

# Tecnologie esistenti

- Impregnazione manuale
- Spray up
- Stratificazione manuale preimpregnati
- Compression Moulding
- Avvolgimento filamentare
- Pultrusione
- Resin Transfer Moulding (RTM)
- Infusione

# Fasi generali tecnologie

Sebbene esistano varie tecnologie, le fasi seguite in generale sono:

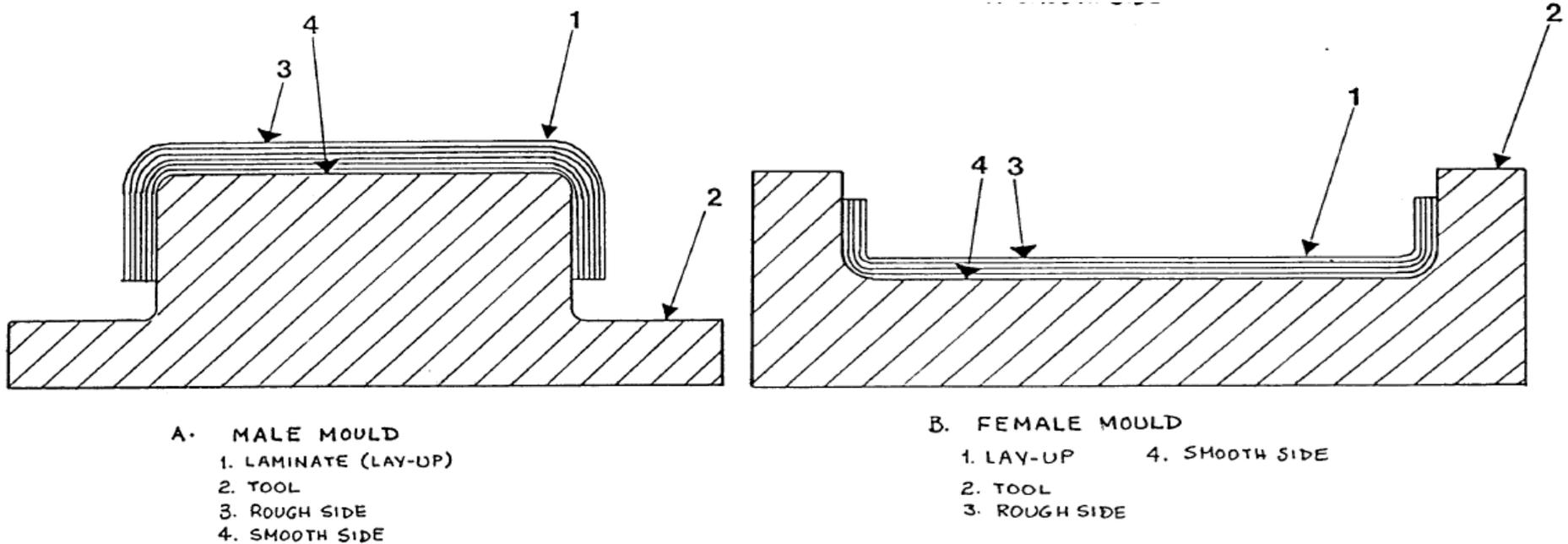
- Preparazione stampo
- Disposizione rinforzo e matrice
- Compattazione
- Cura della resina
- Estrazione componente dallo stampo
- Verifica

# Tecnologie manuali e semi-automatizzate

# Caratteristiche generali

- Tecnologia “povera” di tipo artigianale
- Lunghi tempi di realizzazione manufatti, adatta solo per produzione in bassa scala
- Bassi investimenti e costi di impianto
- Basse frazioni di volume di fibra a causa difficoltà impregnazione: 25- 30% (basse proprietà meccaniche)
- Alta dipendenza operatore, bassa possibilità di standardizzazione, ripetibilità e affidabilità
- Comunque ancora utilizzata per produzione manufatti di grandi dimensioni
- Abbastanza versatile in termini di forme ottenibili

Generalmente si usano stampi aperti: o uno stampo maschio o più frequentemente uno stampo femmina

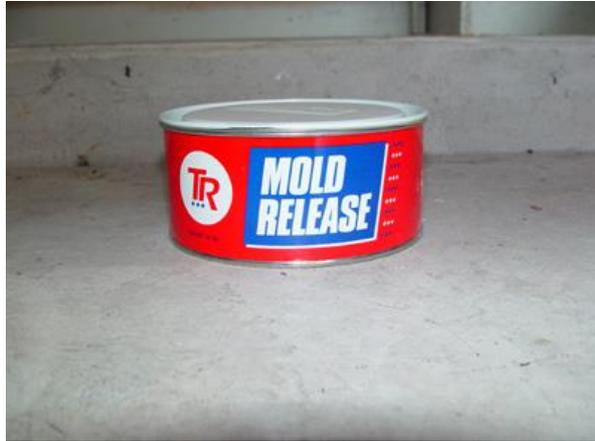


Il componente stampato avrà una buona finitura superficiale **SOLTANTO** dalla parte dello stampo

- Lo stampo viene spesso preparato a partire da un modello in positivo del componente da produrre
- Il materiale con cui si realizza lo stampo è importante per il numero di componenti che si riesce a produrre (usura)
- E' anche importante scegliere un materiale che resista alle temperature e alla pressione di cura
- Tolleranze dimensionali -> Espansione termica stampo
- Materiali usati: gesso, legno, plastica, alluminio, vetroresina, carbonio
- Importante eliminare porosità superficiale

Filmato stampo

Prima della deposizione del composito lo stampo viene ricoperto con il distaccante per consentire l'estrazione

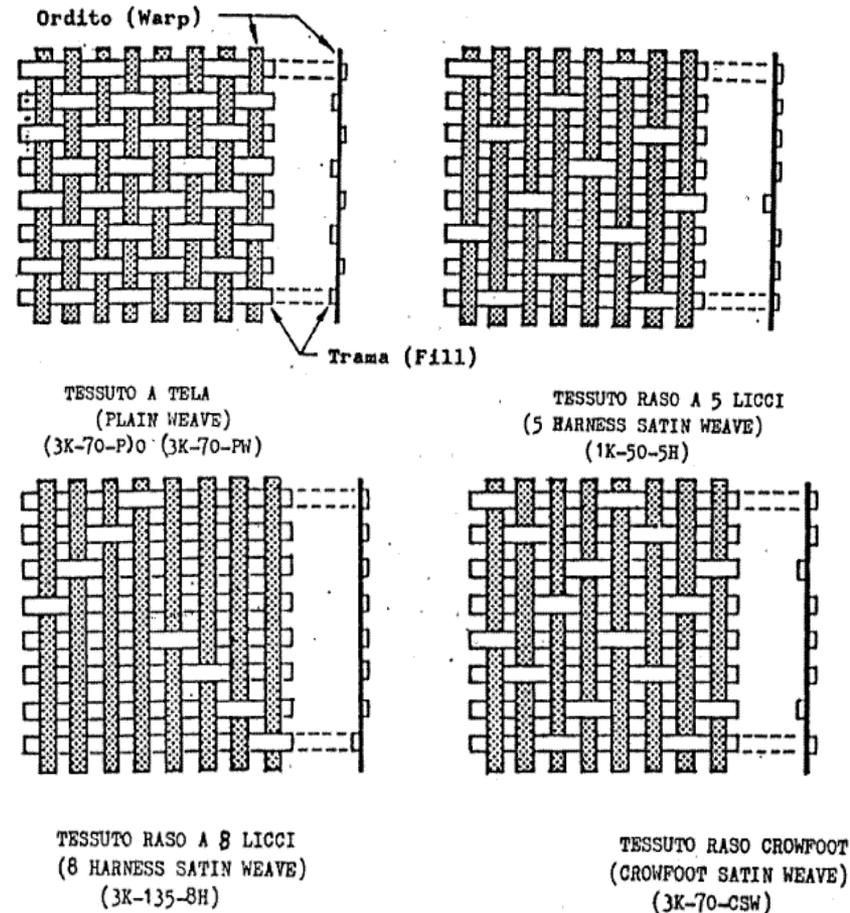


Come distaccanti si usano cere, polimeri (es. PVA), oppure fogli di materiale plastico o ricoprimenti in Teflon

- Dopo il distaccante si applica spesso lo strato estetico detto Gel – coat
- (Solo su superficie di valore estetico)
- Si tratta di un polimero a basso peso molecolare
- Basse proprietà meccaniche
- Funzione protettiva nei confronti dell'abrasione

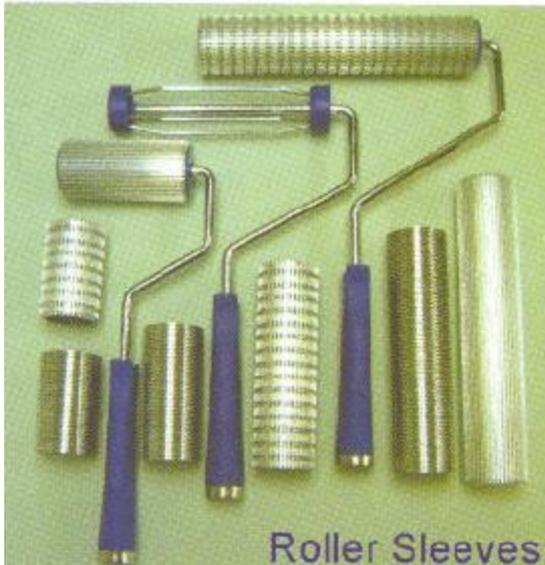
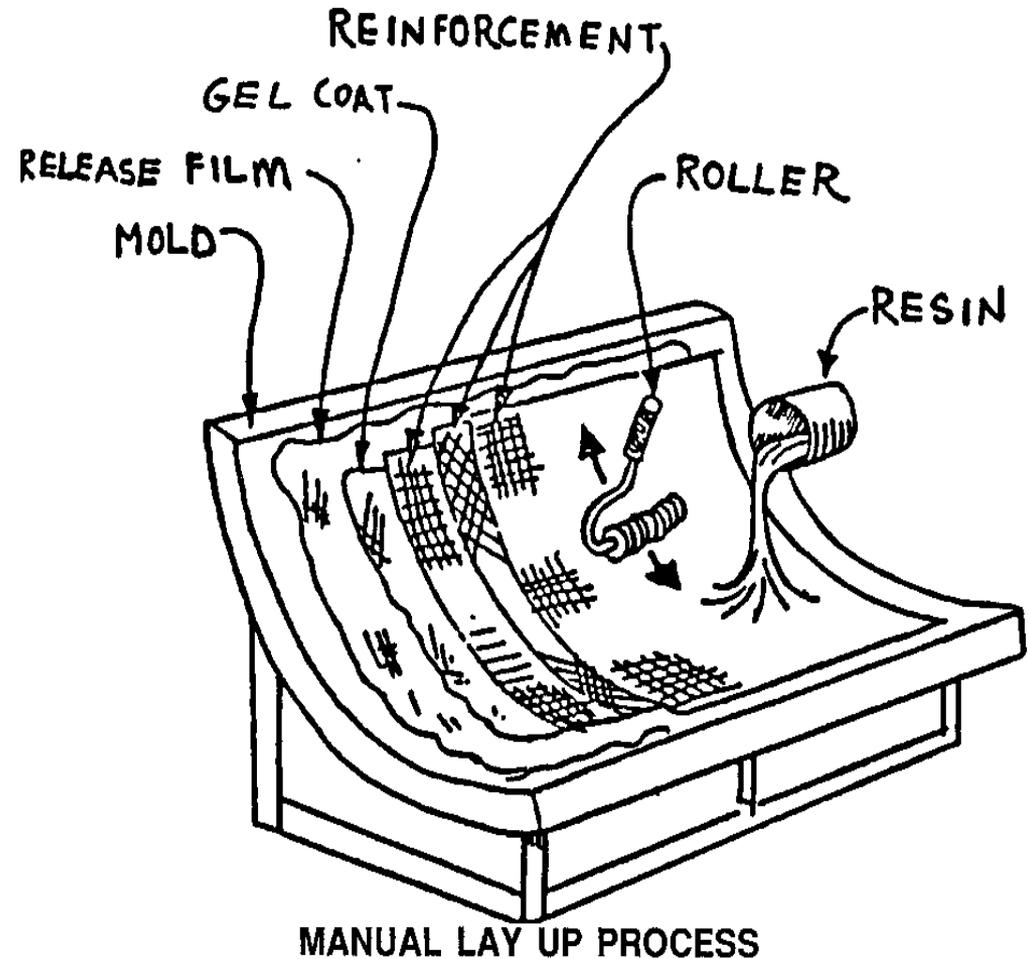
Filmato Gel coat

# Rinforzo generalmente in forma di tessuto viene tagliato a mano



Si prediligono tessuti che facilitano il drappeggio, cioè la facilità di riprodurre correttamente la forma dello stampo

La deposizione di rinforzo e matrice viene fatta manualmente da un operatore



Rullatura per eliminare bolle d'aria e porosità.  
Alta frazione di vuoti comunque inevitabile

# Resine termoindurenti

Resina base + Induritore

Prepolimero (oligomero) + Reticolante + Catalizzatore

Resina: Viscosità

Alta viscosità

Più alte proprietà meccaniche  
ma più difficile impregnazione

Bassa viscosità

Più facile impregnazione ma  
più basse proprietà meccaniche

Induritore: Temperatura e  
tempo di lavorabilità

Da pochi minuti a più di un'ora

Può essere accelerato aumentando  
la temperatura

Dimensione componente

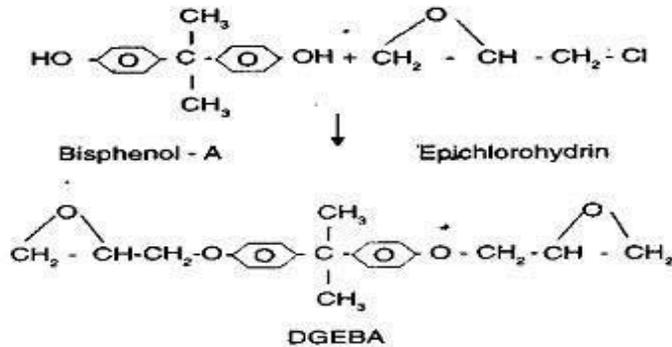
**I componenti devono essere miscelati in proporzioni esatte**

Filmati tecnologie manuali

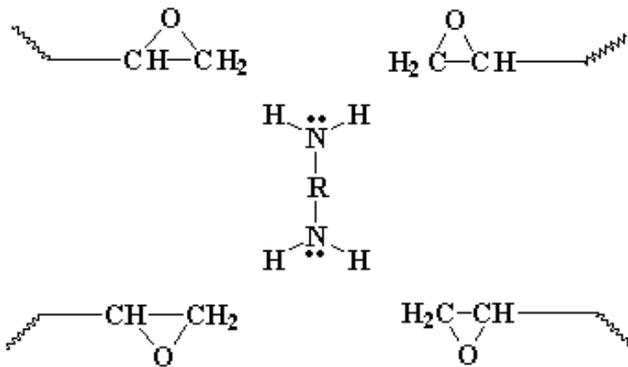
# Processo di cura

- Dal punto di vista chimico è una reazione di reticolazione
- Generalmente reazione esotermica
- Quantitativo di resina è importante: Troppa resina aumenta temperatura, temperatura catalizza cura, il materiale cura troppo presto
- Viscosità e degradazione

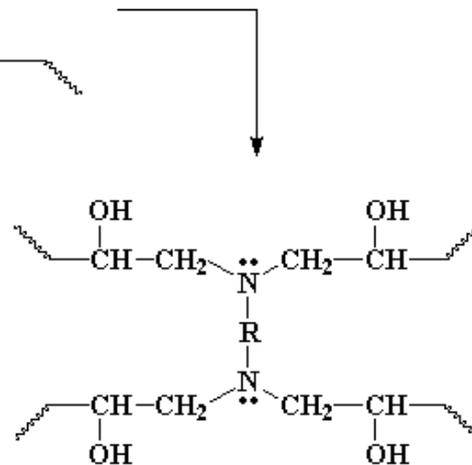
# Resina epossidica



Prepolimero

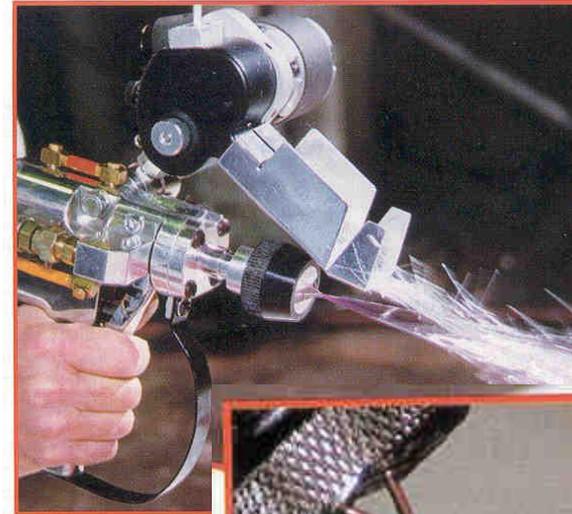
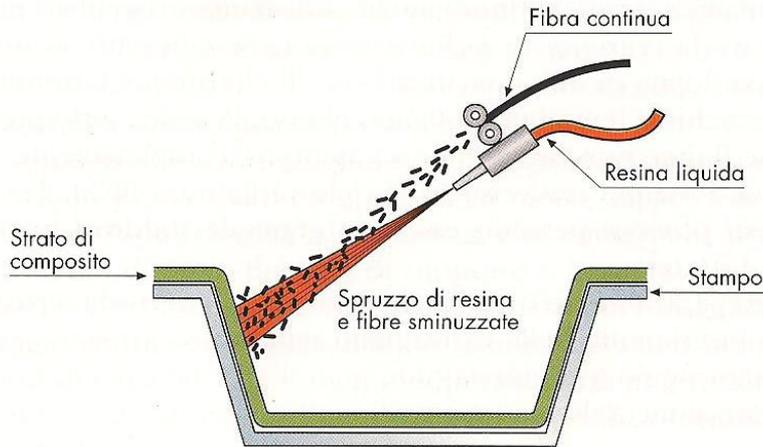


Induritore



Reticolazione

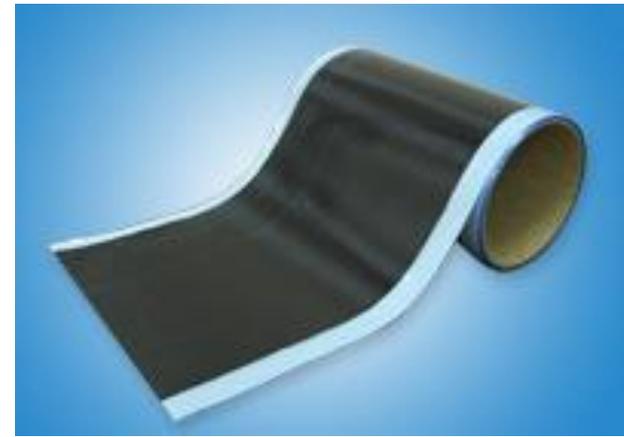
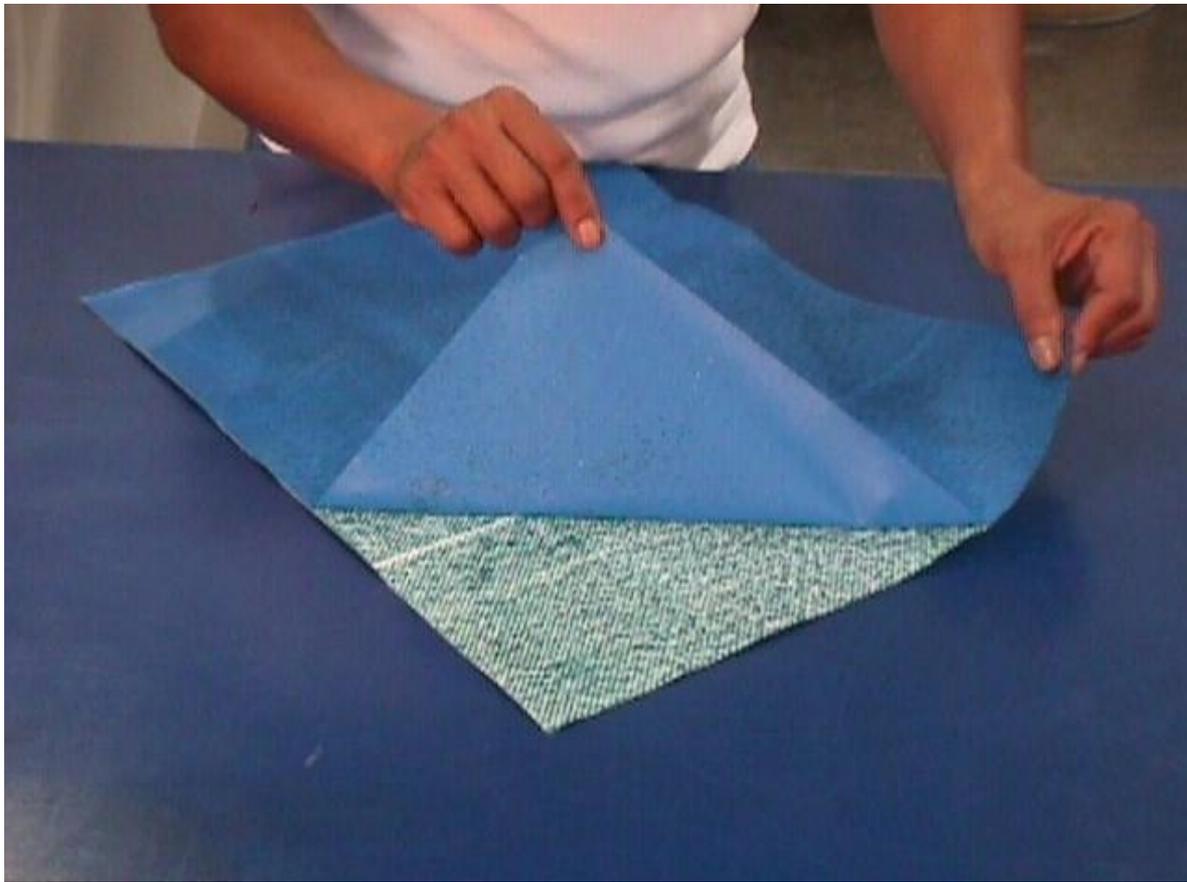
# Hand Spray Up (Spruzzatura)



