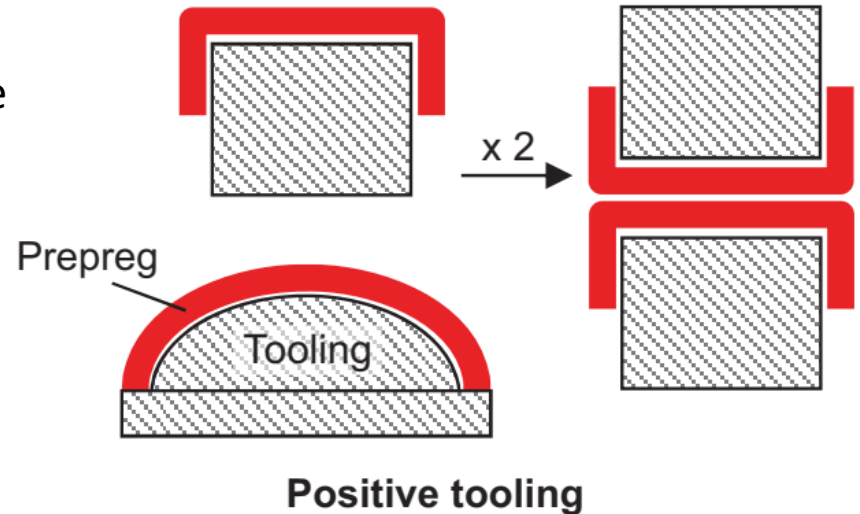


**Concetti di base per  
progettazione/realizzazione di componenti compositi  
TECNOLOGIE A STAMPO APERTO  
(OPEN MOULD)**

# STAMPAGGIO POSITIVO

Il preimpregnato è posizionato su **superfici convesse**

- E' più facile posizionare gli strati di prepreg su **superfici convesse che su superfici concave**
- Se lo stampo ha coefficiente di dilatazione termica più elevato del composito, lo stampo si contrae durante il raffreddamento, **facilitando l'estrazione (demoulding)** del componente
- La superficie interna (adiacente allo stampo) del laminato ha tolleranze dimensionali e **qualità di finitura superficiale** più elevate di quella esterna. E' per esempio utile per successivi assemblaggi/giunzioni.



# COEFFICIENTI DI DILATAZIONE TERMICA

## T300/5208 Carbon/Epoxy

$$CTE_x = 0.018E-6 \text{ } 1/^\circ\text{C}$$

$$CTE_y = 22.5E-6 \text{ } 1/^\circ\text{C}$$

## AS4/3501 Carbon/Epoxy

$$CTE_x = -0.91E-6 \text{ } 1/^\circ\text{C}$$

$$CTE_y = 27.0E-6 \text{ } 1/^\circ\text{C}$$

## E-Glass/Epoxy

$$CTE_x = 7.02E-6 \text{ } 1/^\circ\text{C}$$

$$CTE_y = 21.0E-6 \text{ } 1/^\circ\text{C}$$

$$\text{Acciaio: } 12E-6 \text{ } 1/^\circ\text{C}$$

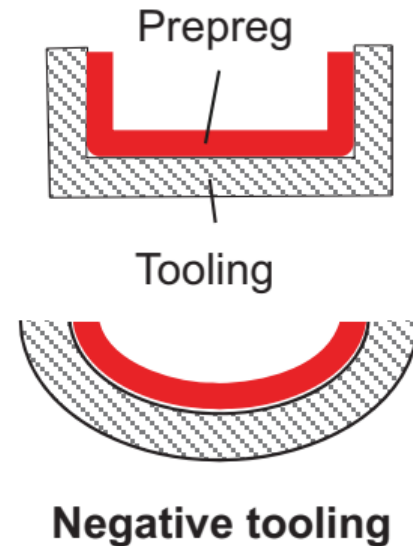
$$\text{Alluminio : } 21E-6 \text{ } 1/^\circ\text{C}$$

