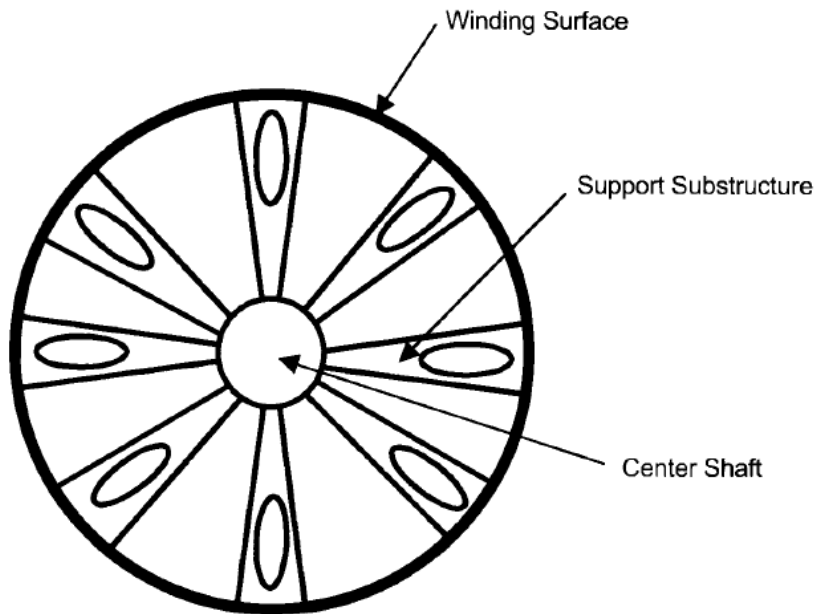




3) Il mandrino

Caratteristiche:

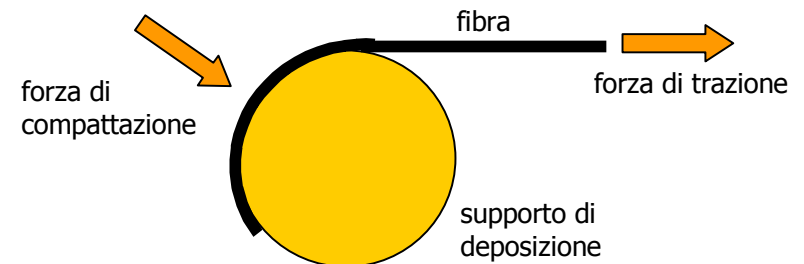
- Elevata rigidezza strutturale
- Indeformabilità: geometria componente
- Elevata resistenza al calore
- Peso limitato
- Bilanciamento dinamico del mandrino
- Coefficiente di espansione termica
- Ecologico, smaltimento
- Costo





4) Il Tensionamento

Tensione: parametro di processo che determina l'**allineamento**, ed in parte la **compattazione** → quindi la qualità e le proprietà meccaniche del componente.



Warning !!!!

*Riduzione delle proprietà
meccaniche
Piegamento
Logoramento*



4) Il Tensionamento

Il sistema per trasferire i *roving* dai rocchetti al mandrino costituisce una parte fondamentale dell'impianto. Esso consente di **controllare la tensione, il contenuto in resina, la larghezza della bandella e lo spessore degli strati**: la sua accurata progettazione permette di prevenire il danneggiamento delle fibre e garantisce ottime e ripetibili proprietà dei manufatti.

Il tensionamento delle fibre è garantito dagli occhielli di guida, dai freni a tamburo, dalle barre a forbice e dalla resistenza all'interno della vaschetta d'impregnazione della resina. **Tipicamente la tensione varia da 1 a 5 N per ogni *strand* che costituisce il *roving*.**

N.B. Un *roving* è costituito da più strands (ends), mentre uno strand è costituito da numerosi filamenti (204, 408 o 816) di diametro 9-10 μm



4) Il Tensionamento

Il sistema per trasferire i *roving* dai rocchetti al mandrino costituisce una parte fondamentale dell’impianto. Esso consente di **controllare la tensione, il contenuto in resina, la larghezza della bandella e lo spessore degli strati**: la sua accurata progettazione permette di prevenire il danneggiamento delle fibre e garantisce ottime e ripetibili proprietà dei manufatti.

Il tensionamento delle fibre è garantito dagli occhielli di guida, dai freni a tamburo, dalle barre a forbice e dalla resistenza all’interno della vaschetta d’impregnazione della resina. **Tipicamente la tensione varia da 1 a 5 N per ogni *strand* che costituisce il *roving***.