Tecnologia semi-manuale, dipendenza da operatore ma si riesce a controllare rapporto fibra-matrice

# Preimpregnati (prepreg)

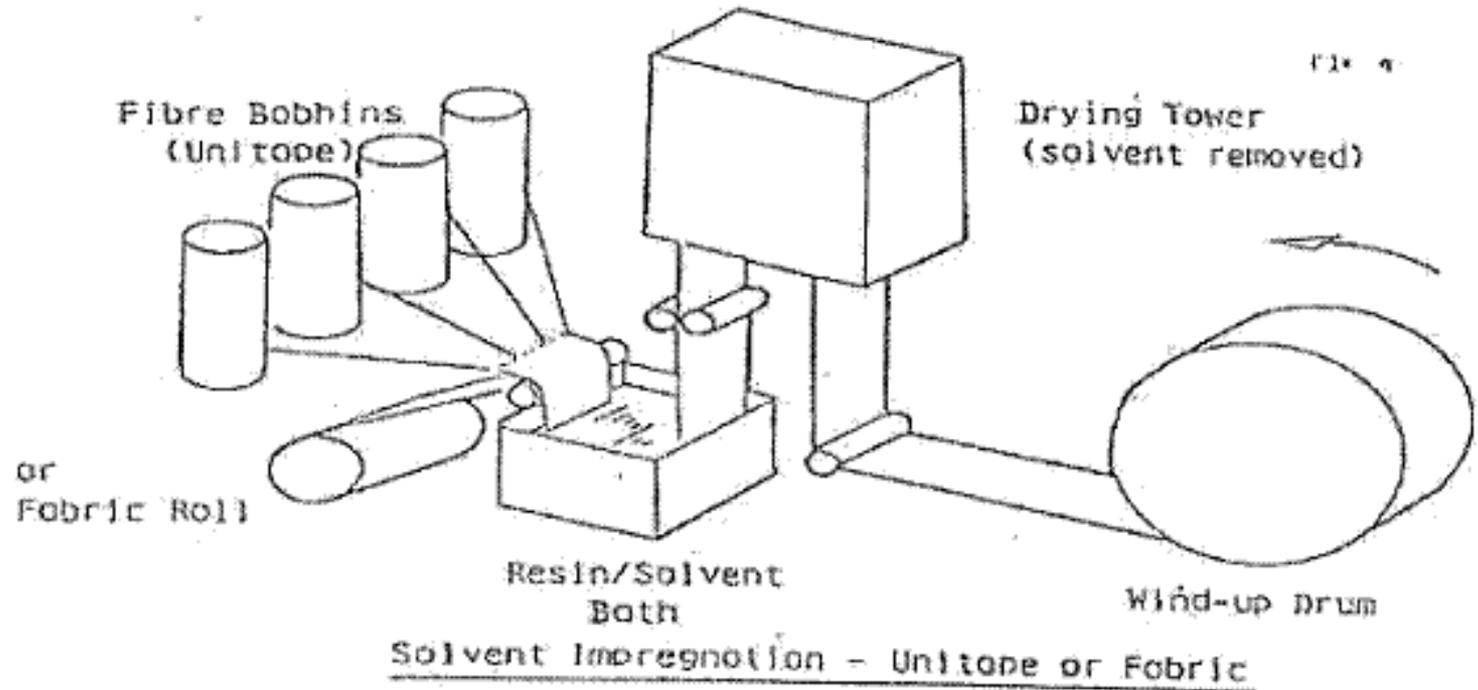
- Fibre in resina parzialmente curata
- Consentono di controllare il rapporto fibra matrice
- Consentono di eliminare vuoti
- Velocizzano il processo di realizzazione del componente
- Tempo di gelazione, “tack level” o appiccicosità, drappeggiabilità
- Buona standardizzazione produzione componente
- Costosi, taglio automatizzato per minimizzare sfridi
- Clean room



Per rallentare cura è necessario conservare a temperatura bassa (generalmente fra  $-15^{\circ}\text{C}$  e  $-20^{\circ}\text{C}$ ). C'è comunque una data di scadenza oltre la quale il materiale non è più utilizzabile (alcuni mesi).  
Importante: tempo di lavorabilità dopo estrazione da refrigeratore

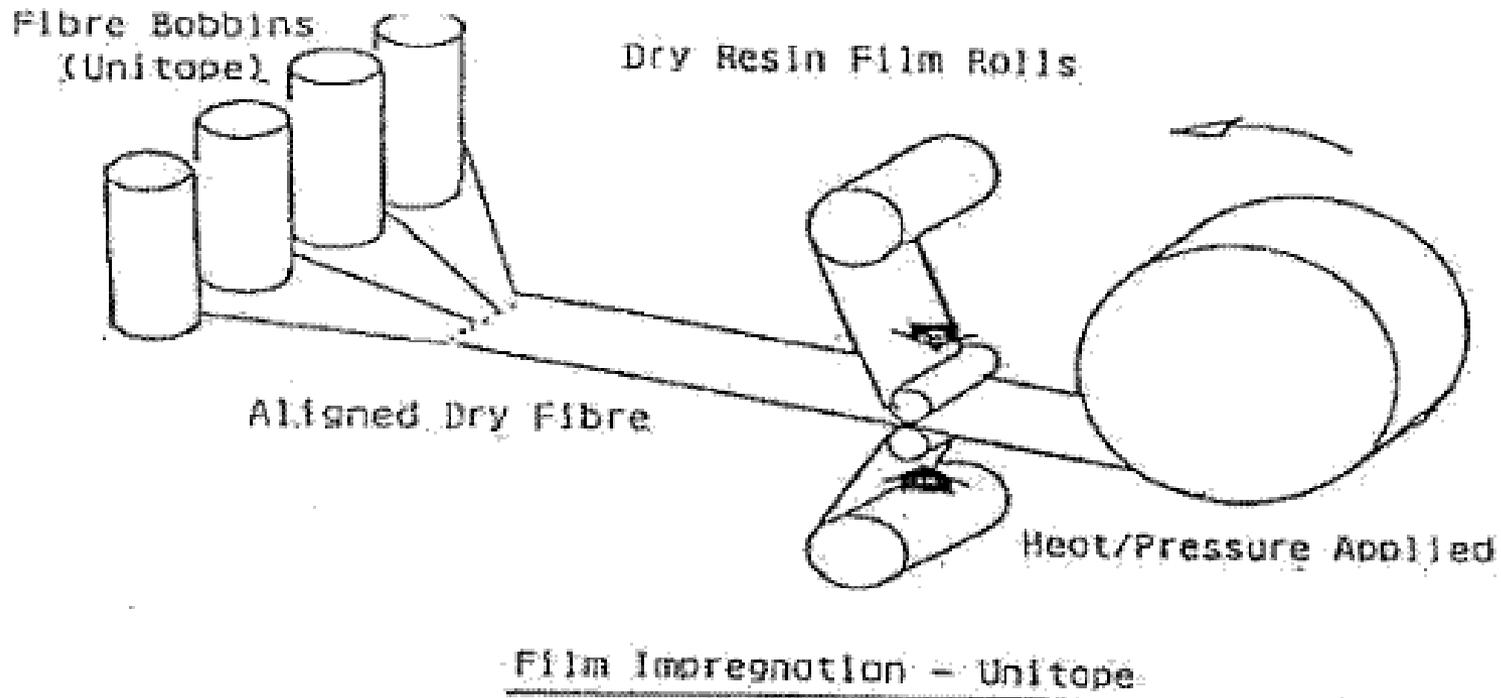
**Filmati Prepreg e Prepreg cutting**

# Produzione prepreg: Impregnazione con ausilio di solventi



Le fibre passano in un bagno di resina in soluzione con un solvente e successivamente tra rulli che ne regolano la quantità applicata; il solvente viene rimosso in un essiccatore

# Produzione prepreg: Impregnazione a caldo

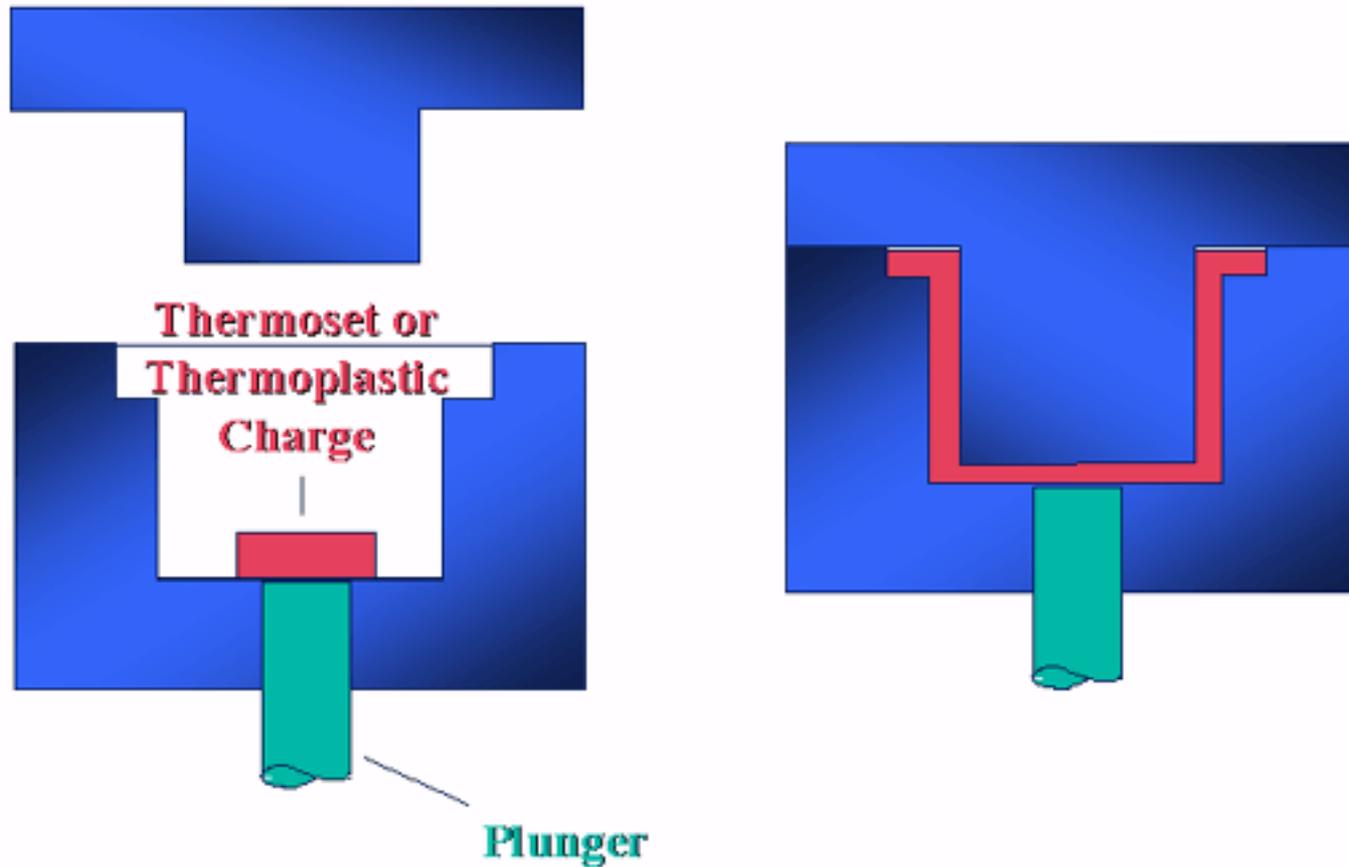


La resina in forma di film viene applicata sulle fibre (in genere tapes) tramite rulli riscaldati

# Compattazione o consolidamento

- La cura può avvenire anche in aria a temperatura ambiente (catalizzatori)
- Aumento pressione esterna comporta compattazione, riduzione frazione vuoti, aumento proprietà meccaniche
- Da considerare per quanto riguarda tolleranza dimensionale su spessore
- Stampo chiuso (stampo + controstampo) o tecnologia sacco a vuoto (vacuum bag)

# Compression Moulding



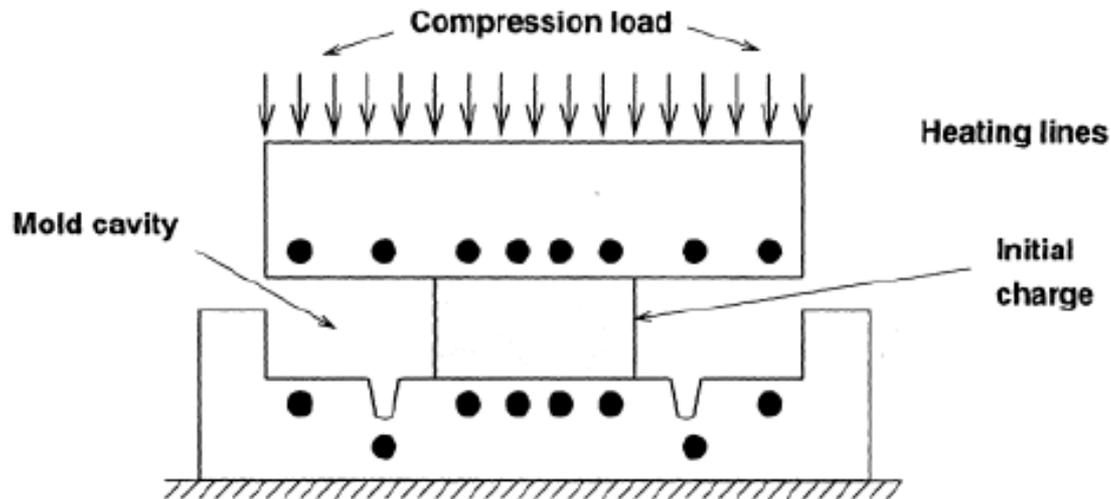
Si usano spesso “paste” di matrice parzialmente curata contenenti il rinforzo in quantità corretta (Bulk Molding Compound o BMC e Sheet Molding Compound o SMC). Tipicamente vetro/poliestere.



(Photo Courtesy of Automated Systems, Inc.)

Press shown is a 25" x 25" 4 opening electric hot press with an inline cool press

# Compression moulding



La carica di materiale (BMC o SMC) viene contemporaneamente compressa e riscaldata fra le due cavità dello stampo

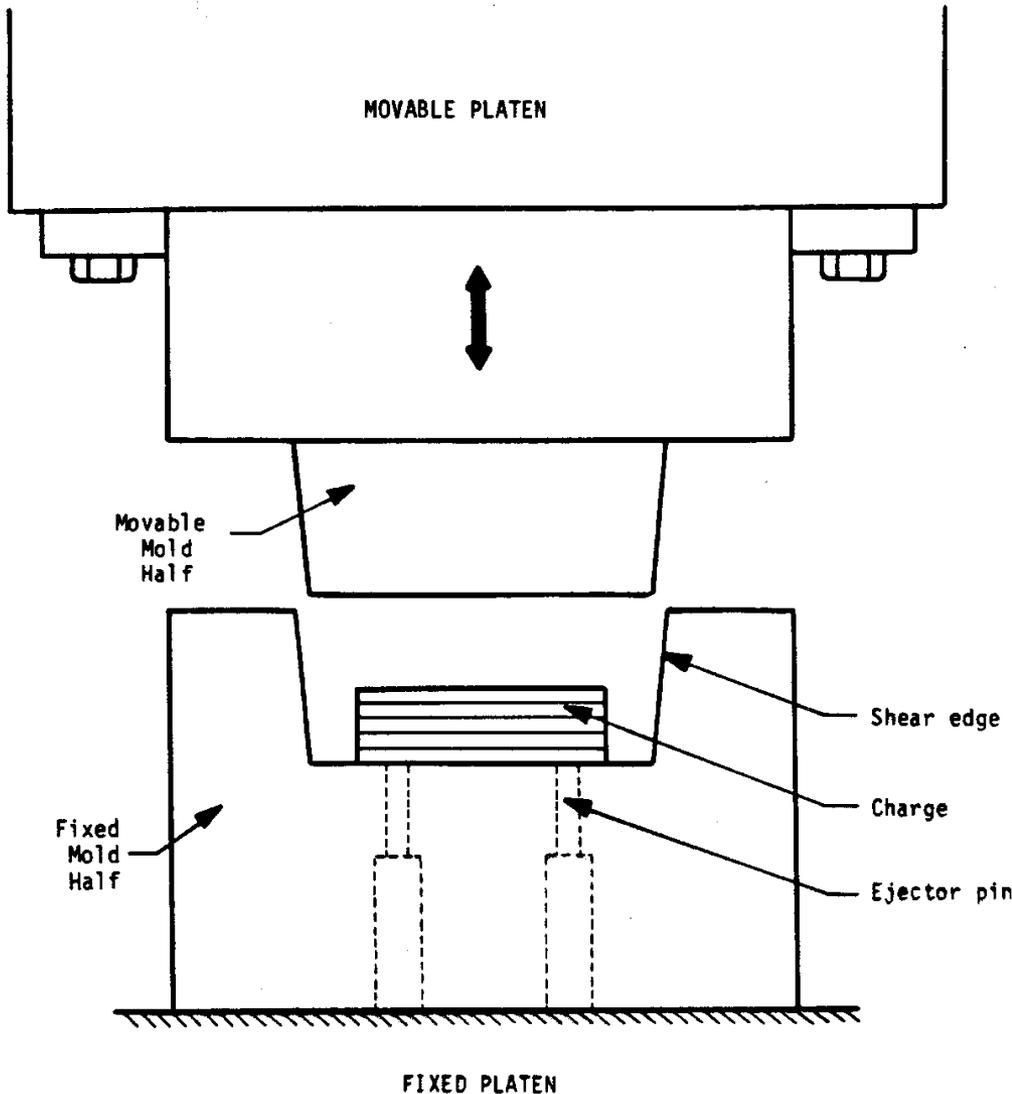


FIG. 5.11 Schematic of a compression molding process.