$$\text{TEFLON : } 120E-6 \text{ } 1/^\circ\text{C}$$

# STAMPAGGIO NEGATIVO

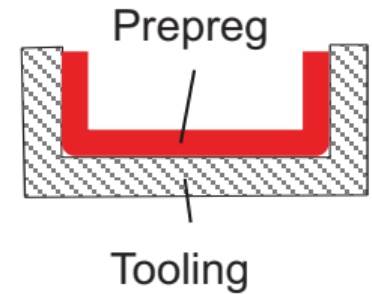
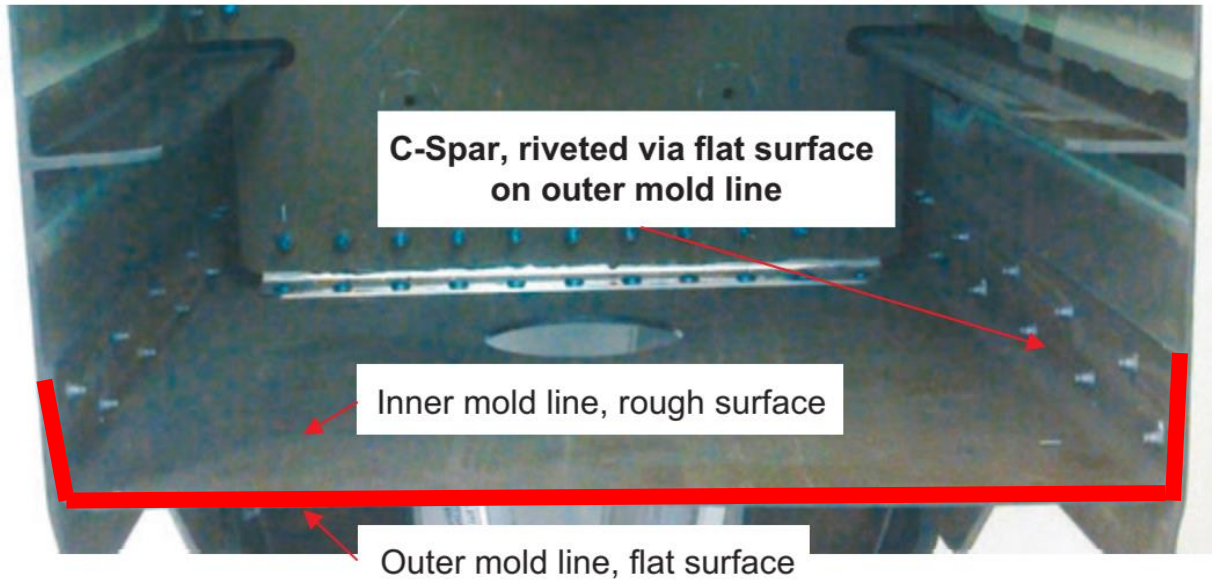
Il preimpregnato è posizionato su **superfici concave**

- E' più difficile posizionare gli strati di prepreg su superfici concave (soprattutto agli angoli e per dimensioni di stampo ridotte)
- Se lo stampo ha coefficiente di dilatazione termica più elevato del composito, **lo stampo si contrae** durante il raffreddamento, rendendo difficile il demoulding del componente
- La superficie esterna del laminato (adiacente allo stampo) ha tolleranze dimensionali e **qualità di finitura superficiale** più elevate di quella interna.