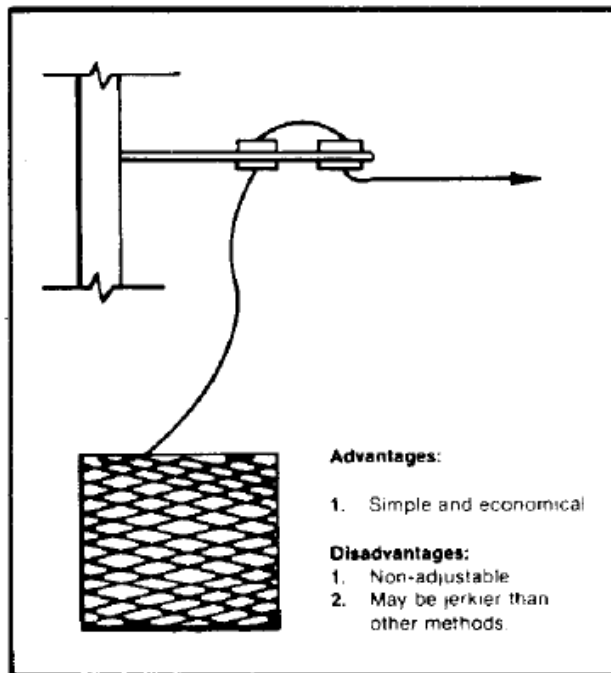
La procedura prescrive di applicare una tensione minima alle fibre secche per evitare un’abrasione eccessiva: la tensione viene poi aumentata una volta che le fibre si sono impregnate di resina.



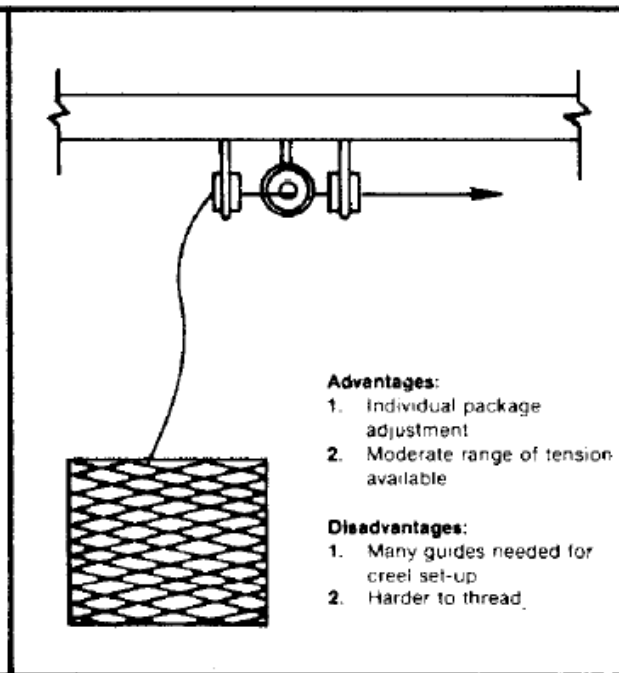
4) Il Tensionamento

Dopo il primo tensionamento, viene usato un numero minimo di guide in ceramica per convogliare gli strand verso la vasca di impregnazione.

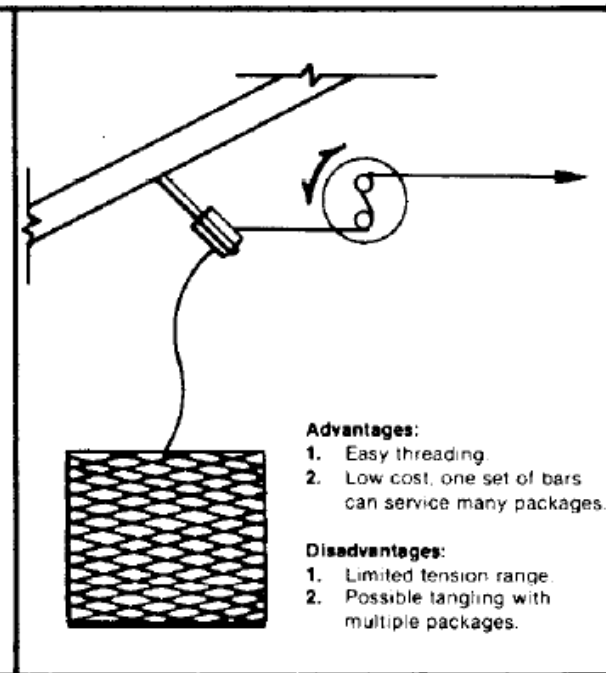
GUIDE EYES IN LINE



CENTER ROTATING GUIDE EYE



ROTATING SCISSOR BARS





4) Il Tensionamento

Grado di allineamento delle fibre.