Finitura superficiale buona su entrambe le facce del componente

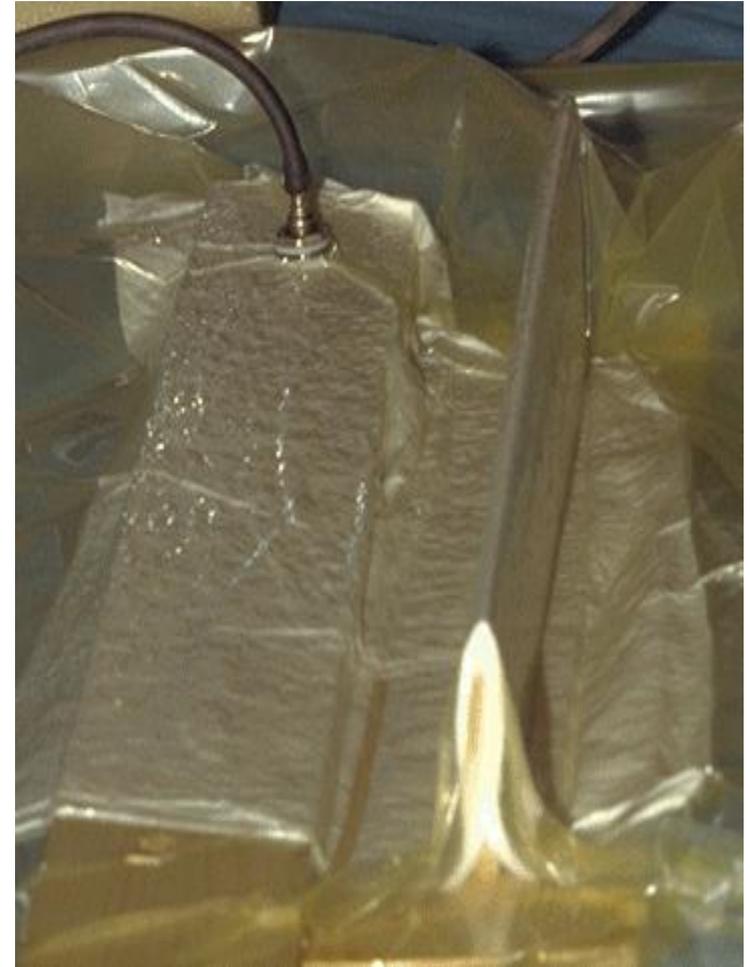
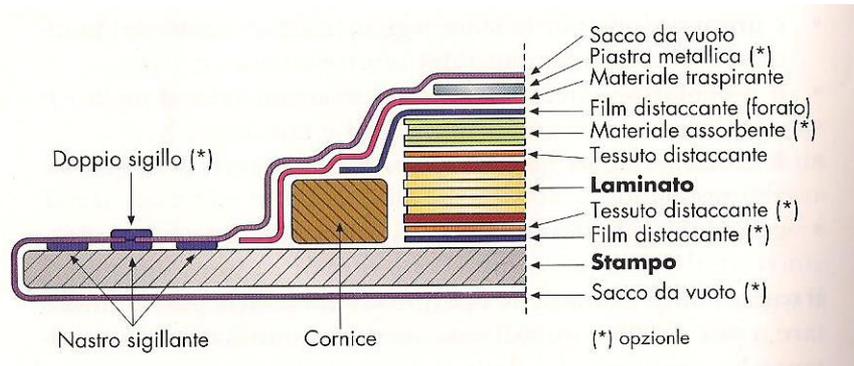
Pressioni alte ma generalmente non uniformi

Buona produttività

Non è possibile applicarla su forme complesse

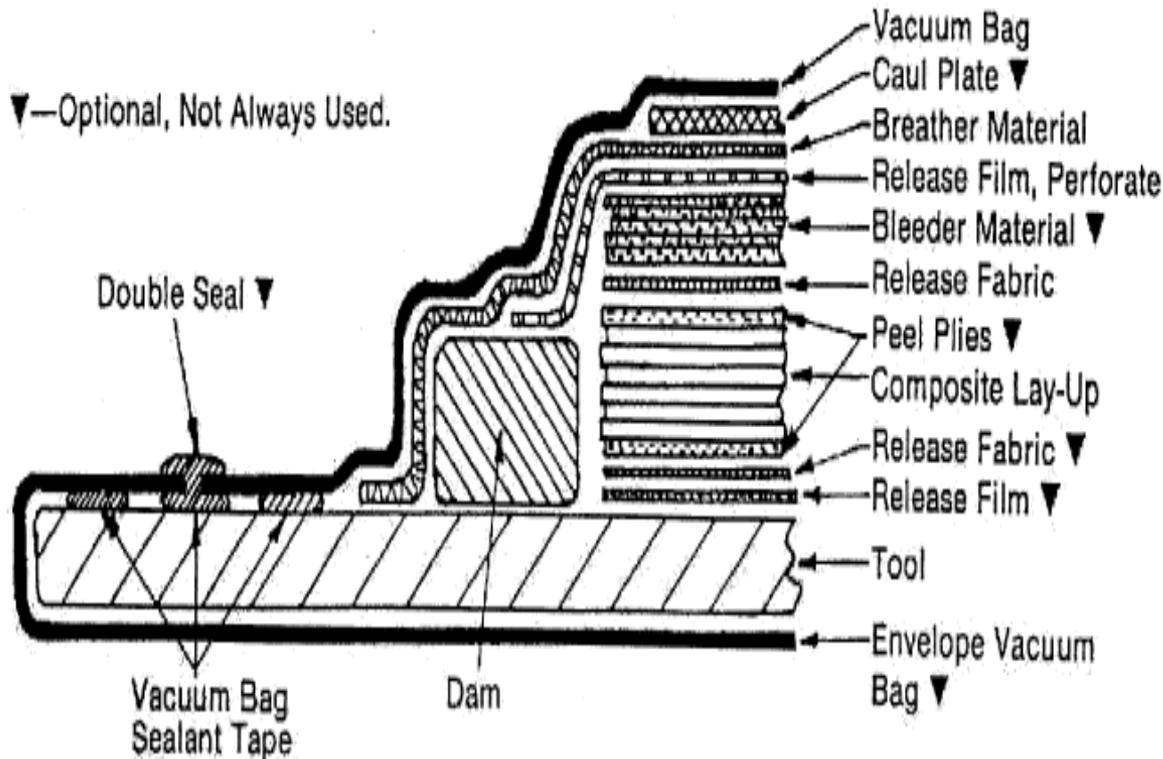
Basso controllo su orientazione fibre (fibre corte o fibre lunghe)

# Sacco a vuoto



Solo stampo aperto. Sacco è membrana in nylon o in poliestere  
Materiale deve avere alta duttilità e buona resistenza temperatura

# Stratificazione



Contropiastra:

Uniformare pressione aria

Traspirante (Breather):

Rimozione aria

Distribuzione vuoto

Assorbente (Bleeder):

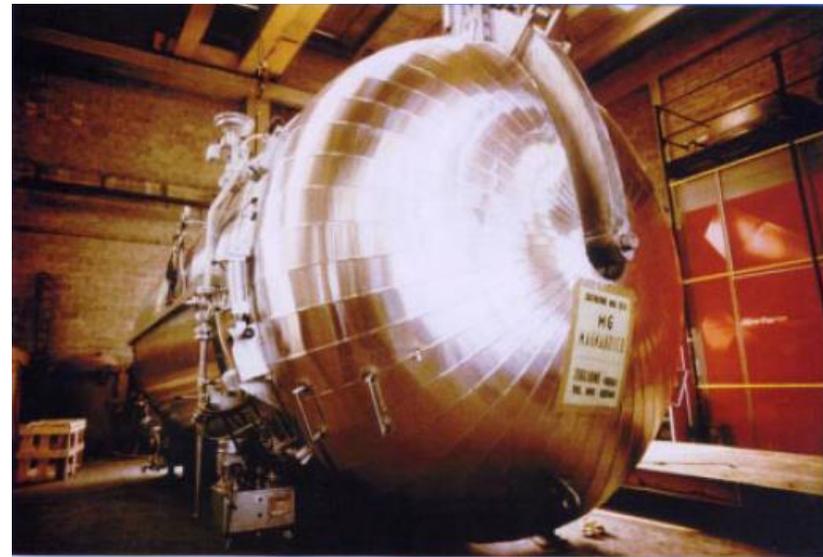
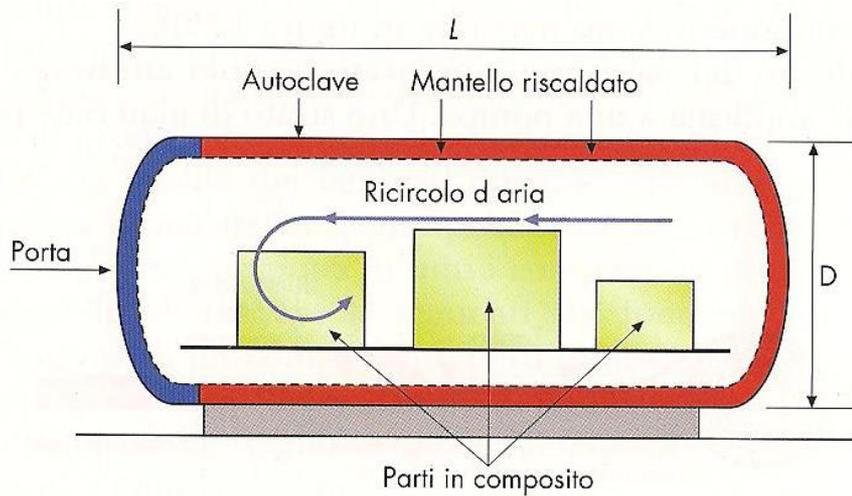
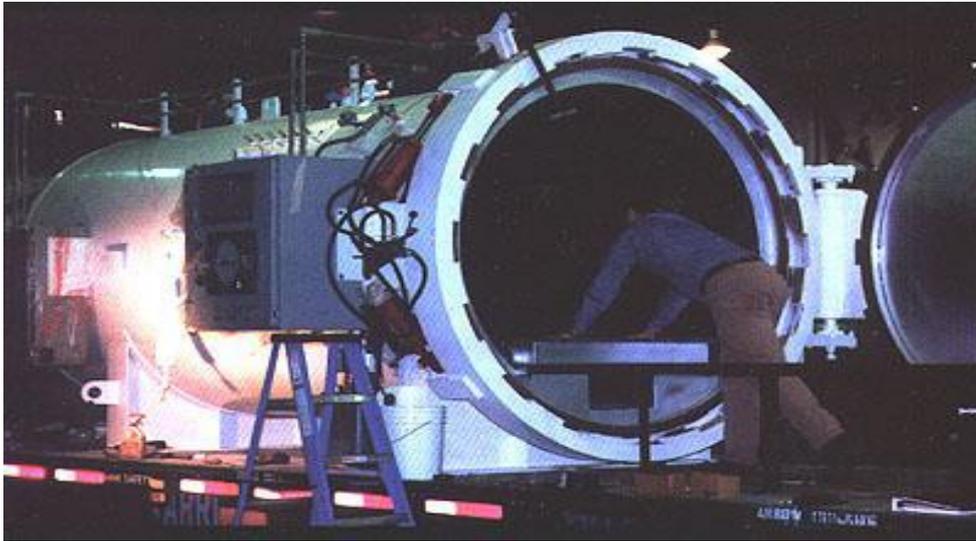
Assorbe eccesso resina

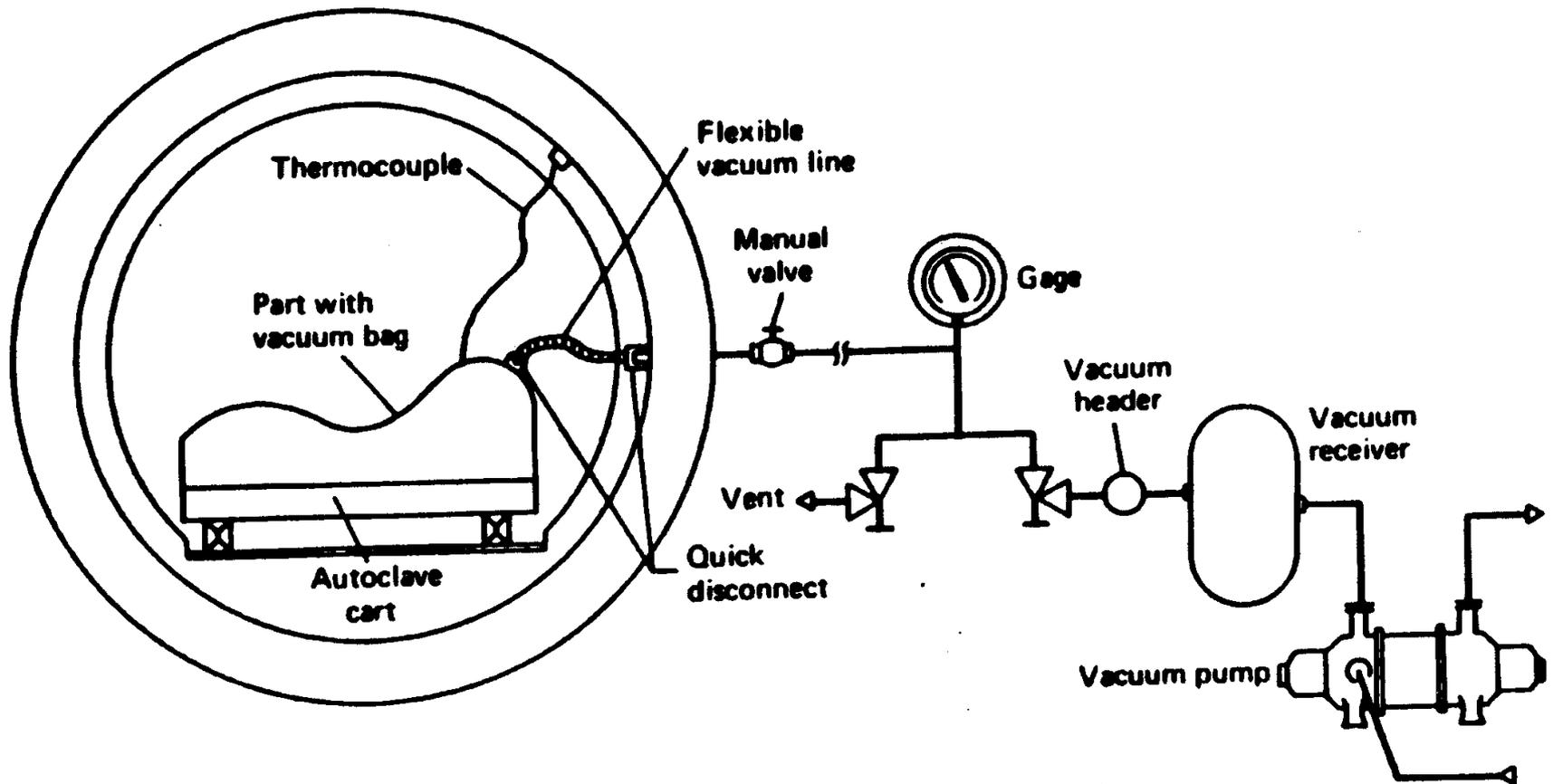
Distaccanti:

Evitano incollaggio

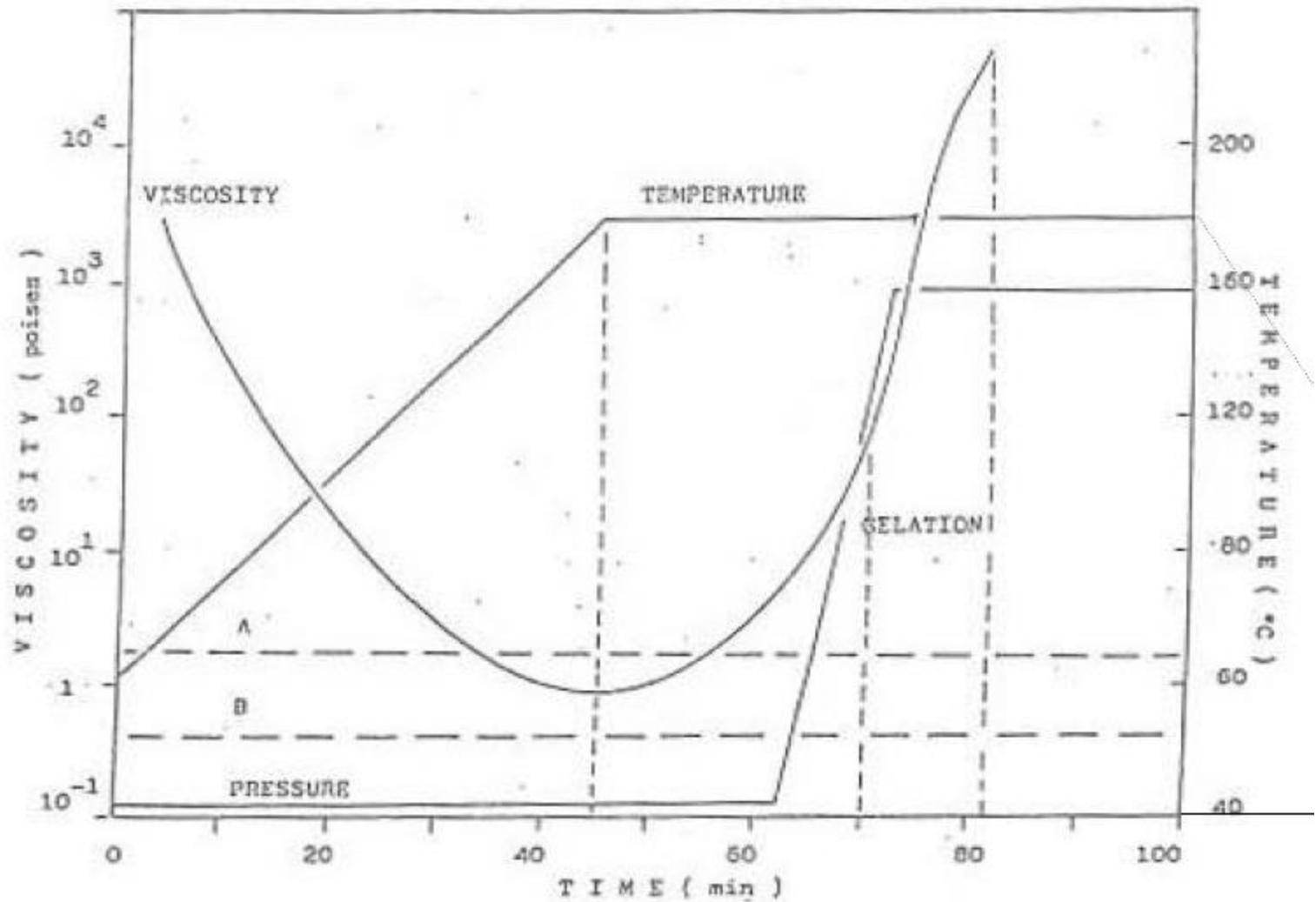
Filmato Vacuum bag

# Autoclave





Recipiente in pressione. Controllo pressione e temperatura interne.  
 Pressione mediante fluido di lavoro. Centinaia di °C, decine di atm  
 Uniformità temperatura. Riscaldamento con olio diatermico riscaldato  
 da caldaia a gasolio. Anche circuito raffreddamento per controllo  
 temperatura più efficace. Vuoto mantenuto in Vacuum bag.



Ciclo di cura della resina controllato con precisione

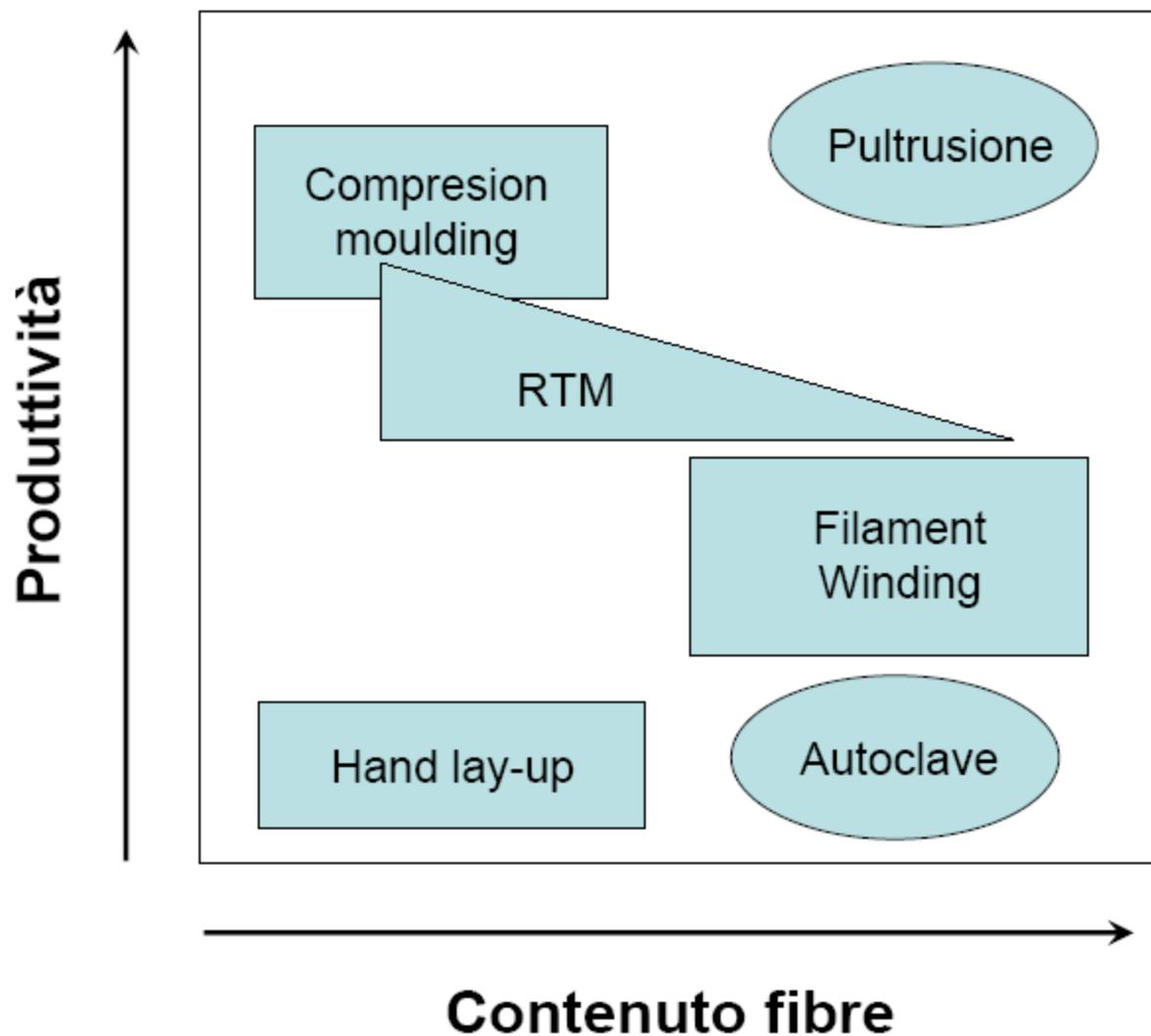
Andamento viscosità resina, pressione applicata subito prima della gelazione

# Stratificazione Prepreg e Cura in Autoclave

- Riproducibilità processo, standardizzazione
- Buona versatilità forme ottenibili
- Ottime proprietà meccaniche a causa del contenimento al minimo della frazione di vuoti
- Grandi investimenti e spese di mantenimento
- Vincoli sulle dimensioni dei manufatti
- Produzione su bassa scala