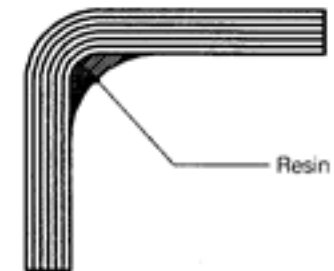
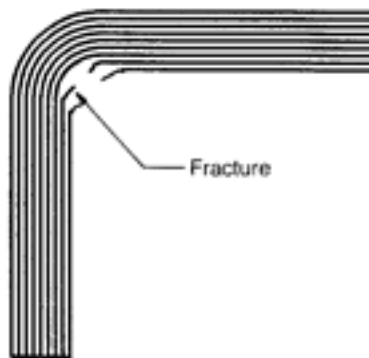
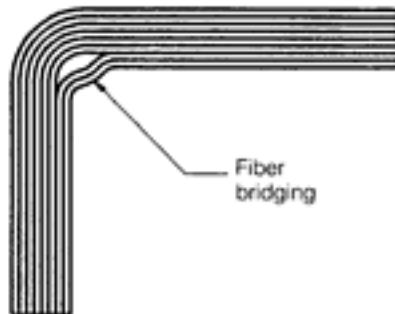
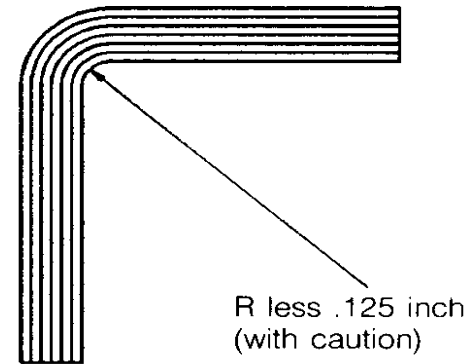
# STAMPAGGIO NEGATIVO

C-spar rivettata sulla superficie esterna (adiacente allo stampo)



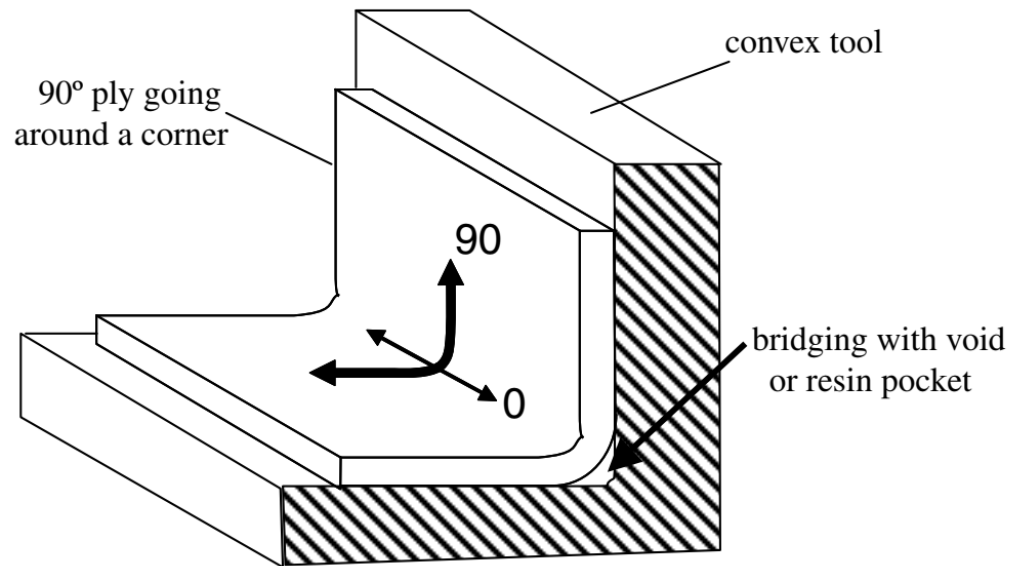
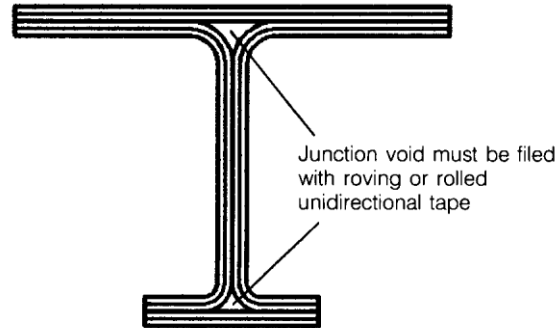
## Posizionamento lamine in corrispondenza dei raccordi