Le fibre vengono deposte secondo le direzioni pianificate in fase di progettazione, al fine di massimizzare il comportamento del componente in fase di esercizio. Lungo questa direzione possono essere più o meno “distese”, nel senso che possono presentare corrugamenti, ondulazioni, ecc., che possono rappresentare difetti per il pezzo. L'aumento della tensione di deposizione della fibra fa sì che essa sia meglio distesa e quindi non dia questo tipo di conformazione al filamento.



Grado di compattazione del materiale.

Maggiore è il tensionamento, maggiore sarà la componente (*a parità di raggio di curvatura dello stampo*) che tende a schiacciare la fibra sul supporto, o sugli strati di fibre sottostanti durante l'avvolgimento: il risultato è quello di ridurre gli spazi vuoti che possono rimanere tra le fibre e di incrementare la densità del composito.



5) Le Macchine

Macchina ad asse orizzontale

Avvolgimenti circonferenziali ed elicoidali



Macchina ad asse verticale

Avvolgimenti polari



Robot Antropomorfo





Pro

1. Stratificazione della fibra secondo **traiettorie stabilite**
2. Elevata velocità di stratificazione ➡ **Alta produttività**
3. Elevata grado d'automazione ➡ **Diminuzione costi di manodopera**
4. **Prodotti ad elevate caratteristiche meccaniche**
5. Elevata ripetibilità produttiva ➡ **Affidabilità del processo**
6. Elevato rapporto resistenza/peso
7. Maggiori gradi di libertà ➡ **Realizzazione di geometrie complesse (con Robot)**
8. Elevata precisione sulla % fibre/matrice

Contro

1. **Scarsa finitura superficiale**
2. **Peggior riproduzione delle geometrie complesse**
3. **Elevato peso** ➡ Spessori costanti nella sezione
4. **Elevato costo dei mandrini**
5. Maggiore onere di progettazione ➡ **Ottimizzazione delle traiettorie**
6. Maggior numero di vuoti e di aria intrappolata ➡ **Maggiore presenza di difetti**
7. **Realizzazione d'oggetti cavi assialsimmetrici** ➡ **Limite generale superato dalla variante con Robot Antropomorfo**

Campi di applicazione



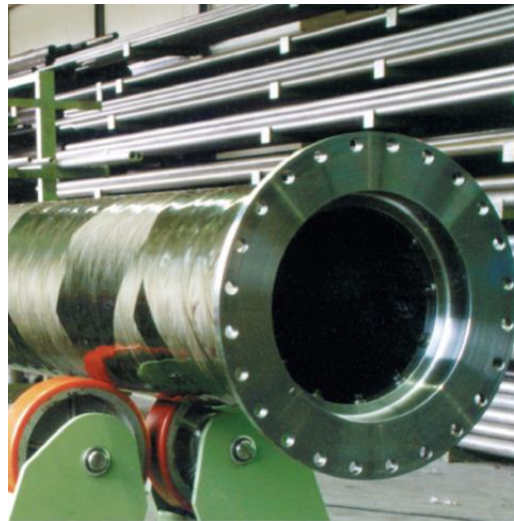
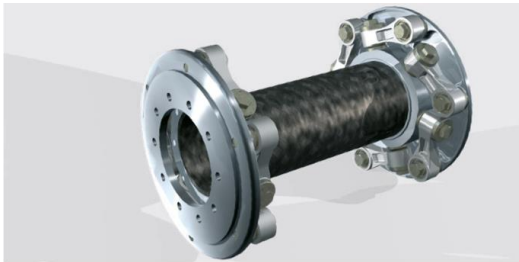
Questa tecnologia vista la sua versatilità ed economicità è applicata dal **settore aeronautico** tipo la fusoliera del **Boeing 787**, al **settore automotive** con i serbatoi di Gpl; dal **settore aerospaziale** ai tubi per convogliare fumi.

Composites Serve as Primary Structural Material





Applicazioni tipiche





**Dipartimento di Ingegneria Chimica, dei Materiali e della Produzione Industriale
Università di Napoli “Federico II”**

**Tecnologia per la Produzione
di parti in
Materiale Composito:**



Vantaggi

- **Metodo obbligato per la fabbricazione di tubi e serbatoi**
- **Basso costo dei formati di base e del mandrino**
- **Alta produttività**
- **Automazione**

Svantaggi

- **Elevato costo macchina**
- **Limitazioni sulle geometrie ottenibili**
- **Limitazioni negli angoli di orientazione delle fibre (10° - 15° min)**
- **Contenuto di fibre disuniforme lungo lo spessore**