# Tecnologie automatiche

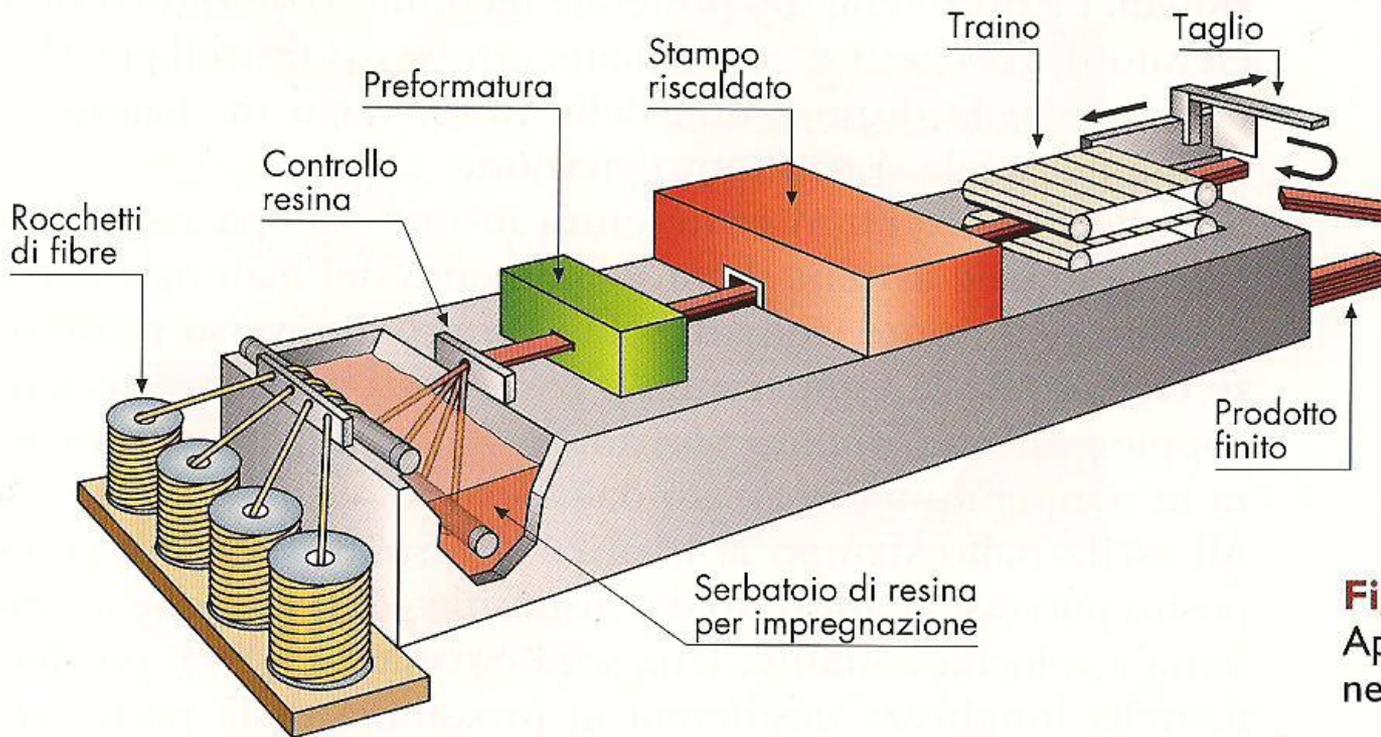
# Tecnologie produttive compositi



# Pultrusione

- Processo ottimizzato per la produzione di profilati a sezione costante in composito
- Processo totalmente automatico e continuo
- Alte frazioni di volume di fibra
- Rinforzo essenzialmente monodirezionale
- Produzione travi e profilati per sostituzione profilati metallici

# Schema generale



**Figura 1.3.33**  
Apparecchiatura impiegata  
nel processo di pultrusione.

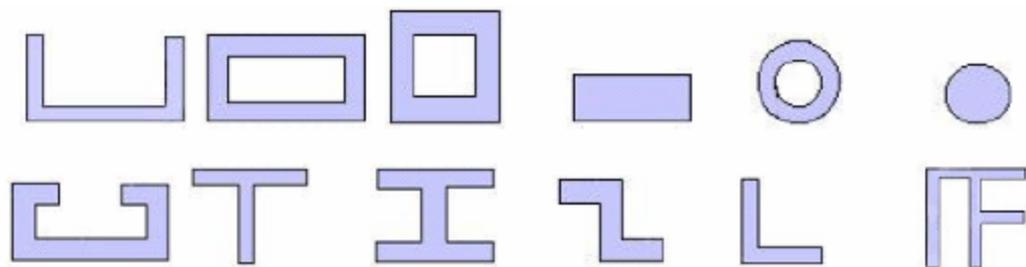
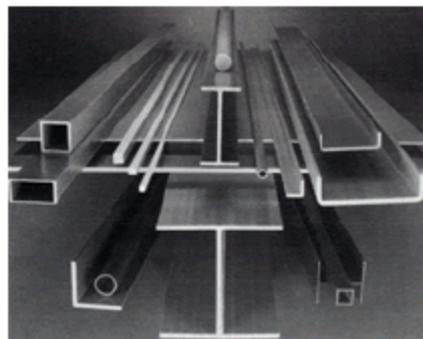
# Il processo di pultrusione

*Pull – extrusion (analogia con estrusione metalli)*

Tecnologia di produzione **continua** di manufatti in composito con **sezione costante**.

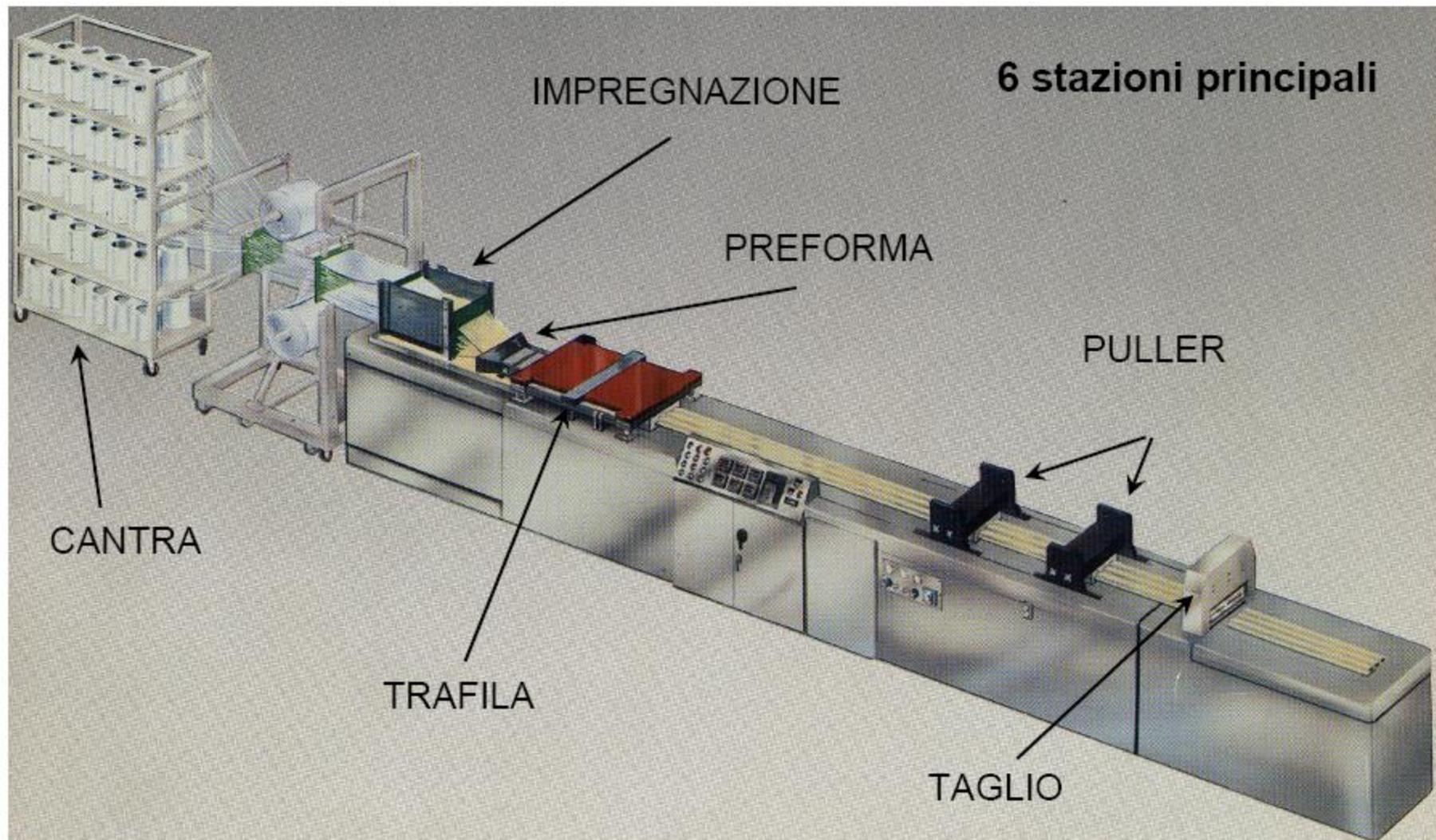
E' la tecnologia di **produzione di volume più economica** (ma impianto è molto costoso) per materiali compositi rinforzati con fibre.

- Si ottengono *profili lineari con sezione costante e fibre lunghe unidirezionali nella direzione di trazione (la direzione dell'asse del pultruso); eventuale materiale di rinforzo in direzione trasversale; dimensioni max. sez.: 600x300mm;*
- Il processo è *automatizzato e continuo;*
- Elevate *caratteristiche meccaniche (nella direzione delle fibre → OK a trazione e flessione; meno a torsione e taglio) e qualità uniforme;*



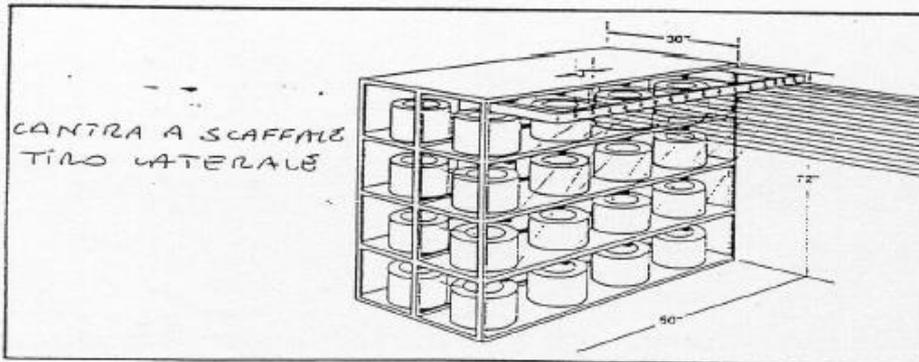
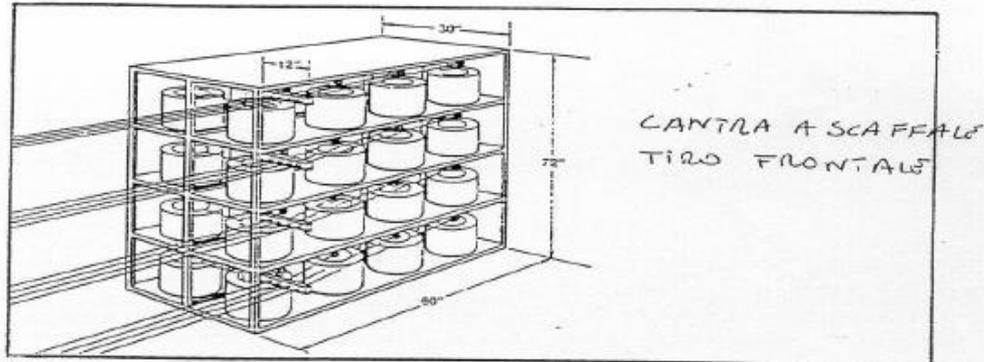
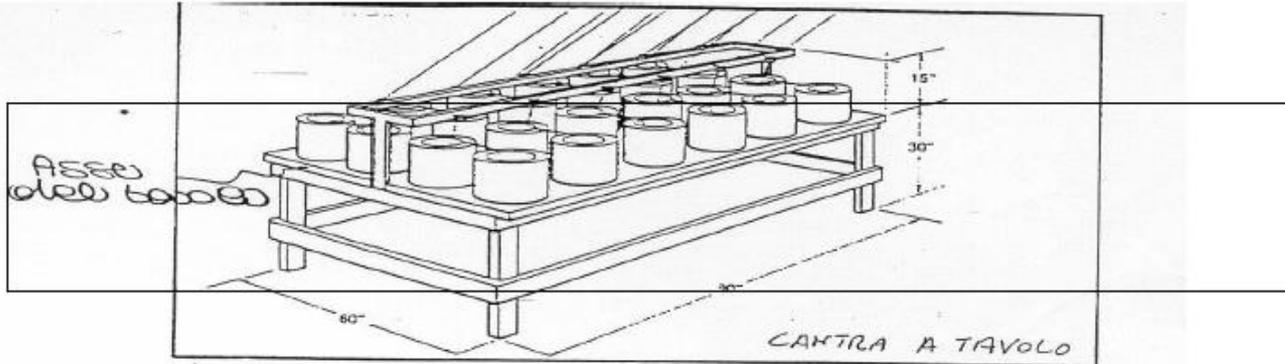
# Il processo di pultrusione

*Pull – extrusion (analogia con estrusione metalli)*



# Il processo di pultrusione

## 1<sup>a</sup> Stazione: alimentazione del rinforzo

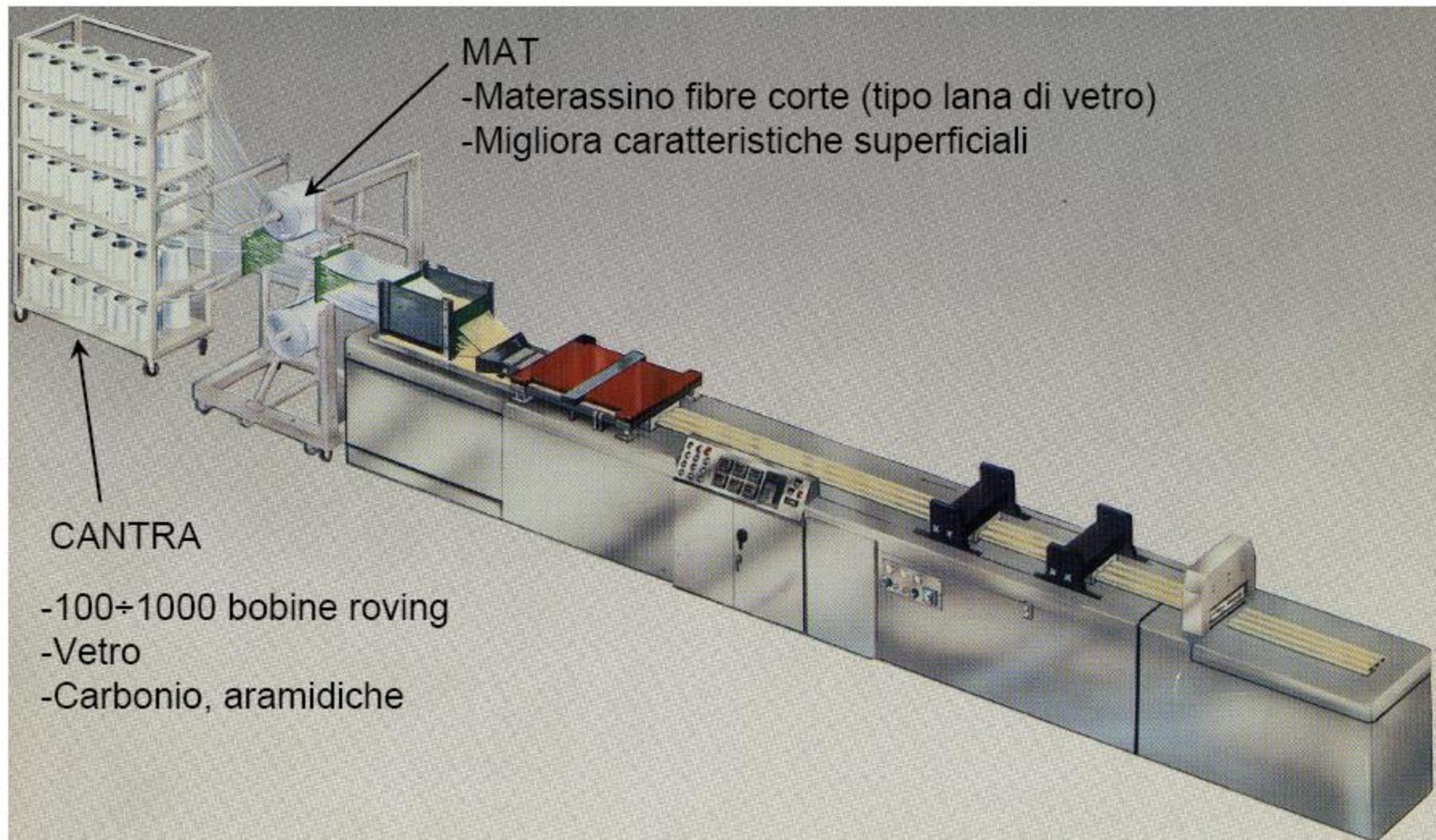


Le fibre per l'alimentazione del processo sono organizzate in insiemi di rotoli detti "cantre"

I rotoli sono tipicamente costituiti da fibre intrecciate dette "rovings"

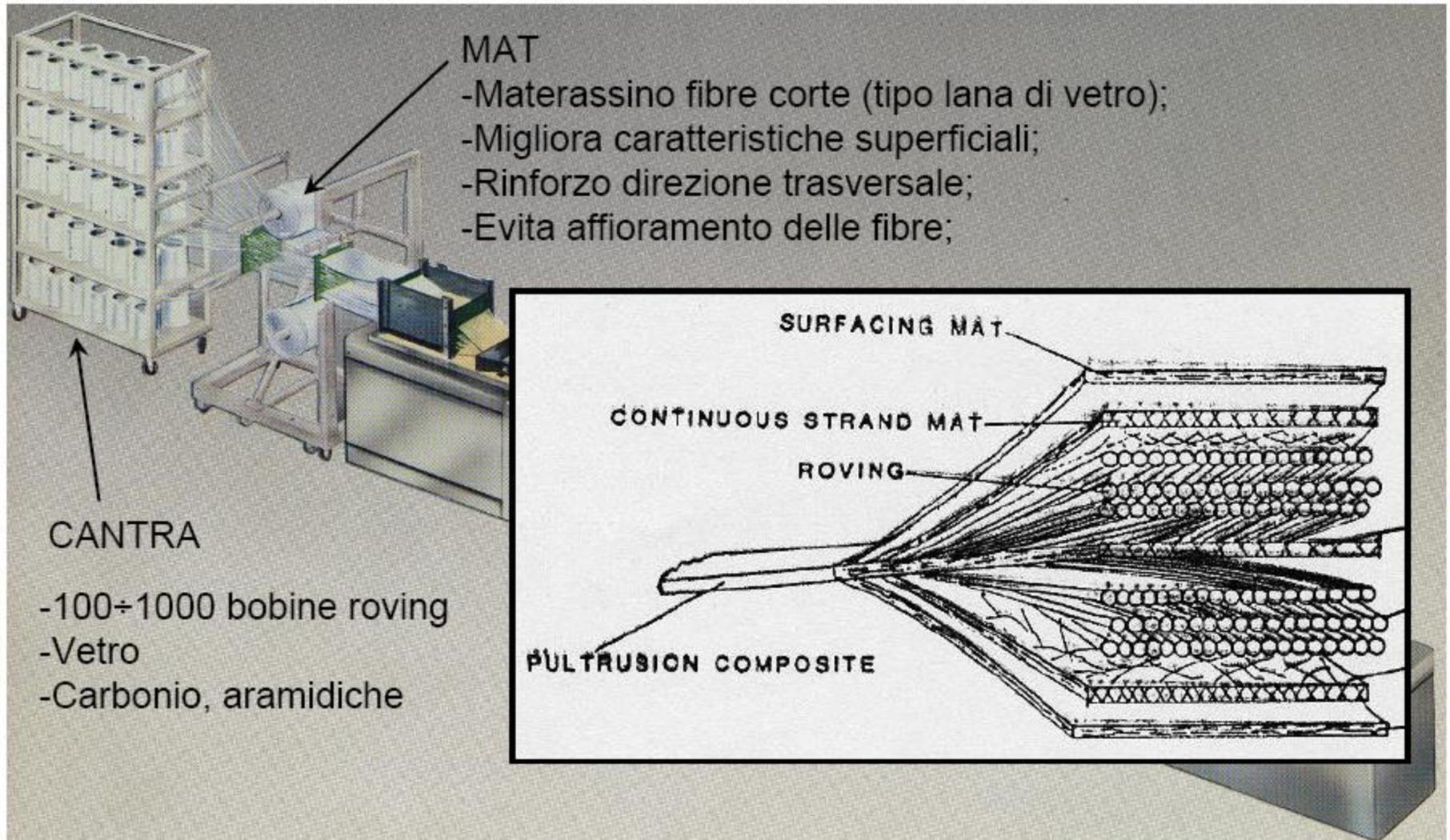
# Il processo di pultrusione

## 1<sup>a</sup> Stazione: alimentazione del rinforzo



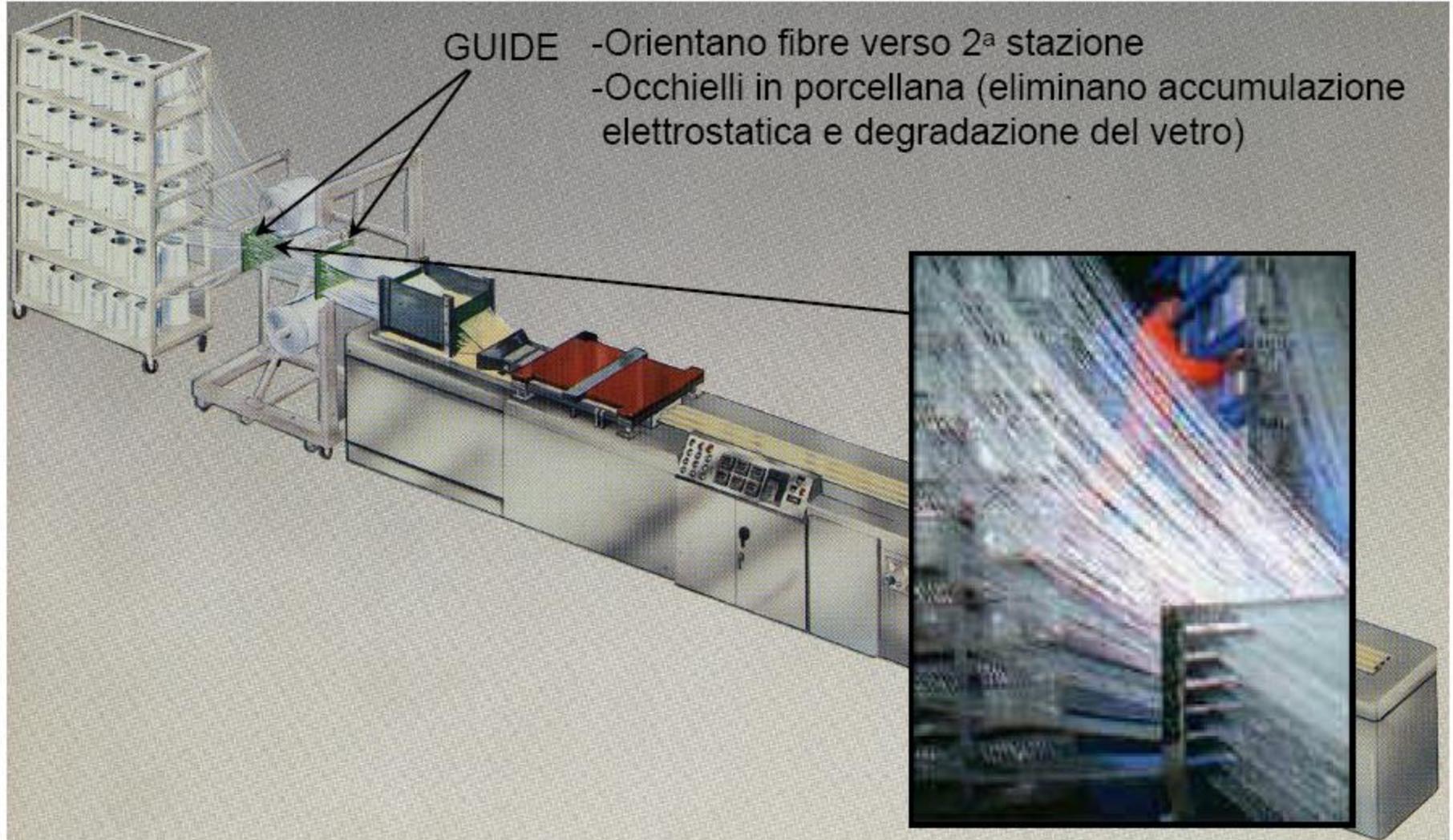
# Il processo di pultrusione

## 1<sup>a</sup> Stazione: alimentazione del rinforzo



# Il processo di pultrusione

## *1<sup>a</sup> Stazione: alimentazione del rinforzo*



# Il processo di pultrusione

## 2<sup>a</sup> Stazione: impregnazione

### IMPREGNAZIONE

- Fibre rimangono guidate e in tensione per migliorare impregnazione
- Termoindurenti (poliestere, vinilestere, epossidiche)
- Miscela con catalizzatore o indurente ad alta velocità di reticolazione