- E' in genere consigliabile non utilizzare raggi di raccordi troppo piccoli

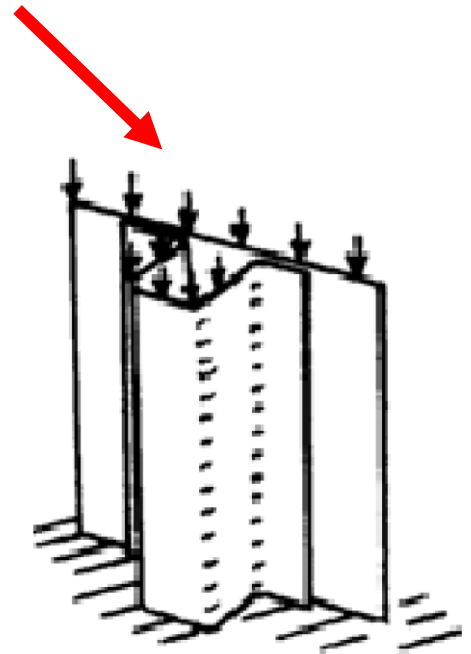
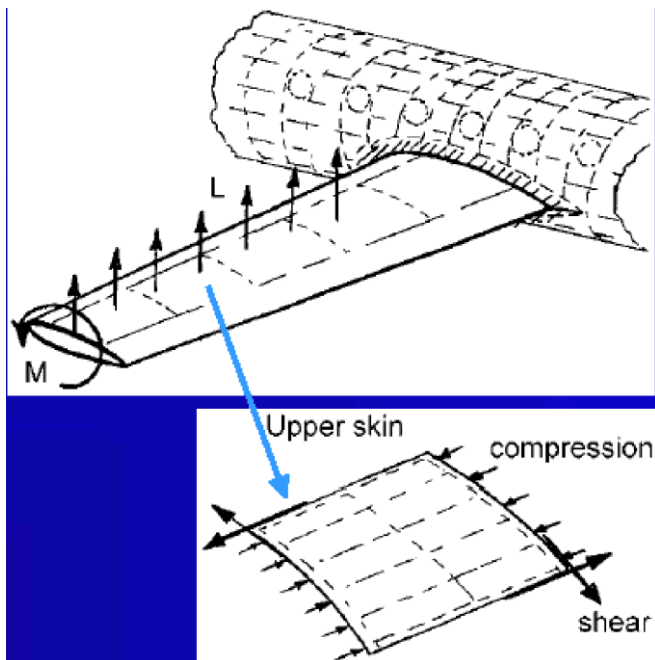


Possibili difetti di produzione ai raccordi

# Posizionamento lamine in corrispondenza dei raccordi



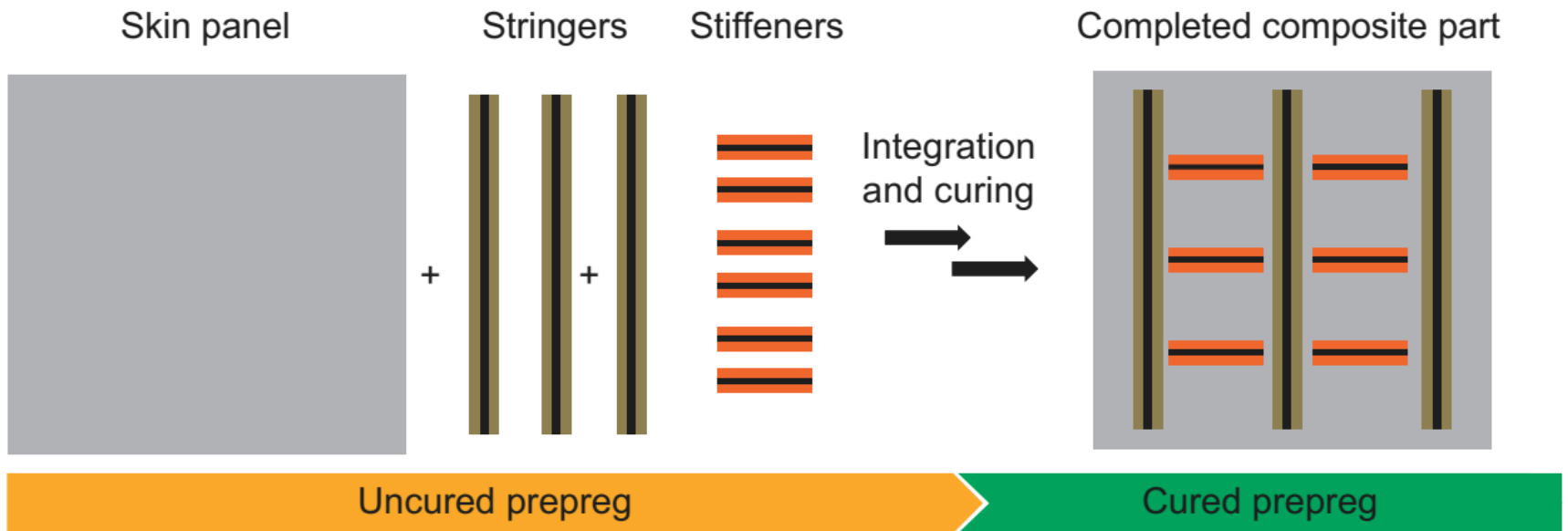
# Componenti compositi realizzati con configurazione **Panel/Skin + Stringers + Stiffeners** (pannello/pelle + traverse + irrigidimenti)