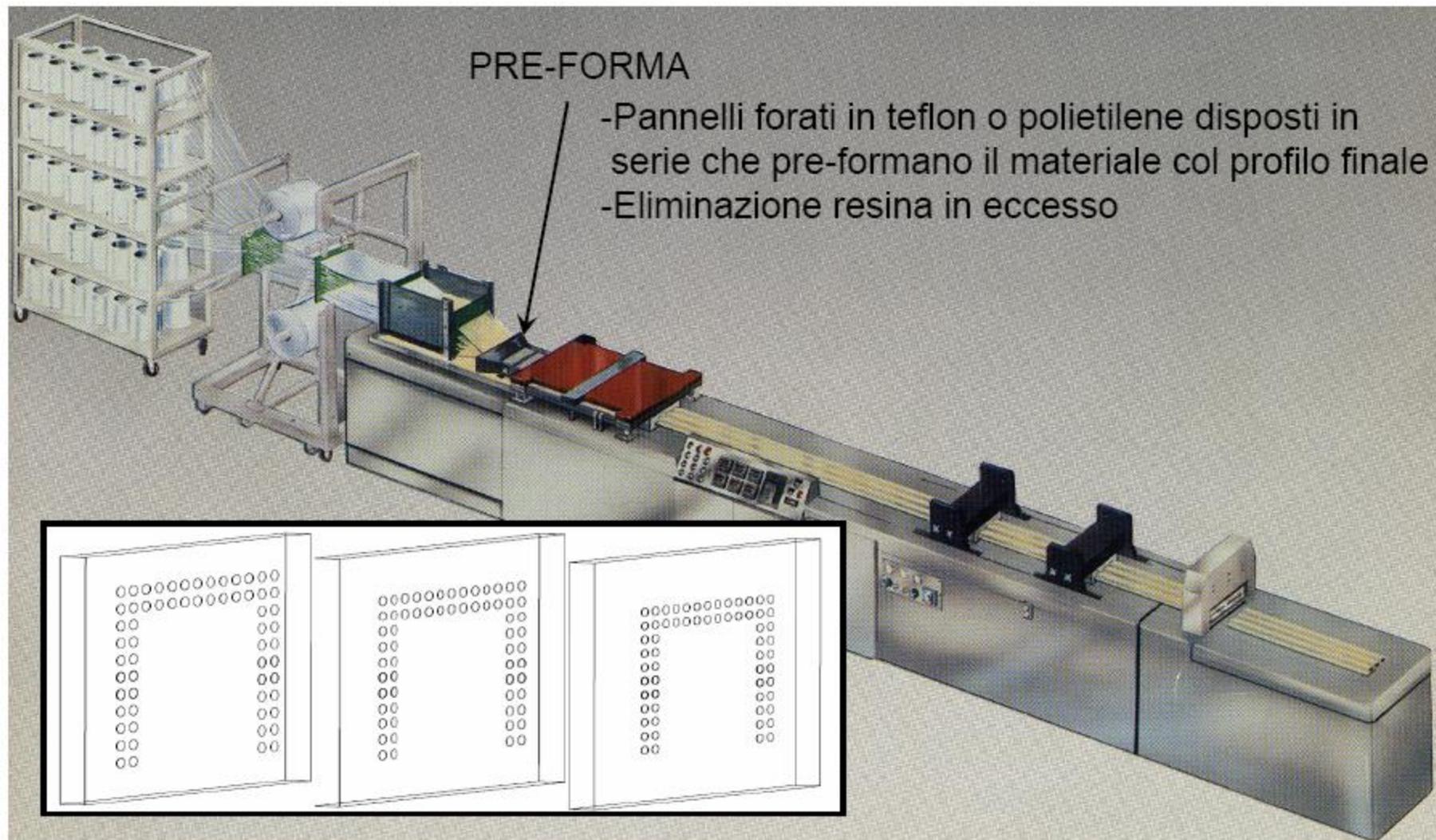
### RESINE:

- Colorante per pigmentazione di massa
- Filler (riempitivi usati per migliorare: finitura superficiale; adesione fibre di rinforzo; proprietà di ritardo fiamma e resistenza corrosione; riduzione emissione fumi e gas tossici)



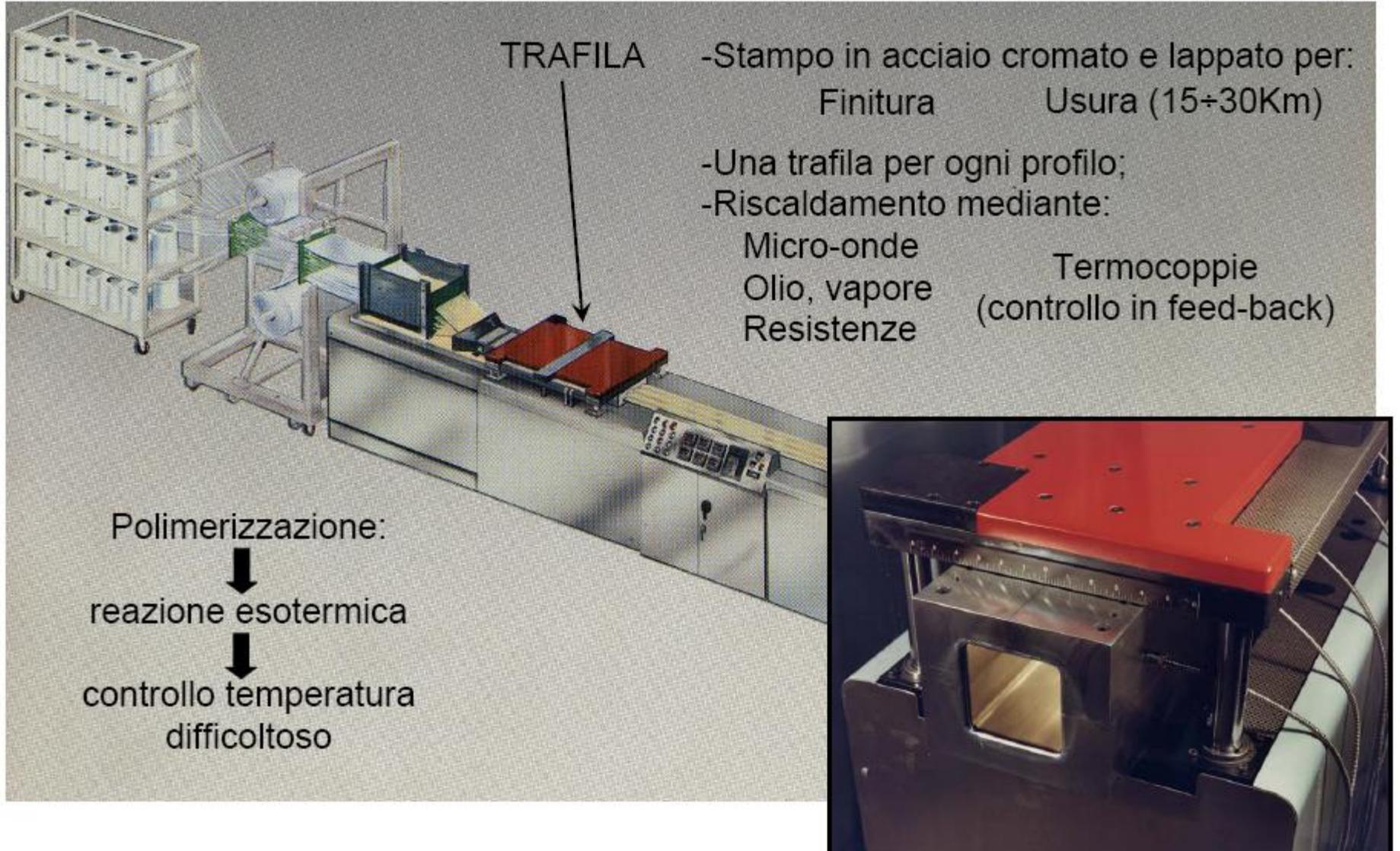
# Il processo di pultrusione

## 3<sup>a</sup> Stazione: pre-formatura



# Il processo di pultrusione

## 4<sup>a</sup> Stazione: trafila



# Il processo di pultrusione

## *4<sup>a</sup> Stazione: trafila*

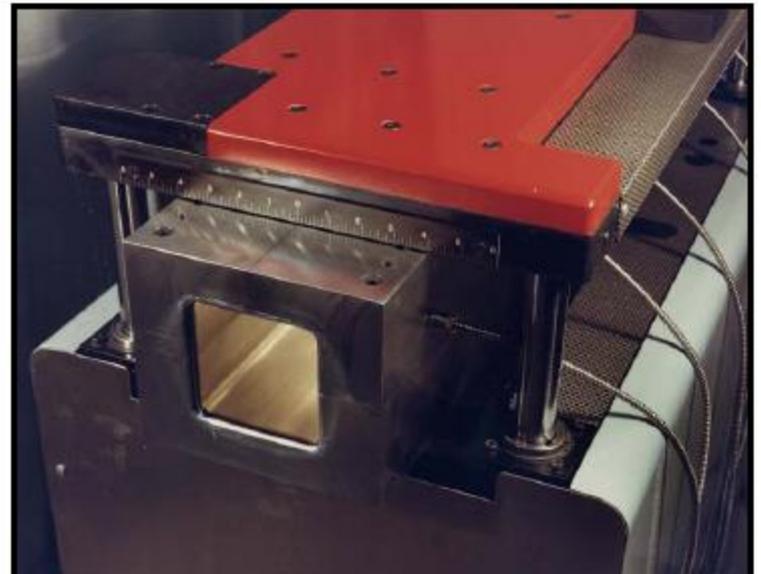
**Parametri che influenzano la polimerizzazione:**

- Velocità di pultrusione (tipicamente 500÷1500mm/min);
- Lunghezza trafila (tipicamente 600÷1500mm);
- Tipo di resina (catalizzatore, Temperatura polimerizzazione, curva viscosità);
- Spessore manufatto (non inferiore a 1mm);
- Resistenza all'avanzamento di tipo Coulombiano (Attrito) e idrodinamico (back-flow della resina);



Combinazione migliore

Generalmente per aver migliore controllo sulla temperatura l'impianto dotato anche di **sistema di raffreddamento**

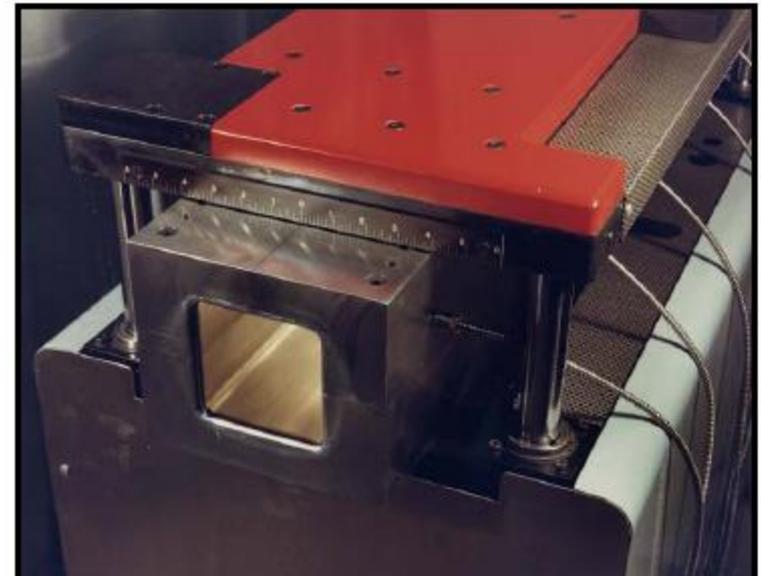
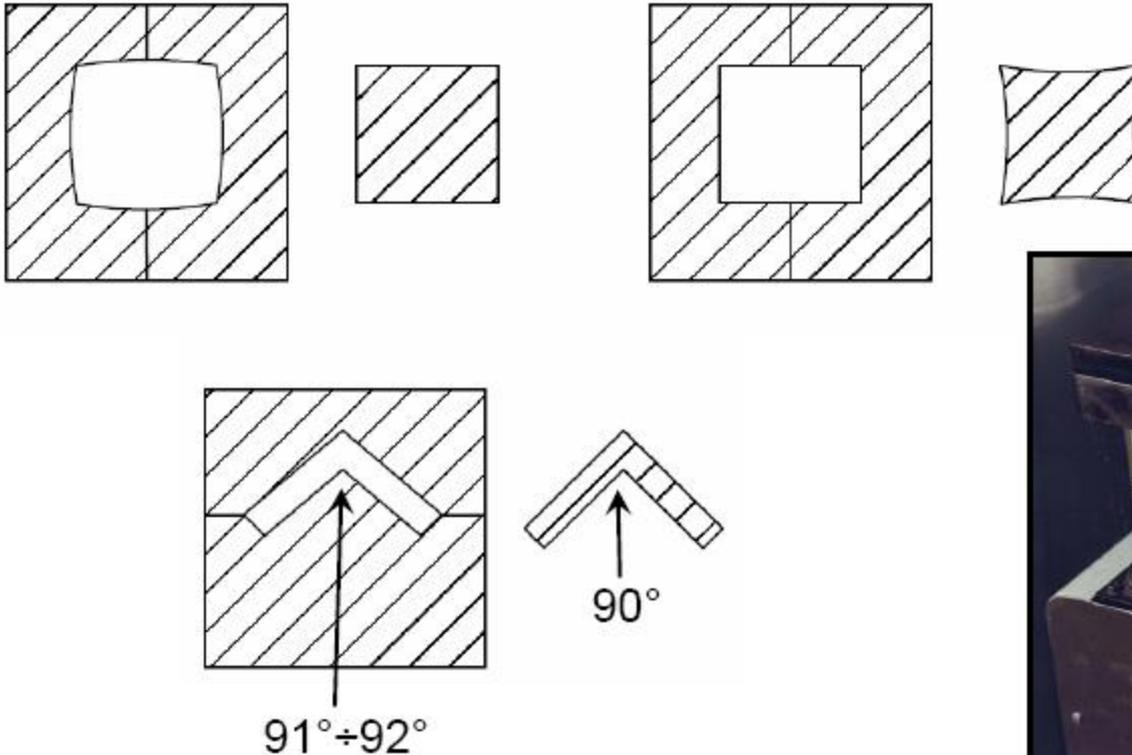


# Il processo di pultrusione

## *4<sup>a</sup> Stazione: trafila*

**Forma trafila:** Generalmente in 2 parti, in acciaio cromato e lappato per ridurre attrito e abrasione.

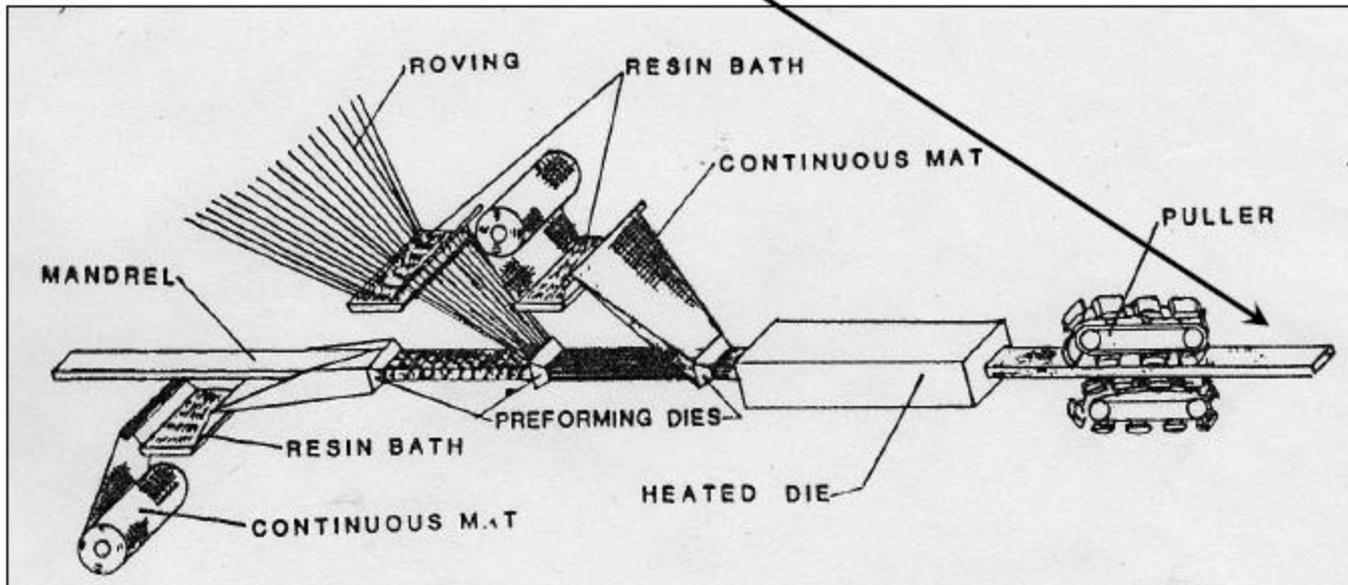
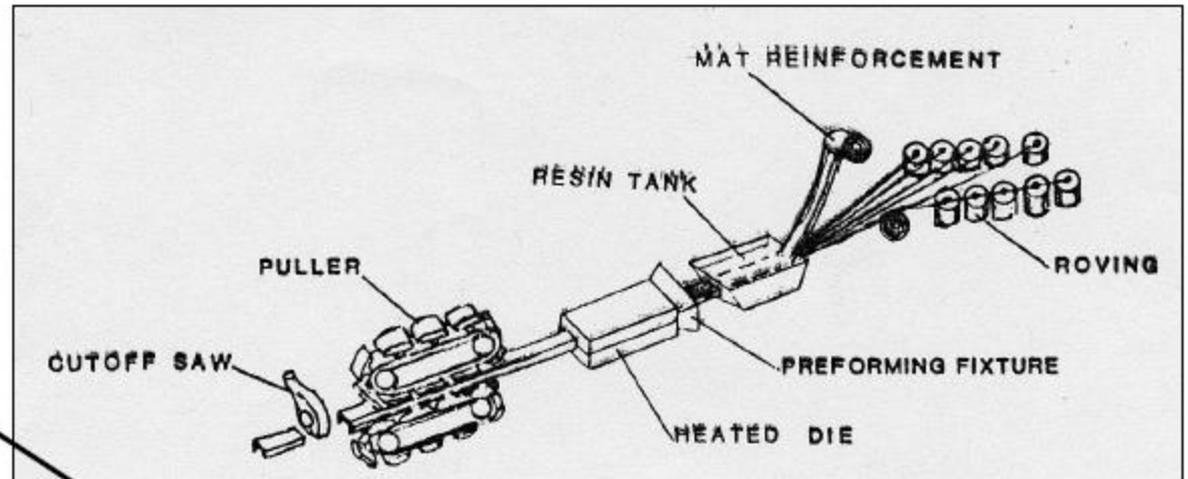
**In progettazione:** -Ritiro volumetrico della resina durante reticolazione  
-Effetti della dilatazione termica