# REALIZZAZIONE INTEGRALE (CONSOLIDAMENTO SINGLE-STEP)

Pannello, stringers e stiffeners vengono consolidati contemporaneamente



# REALIZZAZIONE INTEGRALE (CONSOLIDAMENTO SINGLE-STEP)

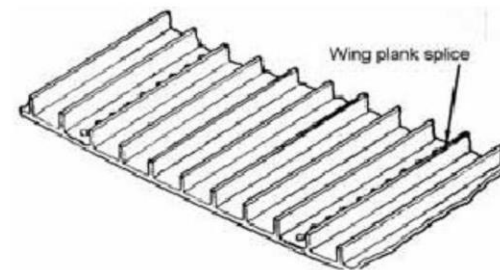
## VANTAGGI

- Riduzione di peso
- Riduzione del numero di elementi
- Riduzione delle operazioni/costi di assemblaggio



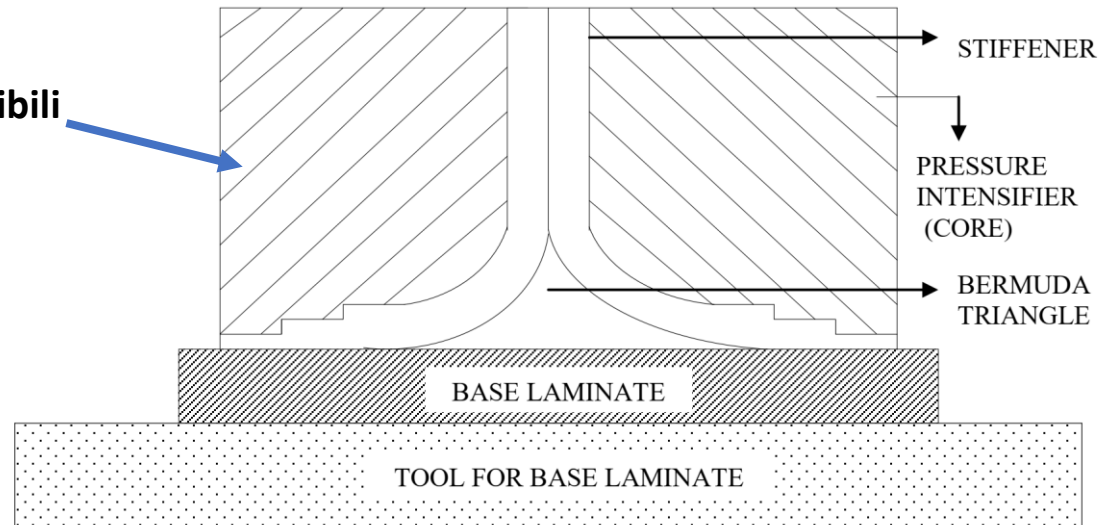
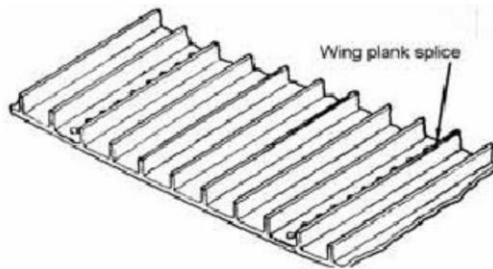
## SVANTAGGI

- Elevati costi per gli stampi (sono richieste alte precisioni)

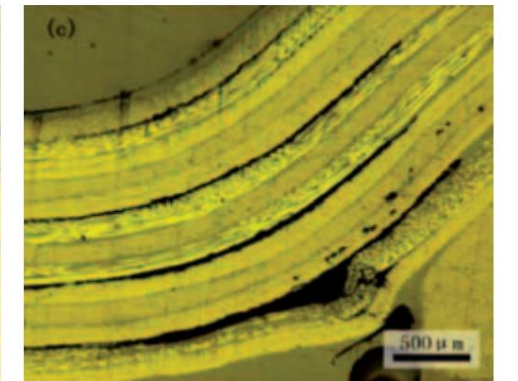
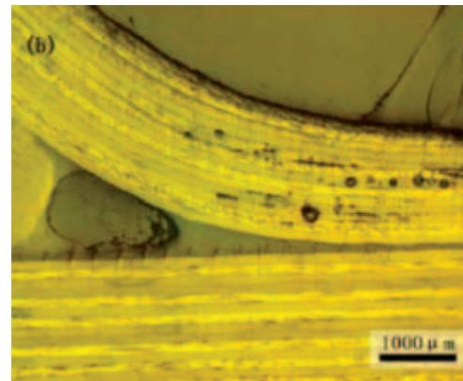
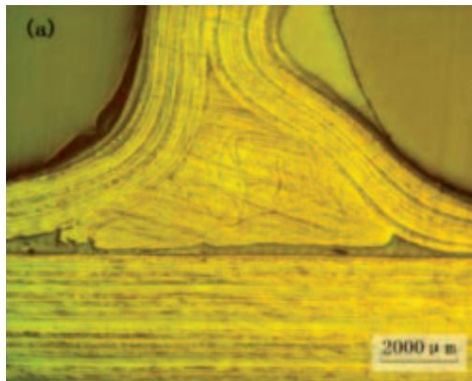
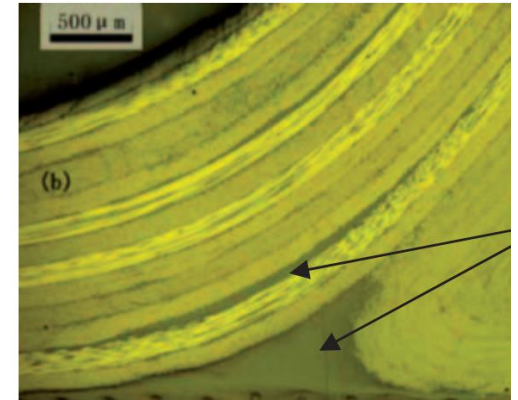
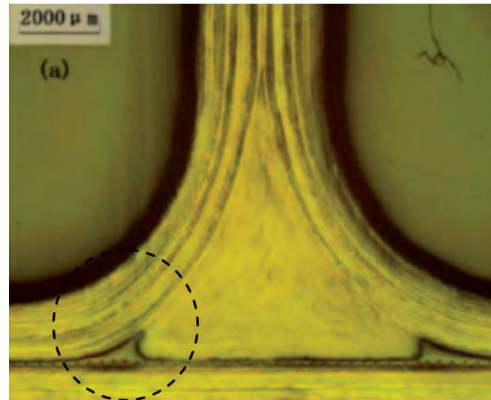
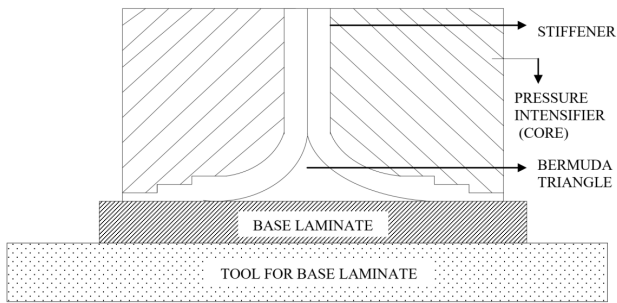