# Il processo di pultrusione

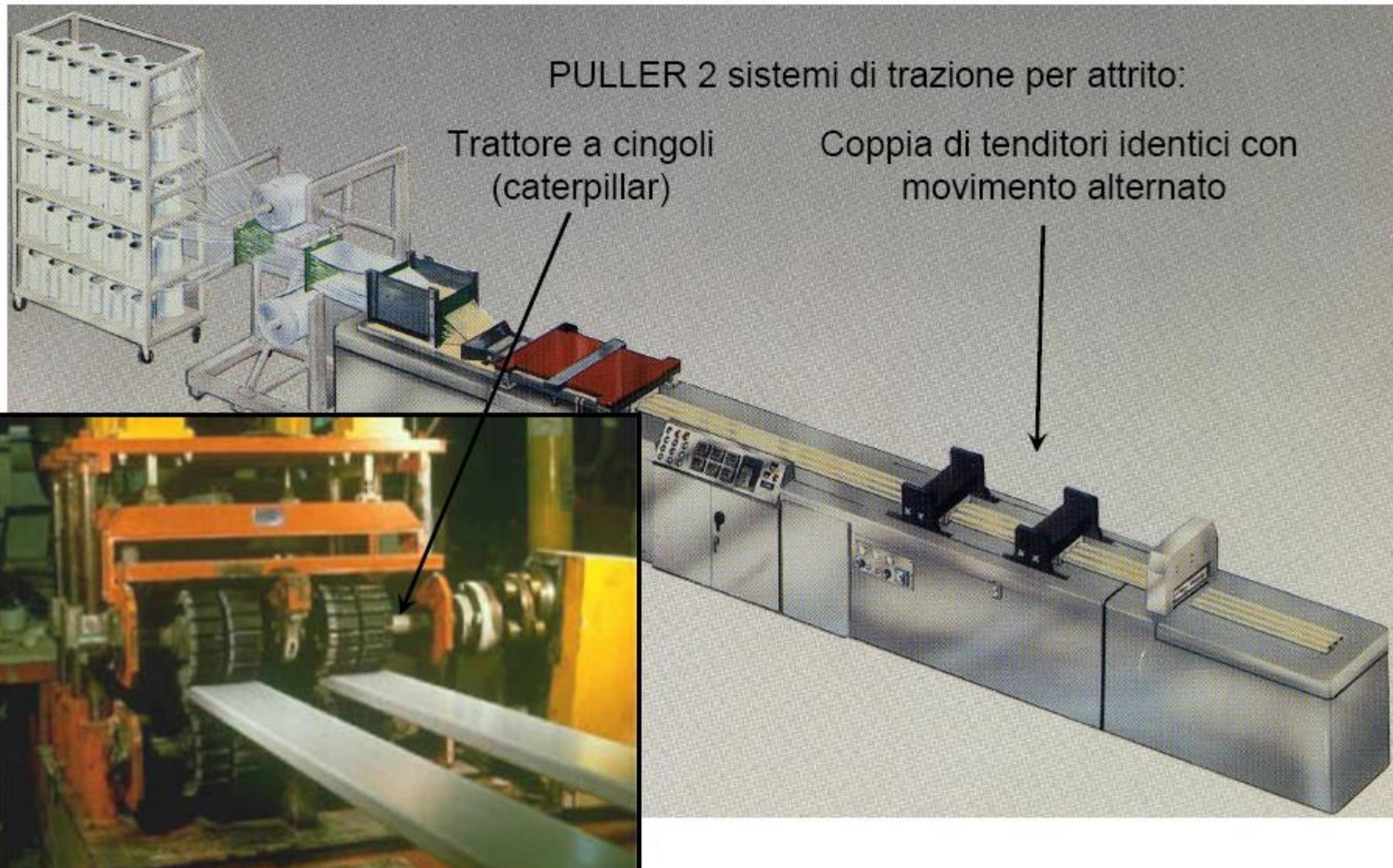
## 4<sup>a</sup> Stazione: trafila

Mediante appositi mandrini vincolati all'impianto è possibile ottenere **tubi**.



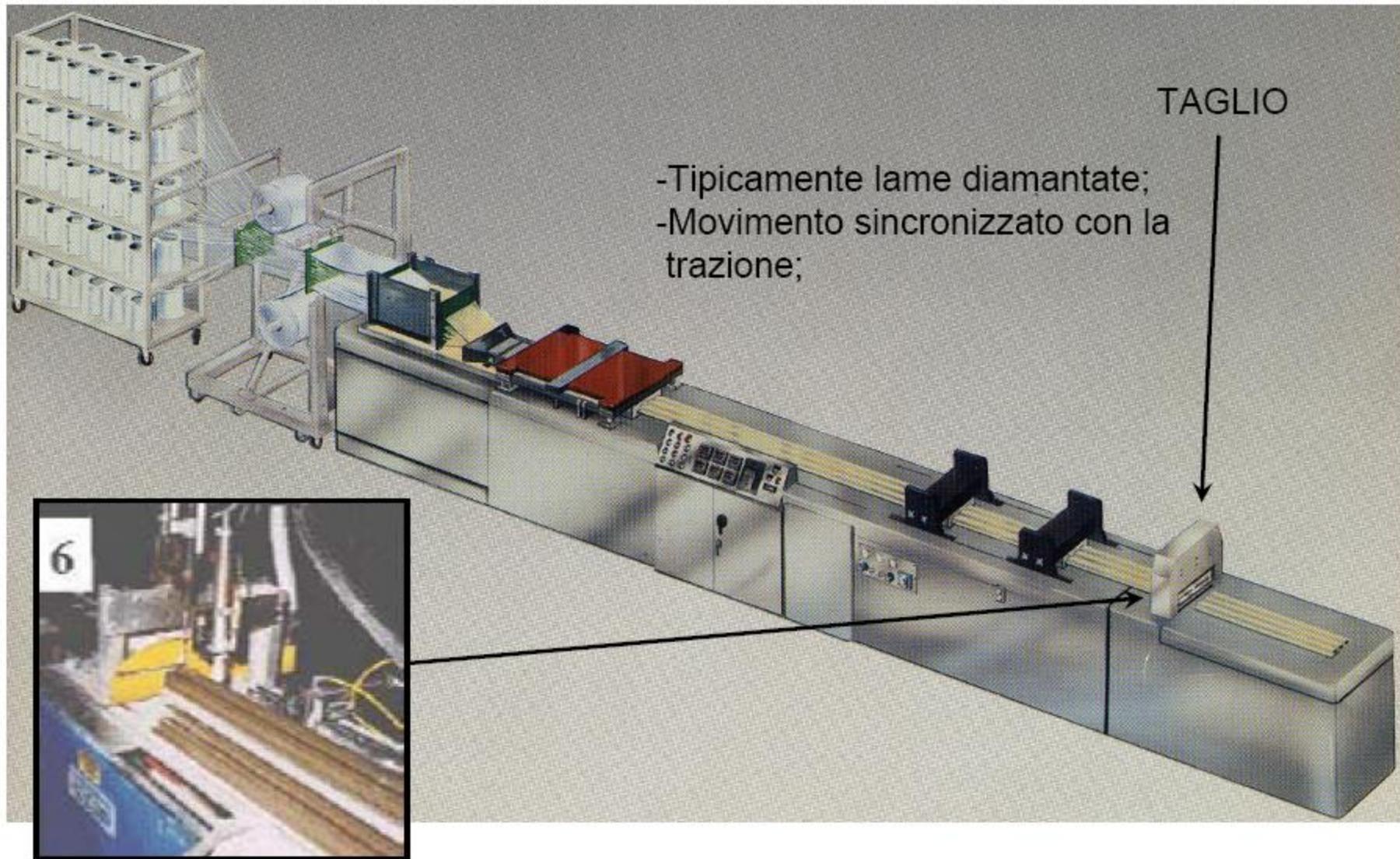
# Il processo di pultrusione

## *5<sup>a</sup> Stazione: trazione*



# Il processo di pultrusione

## 6<sup>a</sup> Stazione: taglio



# Considerazioni conclusive

- E' richiesta resina a bassa viscosità
- Il rinforzo è praticamente solo in direzione assiale
- Alta produttività
- Alta ripetibilità
- Alte proprietà meccaniche
- Costo macchina e stampo impone uso su scala di produzione medio alta

# Avvolgimento filamentare (Filament winding)

- Processo per ottenimento di manufatti in composito con simmetria assiale
- Totalmente automatizzata
- Frazioni di volume di fibra medio alte
- Produzione serbatoi, componentistica per industria aerospaziale
- Possibile utilizzo in componenti di forma non assial-simmetrica, ma diventa più complessa

# Schema generale

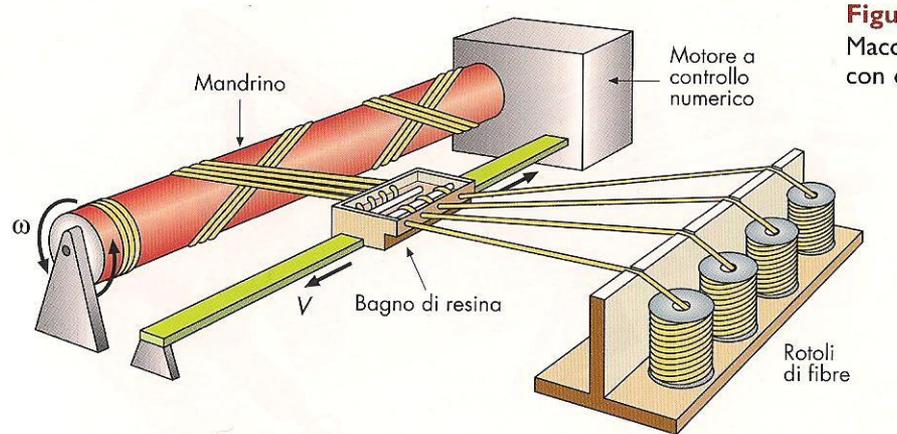
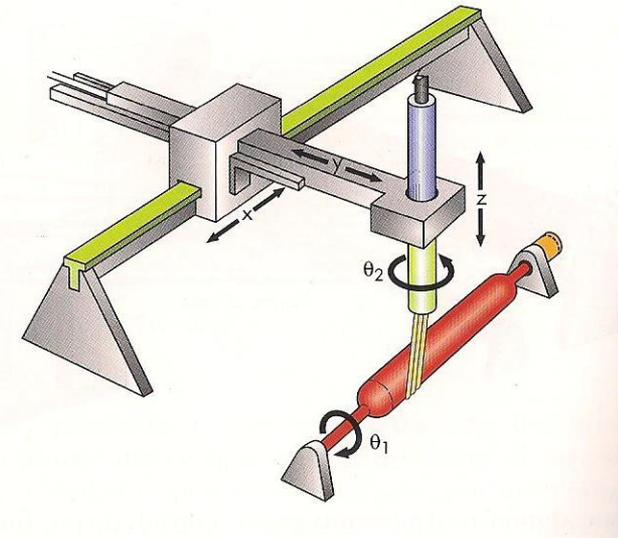


Figura  
Macchina  
con 2



Macchina a 2 gradi di libertà

Macchina a 5 gradi di libertà

Il risultato non è una sequenza di lamine unidirezionali, ma un tessuto  
Non viene depositato un singolo roving ma una banda di una certa  
larghezza. Scegliendo larghezza si può ottenere lamina unidirezionale

# Il processo di Avvolgimento filamentare

## *Filament Winding Machine*

Avvolgimento di fibre continue impregnate di resina su mandrino rotante secondo percorso definito.

*-Assenza di giunzioni*

*-Tecnologia adatta alla realizzazione di parti assialsimmetriche o tubolari;*

*-Processo deposizione automatizzato: elevati volumi produttivi a basso costo;*

*-Alta percentuale di fibre → ottime caratteristiche meccaniche.*

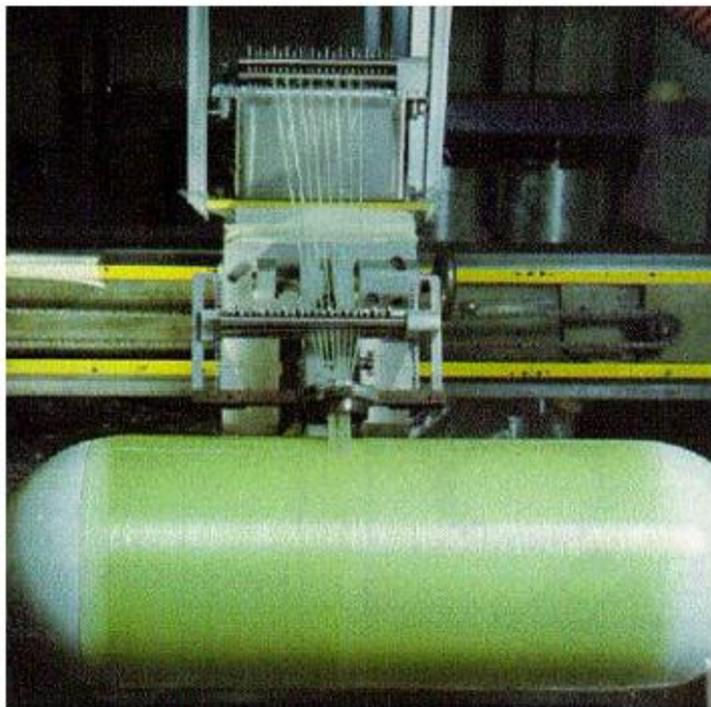


# Il processo di Avvolgimento filamentare

## *Filament Winding Machine*

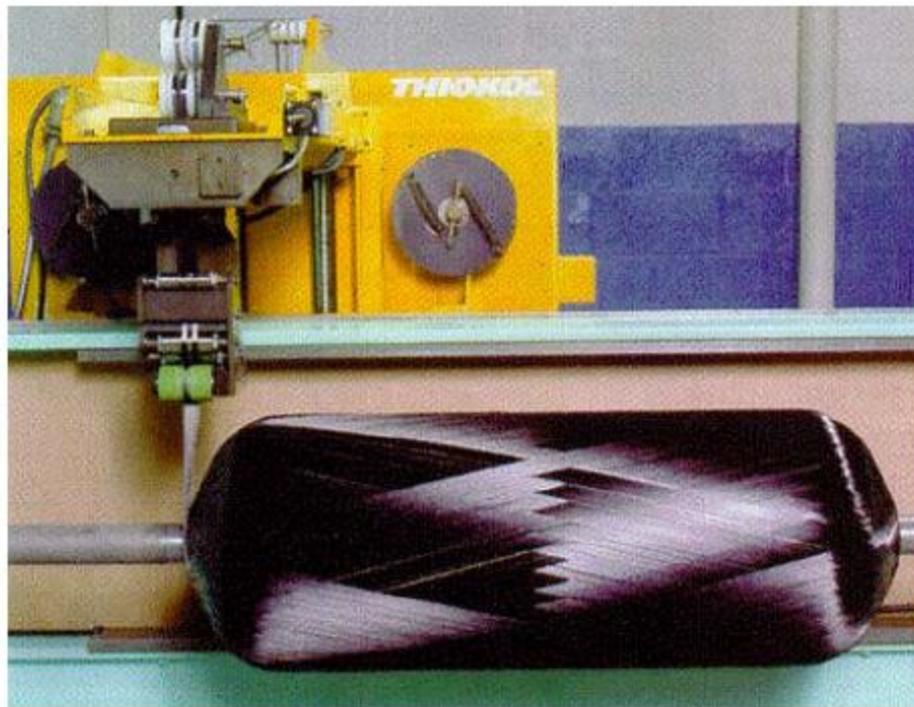
### Wet Winding

Dry-Roving  
+  
Bagno resina



### Dry Winding

Roving-preg; Tow-preg  
*(Poco usata)*



# Il processo di Avvolgimento filamentare

## *Filament Winding Machine*

### **Wet Winding**

Dry-Roving  
+  
Bagno resina

### **Dry Winding**

Roving-preg; Tow-preg  
*(Poco usata)*

### **Caratteristiche dei materiali:**

Fibre: vetro  
carbonio  
aramidiche

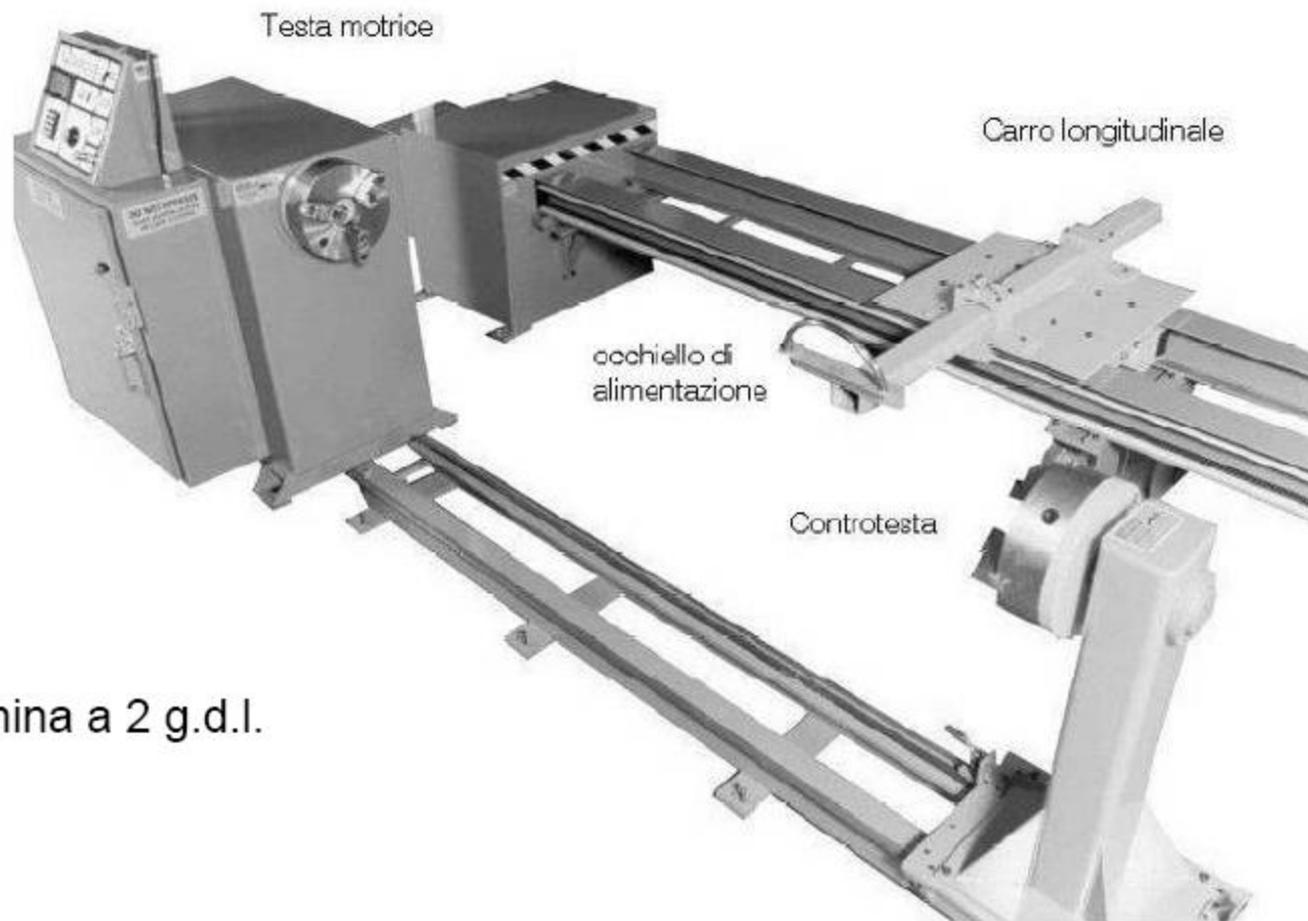
Matrici: epossidiche  
poliestere  
vinilestere

- Bassa temperatura di polimerizzazione;
- Elevata pot-life;
- Bassa tossicità.

# Il processo di Avvolgimento filamentare

## *Filament Winding Machine*

Le macchine più semplici sono molto simili ad un comune tornio (utensile tagliente sostituito da occhiello di alimentazione).