# REALIZZAZIONE INTEGRALE (CONSOLIDAMENTO SINGLE-STEP)

Gli stampi possono essere rigidi o flessibili



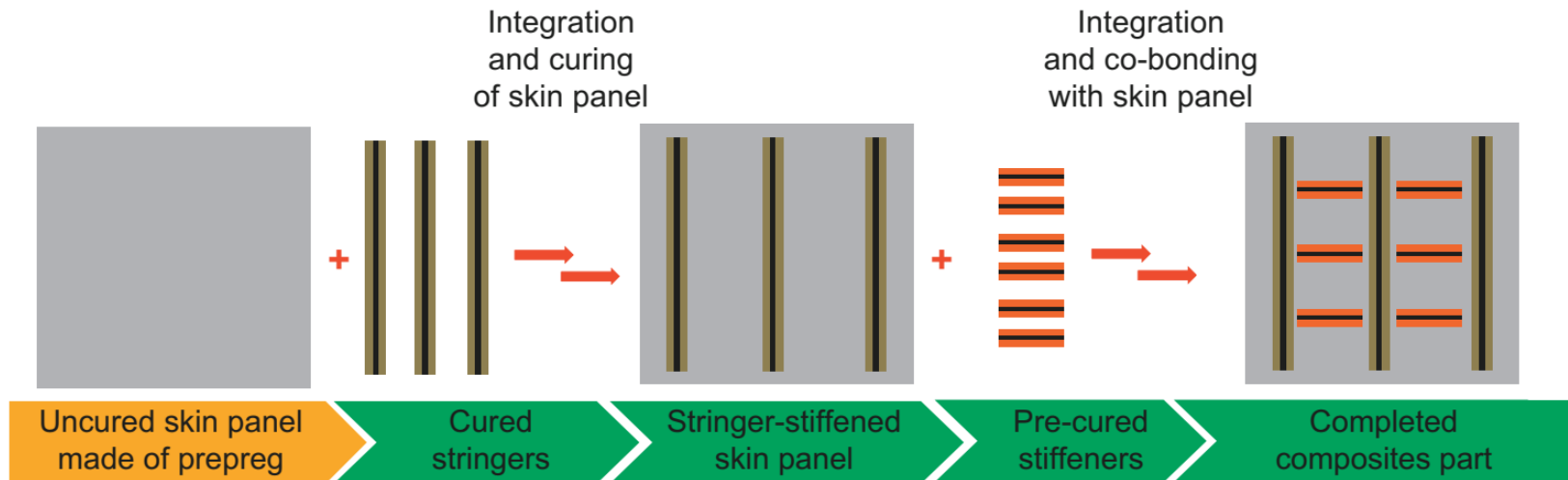
# REALIZZAZIONE INTEGRALE (CONSOLIDAMENTO SINGLE-STEP)



# REALIZZAZIONE DIFFERENZIALE (CONSOLIDAMENTO MULTI-STEP)

Singoli componenti già consolidati (p.e. stringers) sono assemblati al pannello durante il suo curing.

Gli stiffeners sono successivamente incollati al pannello (+stringers) precedentemente consolidato

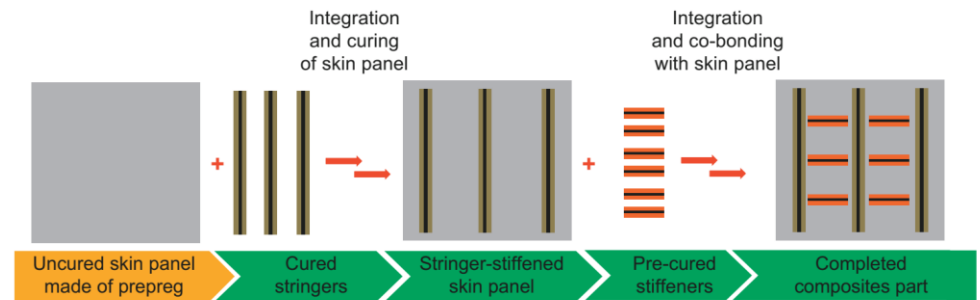


# REALIZZAZIONE DIFFERENZIALE (CONSOLIDAMENTO MULTI-STEP)

## VANTAGGI

Singoli componenti già consolidati possono essere esaminati per rivelare eventuali difetti.