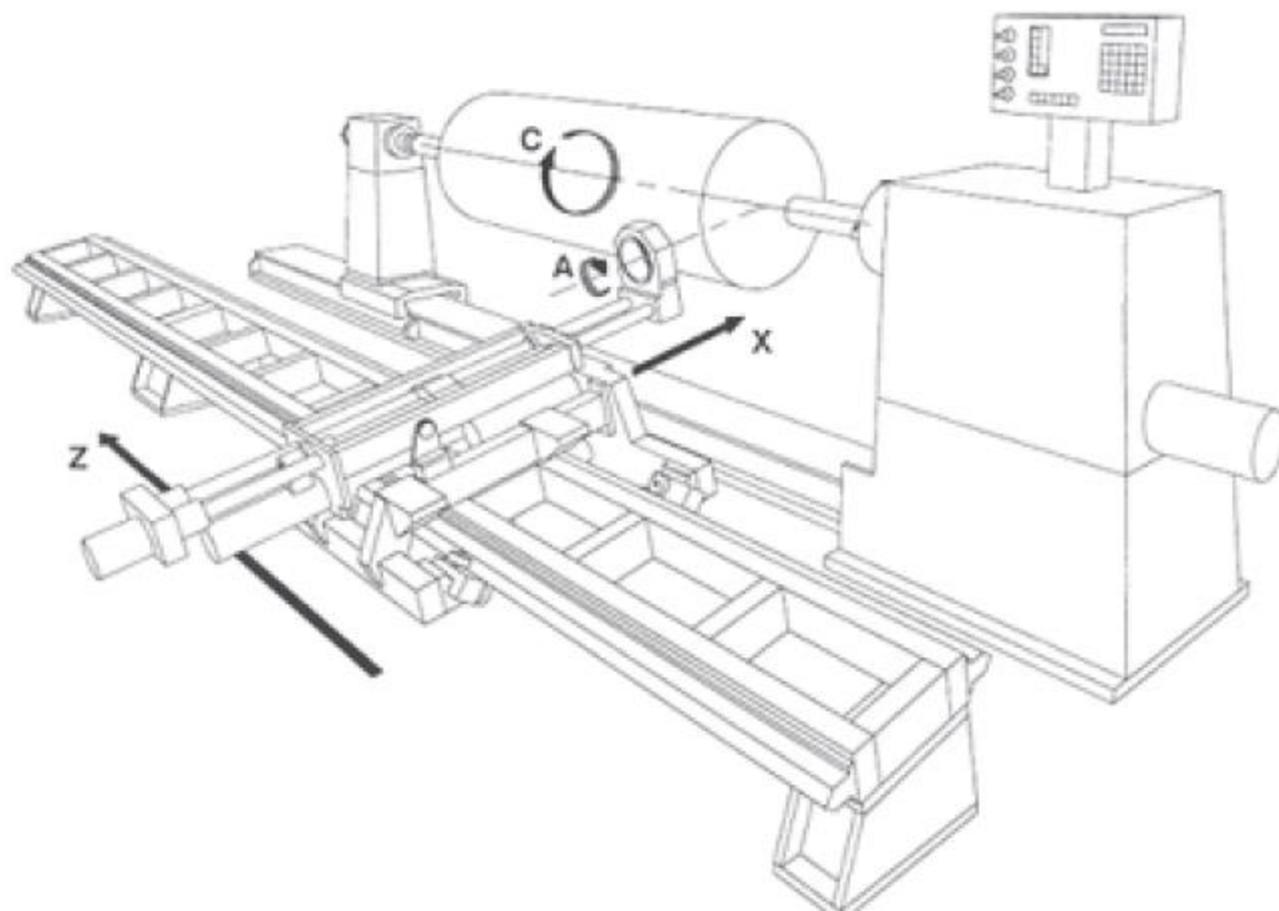
Macchina a 2 g.d.l.

# Il processo di Avvolgimento filamentare

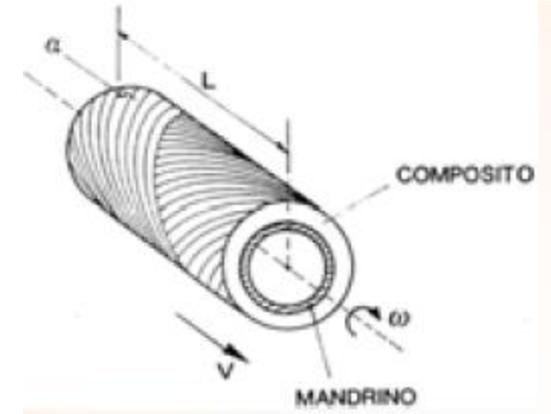
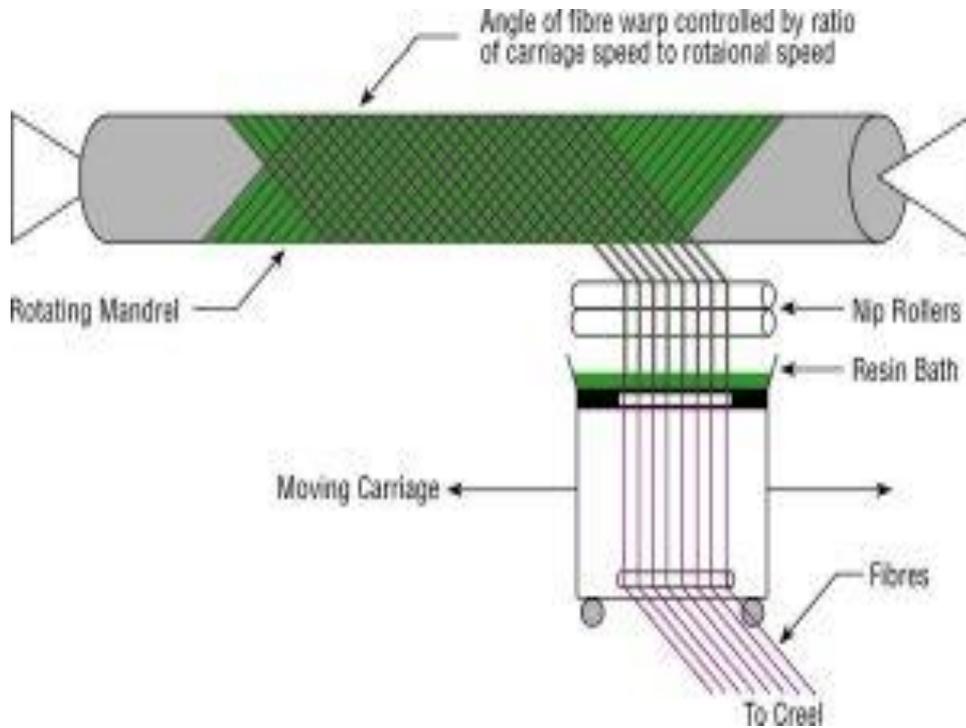
## *Filament Winding Machine*

Esistono macchine fino a 6 g.d.l. Combinando opportunamente i movimenti si ottengono diversi tipi di avvolgimento.

Le più utilizzate sono a 4 g.d.l.



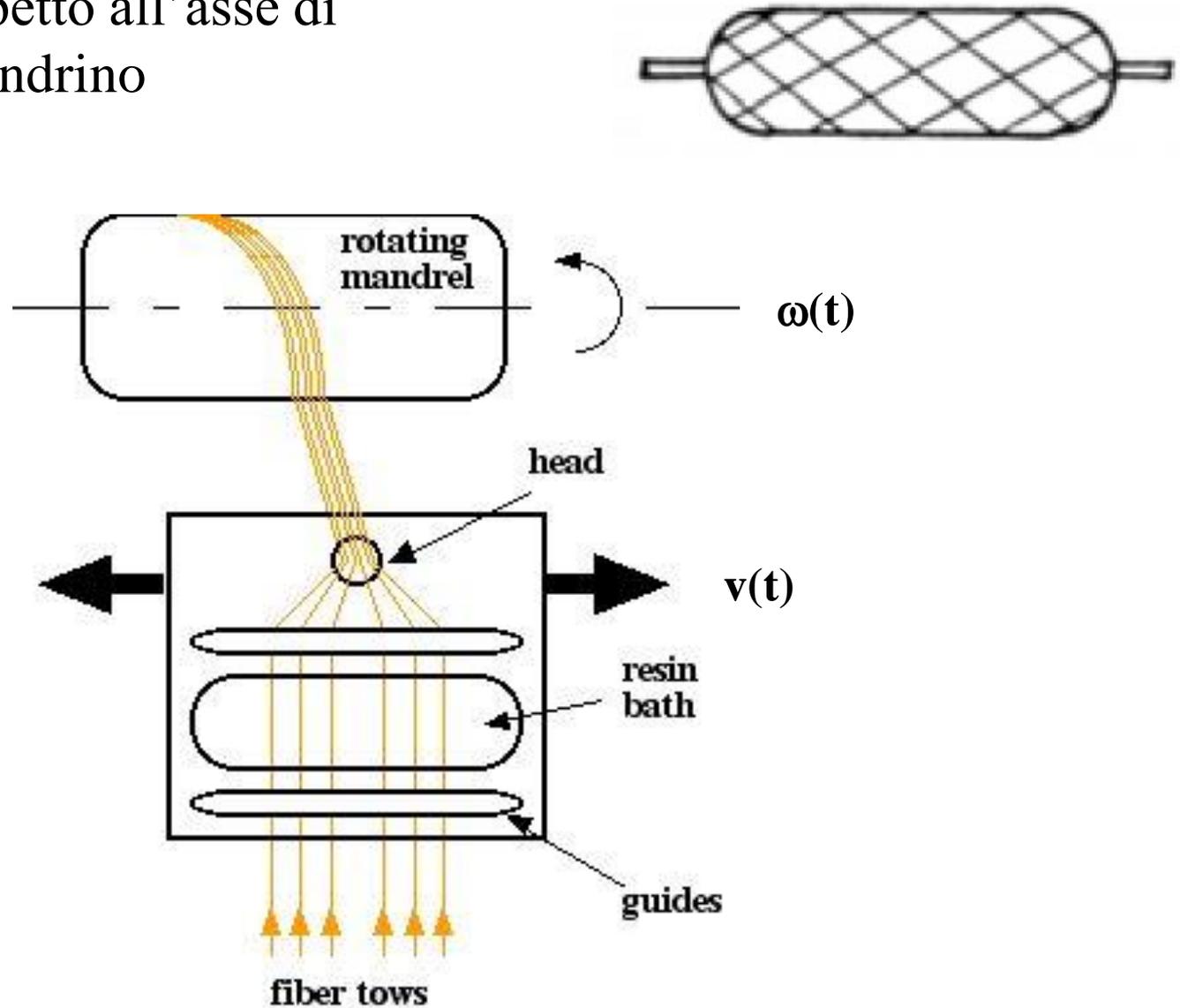
Lo schema di funzionamento più semplice è l'avvolgimento elicoidale



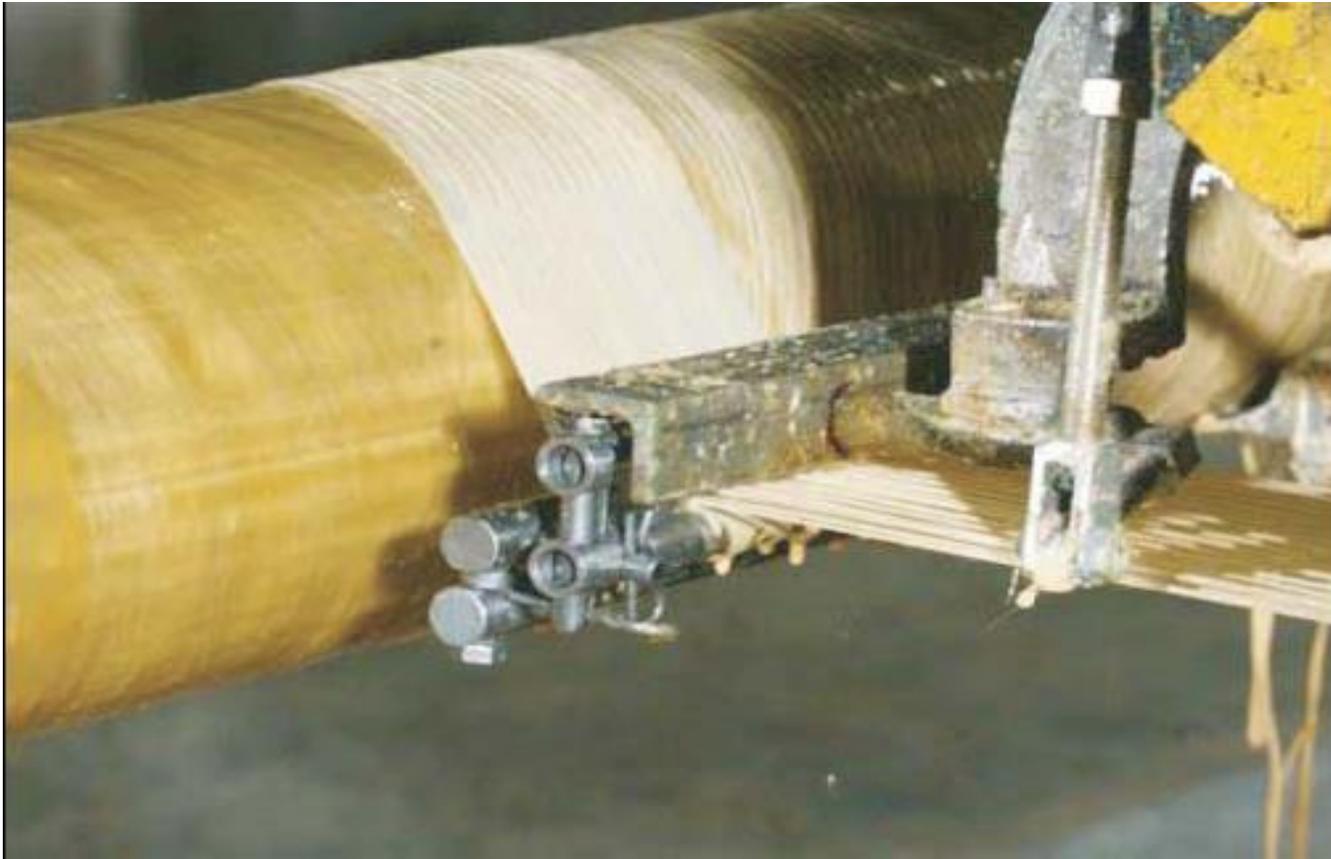
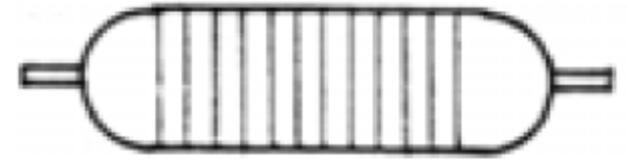
$$\alpha = \arctg\left(\frac{\omega R}{V}\right)$$

Il rapporto fra la velocità di rotazione del mandrino  $\omega(t)$  e la velocità di traslazione del carrello  $V(t)$  determina ad ogni istante l'angolo di avvolgimento delle fibre

L'avvolgimento elicoidale consente angoli di avvolgimento compresi fra  $20^\circ$  e  $85^\circ$  rispetto all'asse di rotazione del mandrino



Se la velocità di traslazione del carrello è trascurabile rispetto alla rotazione del mandrino si ottengono angoli di circa  $90^\circ$ . Si parla di avvolgimento circonferenziale



Per ottenere angoli di avvolgimento inferiori a  $20^\circ$  si usa l'avvolgimento polare. Le fibre vengono avvolte da un braccio rotante. Il braccio ruota quasi a  $90^\circ$  rispetto all'asse di rotazione del mandrino

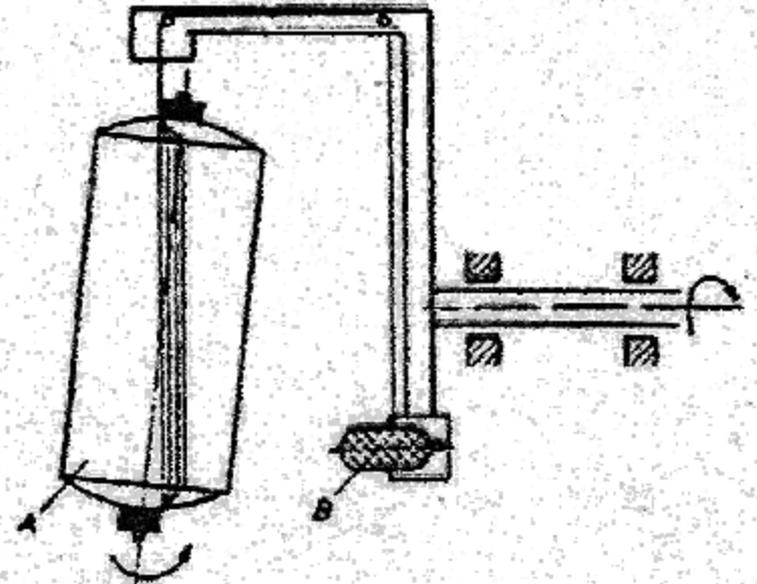
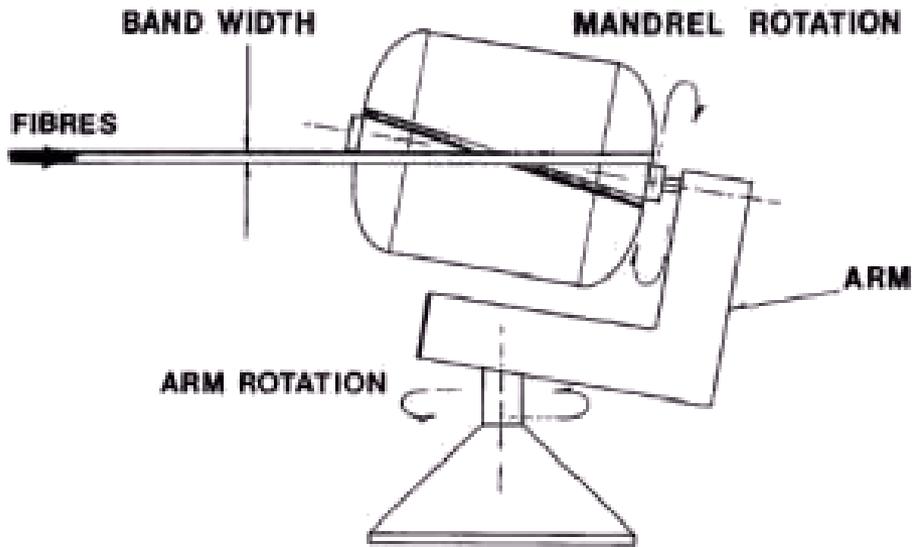
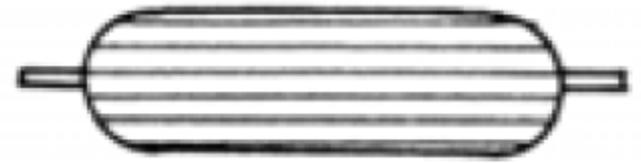


Fig. 6.5 - Schema di avvolgimento polare.

# Il processo di Avvolgimento filamentare

## *Filament Winding Machine*

Il processo tecnologico si suddivide in 6 fasi principali:

### 1) Preparazione e montaggio mandrino

- Esistono diverse tipologie:
- metallici tubolari che si estraggono alla fine del processo (cromati e leggermente conici);
  - solubili in acqua, in gesso;
  - smontabili (a spicchi metallici), collassabili;
  - liners che rimangono in posizione;

### 2) Preparazione programma con percorso di avvolgimento

- Tipologie di avvolgimento:
- elicoidale;
  - polare;
  - circolare;
  - geodetico e non geodetico.

# Geodetiche

- Generalmente per minimizzare la possibilità di scivolamento delle fibre sul mandrino, queste vengono avvolte lungo le geodetiche

$$r(z) * \sin \theta(z) = \text{cost.}$$

- Per evitare di dover per forza passare dalle geodetiche si sfrutta l'attrito fra fibre e mandrino

# Il processo di Avvolgimento filamentare

## *Filament Winding Machine*

Il processo tecnologico si suddivide in 6 fasi principali:

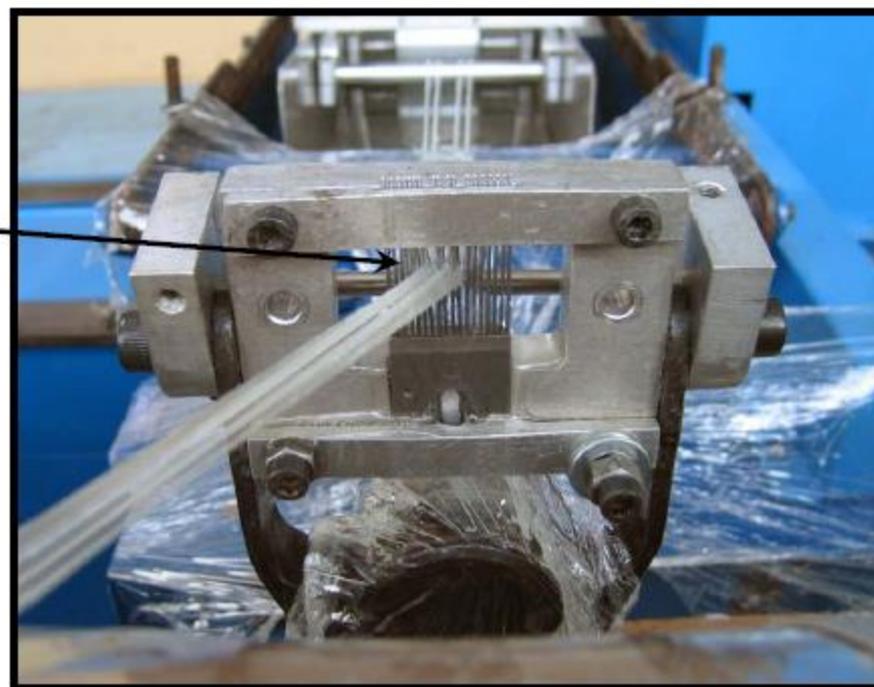
### 3) Impregnazione

Sistema di rulli guida e “strizza” fibre all’uscita dalla stazione di impregnazione.



Pettine:

Impone larghezza fascia;  
Dipende da diametro fibre.



Importante controllo **temperatura resina** (per avere ottimale stato di viscosità) e **tensione fibre** (per espellere aria dai roving) costante tra 5 e 30N.

# Il processo di Avvolgimento filamentare

## *Filament Winding Machine*



Tensionatori per pretensionamento fibre

# Il processo di Avvolgimento filamentare

## *Filament Winding Machine*

Il processo tecnologico si suddivide in 6 fasi principali:

### 4) Avvolgimento

Esempio:

Avvolgimento con  
legatura a velocità  
ridotta.



# Il processo di Avvolgimento filamentare

## *Filament Winding Machine*

Il processo tecnologico si suddivide in 6 fasi principali:

### 5) Polimerizzazione:

B-stage → aumento di viscosità; mandrino tenuto in rotazione così da creare forza centrifuga che distribuisce la resina ed evitare colata della stessa; azione lampade

Eventuale rimozione resina in eccesso (mediante film termoretraibili).

Polimerizzazione vera e propria:

in forni (con termoretraibile o copertura di kevlar);

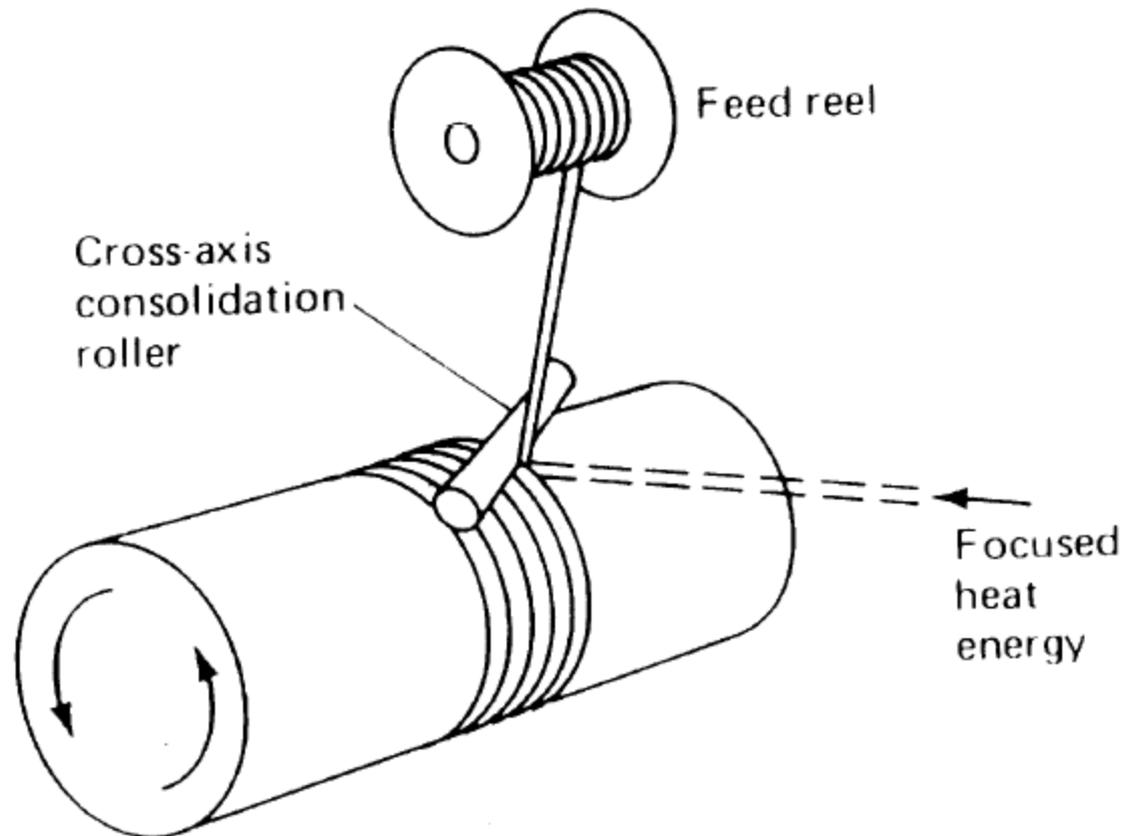
autoclave + sacco da vuoto;

### 6) Rimozione mandrino

### 6) Eventuali operazioni meccaniche

# Avvolgimento con termoplastici

- Il processo può essere utilizzato anche con resine termoplastiche anziché termoindurenti
- Una variante è l'uso di “commingled yarns”, Es. Twintex di Saint Gobain



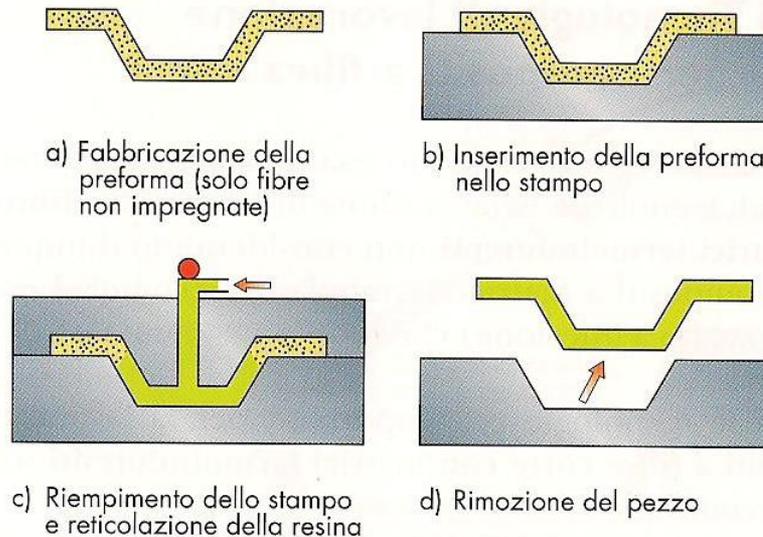
# Parametri critici dell'avvolgimento

- Viscosità della resina per wet FW (Tipicamente 0.3-1.5 Pas)
- Pot life
- Tensione delle fibre (slittamento, moto radiale e bridging)
- Contenuto e distribuzione della resina
- Adesione tra diversi strati (ad es. tra liner e strato meccanico resistente)
- Condizioni di cura
  - Temperatura ambiente ed eventuale postcura
  - Lampade IR ed eventuale postcura
  - Forno
  - Autoclave con sacco a vuoto
  - Lampade UV

# Considerazioni conclusive

- Tecnologia automatizzata per produttività alte
- Finitura superficiale scarsa e comunque solo nel diametro interno
- Buona ripetibilità e standardizzazione
- Difettosità deriva spesso da non completa impregnazione
- Proprietà superiori con avvolgimento a secco (prepreg) ma il manufatto ottenuto è più costoso

# Resin transfer moulding (RTM)



**Figura 13.34**

Fasi del processo di stampaggio a trasferimento di resina (RTM).

Tecnologia essenzialmente automatizzata

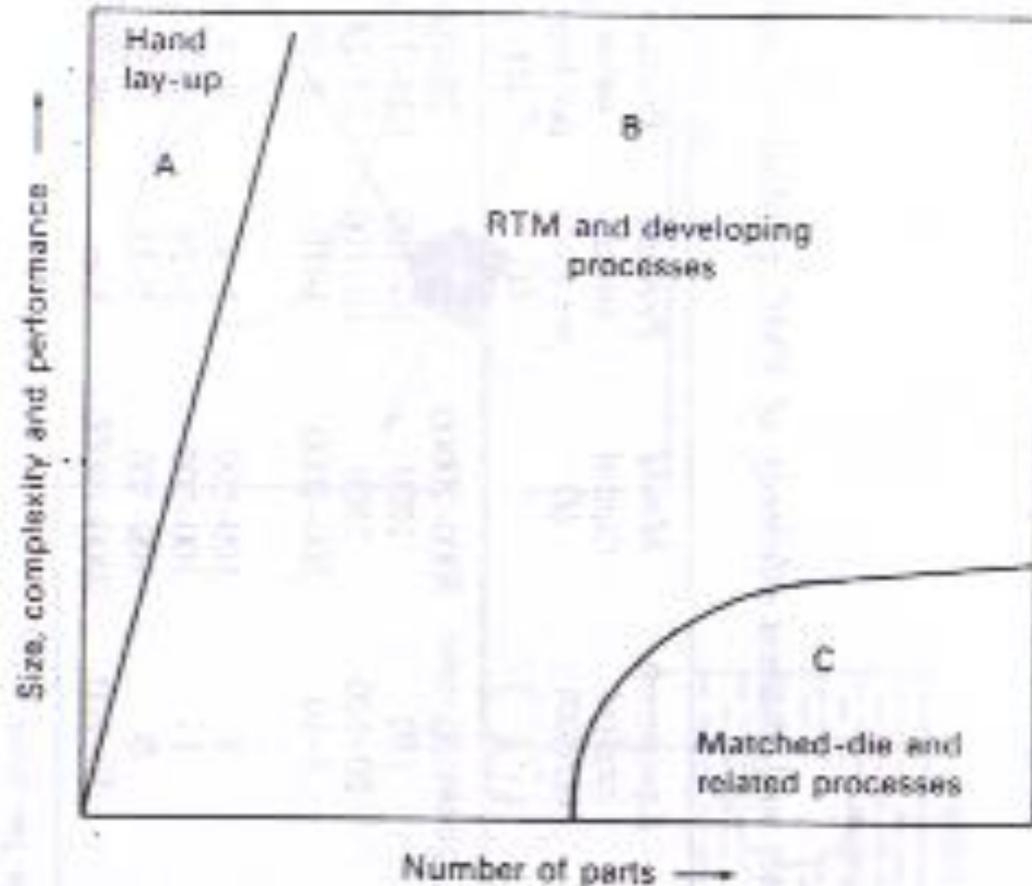
Uso preforme

Versatilità forma da ottenere

Necessaria bassa viscosità resina per impregnazione

Problemi deformazione preforma

# Convenienza RTM in automotive



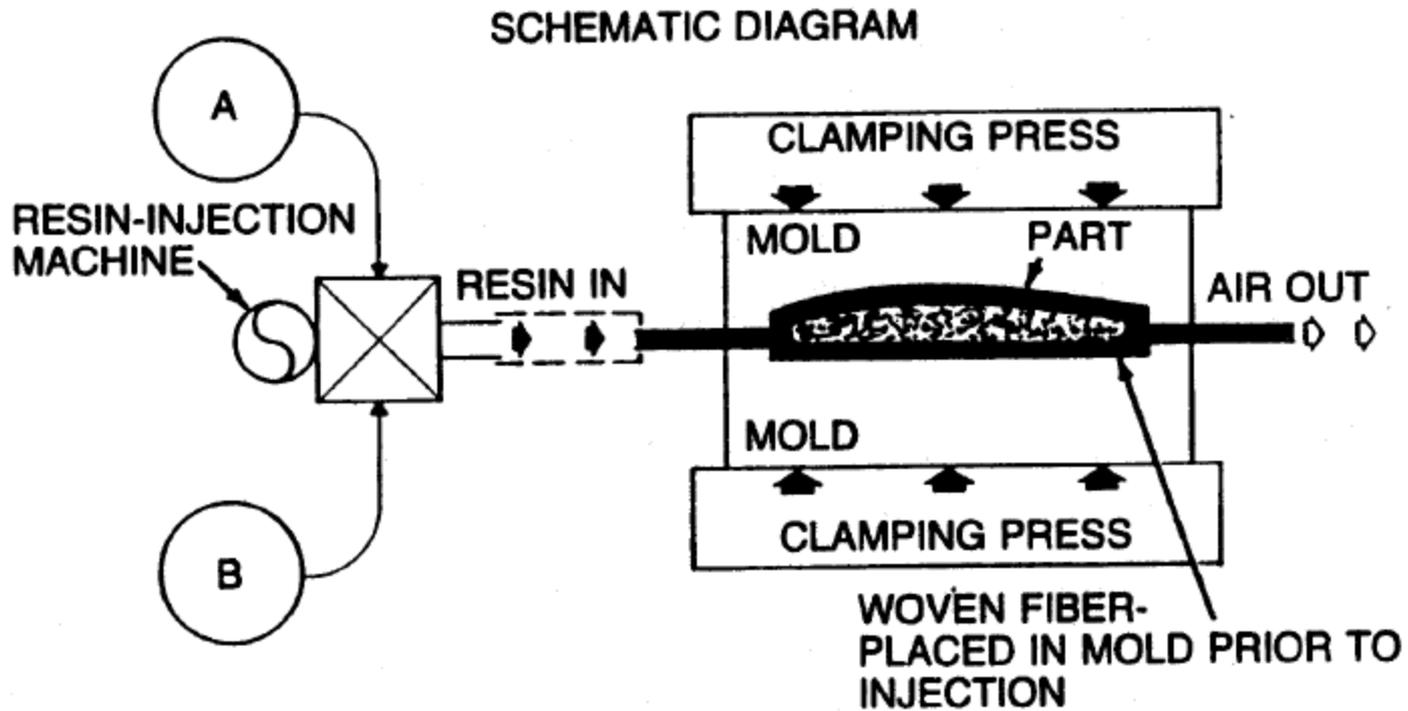
Confronto fra:

RTM

Stratificazione manuale

Compression molding

# Schema processo RTM



## **“Alphabet soup” of RTM-type processes**

- RTM
  - Sviluppato a partire dallo stampaggio di poliuretani reattivi
  - Iniezione in stampo chiuso in presenza di preforme
  - Contenuto di fibre tipico 20%-45% in volume
  - Strutture sandwich con schiume
- VARTM (Vacuum assisted RTM)
  - Si applica vuoto per degasare la preforma (minore contenuto di vuoti) ed aumentare la differenza di pressione
  - Possibili maggiori contenuti di fibre
  - Depressioni fino a 900 mbar
- TERTM (Thermal expansion RTM)
  - L’iniezione della resina avviene in preforme contenenti un’anima. Dopo l’iniezione, un successivo riscaldamento fa espandere l’anima e genera una forza in grado di compattare e consolidare il laminato

## “Alphabet soup” of RTM-type processes (II)

Seal

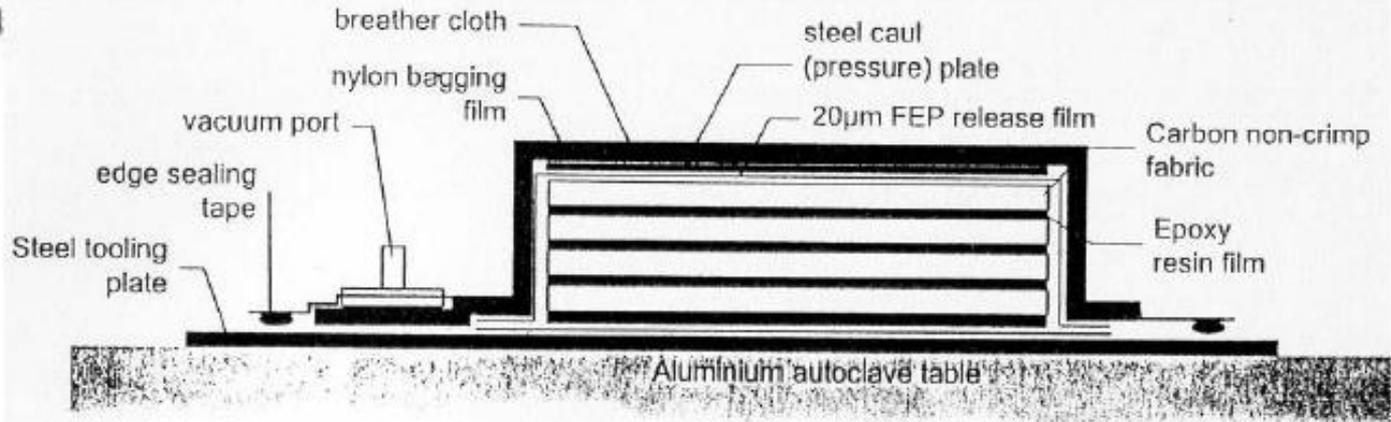
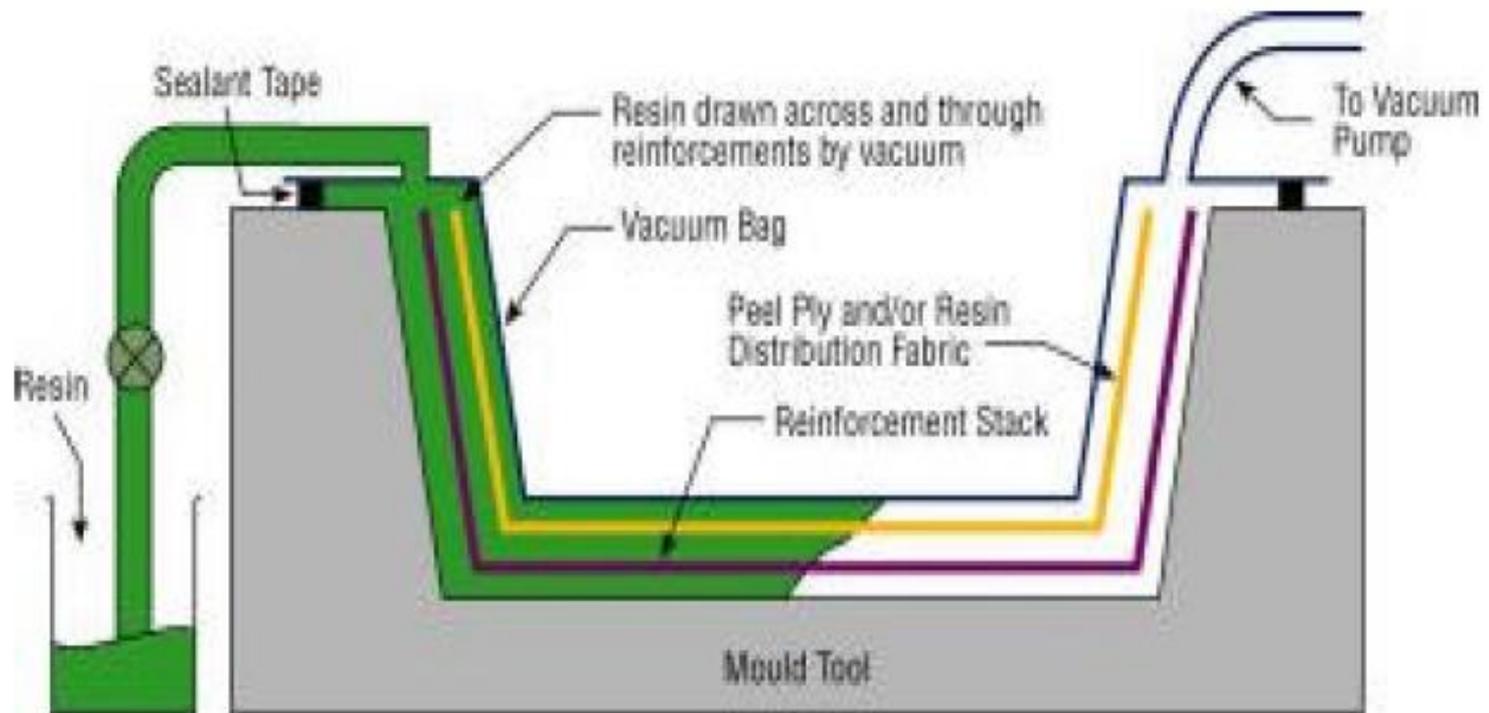


Fig 3. Autoclave Lay Up For Single Sided Pre-preg Resin Infusion

- F
  - Un film (o un foglio) di resina di alta viscosità è alternato con fibre dry in uno stampo per autoclave
  - Si applicano distaccanti e sacco da vuoto
  - Impregnazione e cura avvengono in autoclave o in forno
  - La temperatura deve ridurre sufficientemente la viscosità della resina prima che gli effetti della crescita del peso molecolare diventino significativi

# VARTM



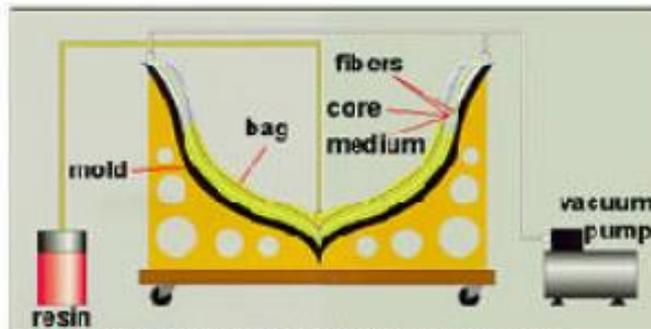
## Vacuum bagging resin distribution

La resina viene aspirata per effetto del vuoto applicato

- Si usano un semistampo ed un sacco da vuoto come controstampo

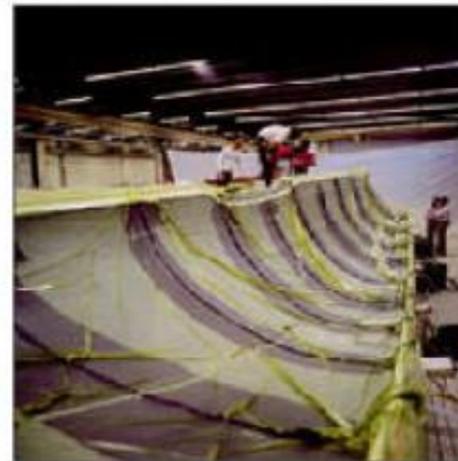
# SCRIMP

## SCRIMP SYSTEM SCHEMATICS



source illustration from Hardcore DuPont Composites

### Boat Hull Manufacture



- Process developed and patented by Seaman's Composites
- Single-sided tooling
- Injection achieved through high-permeability surface layer to cause through-the-thickness flow

## SCRIMP (Seaman's Composite Resin Infusion Molding Process)

- La resina viene aspirata per effetto del vuoto applicato
- Si usano un semistampo ed un sacco da vuoto come controstampo
- Nello SCRIMP sono brevettati i mezzi di distribuzione della resina

# Equazione di Darcy

$$V = - \frac{K}{\eta} \frac{\Delta p}{L}$$

- Fluido che attraversa un mezzo poroso supposto rigido
- La velocità del fluido dipende dal salto di pressione, dalla lunghezza del percorso e dalla viscosità del fluido