Gli stampi sono di geometria più semplice e costo più basso rispetto alla configurazione integrale.

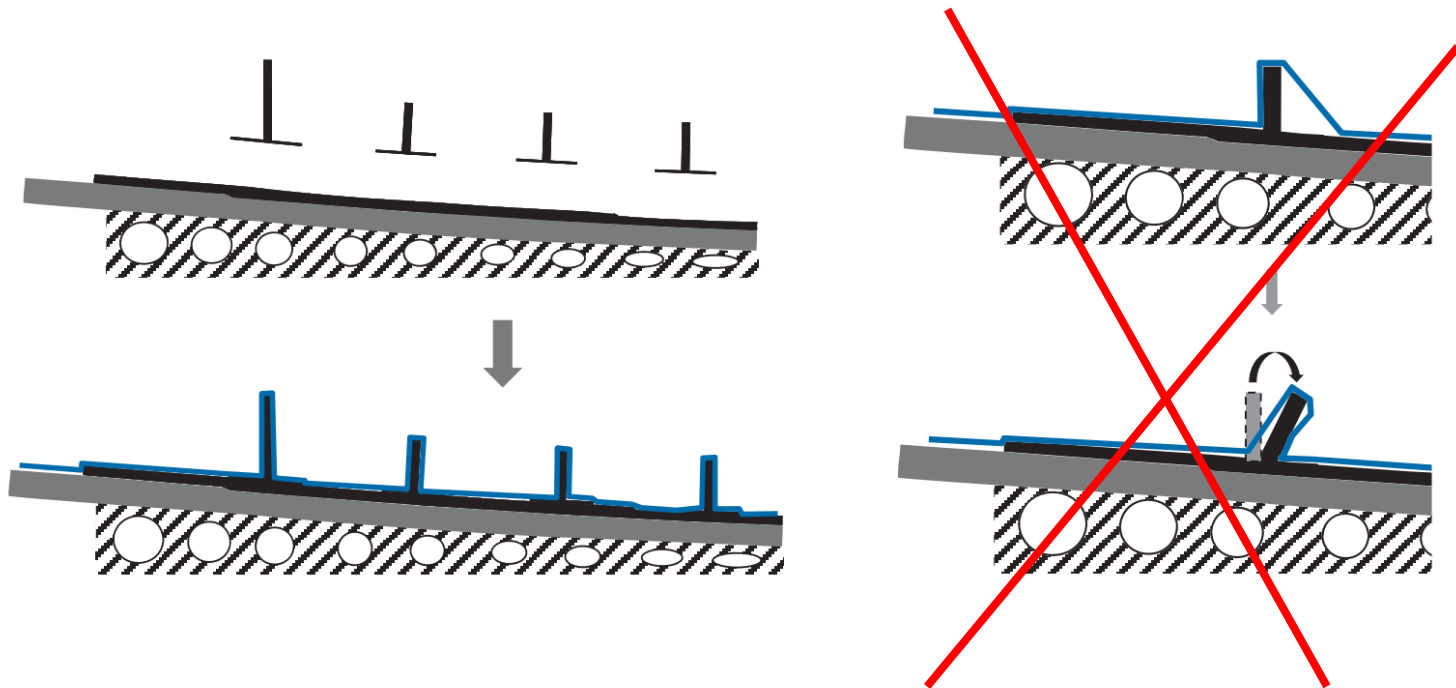


## SVANTAGGI

Il costo di realizzazione complessivo del componente finale è più alto.

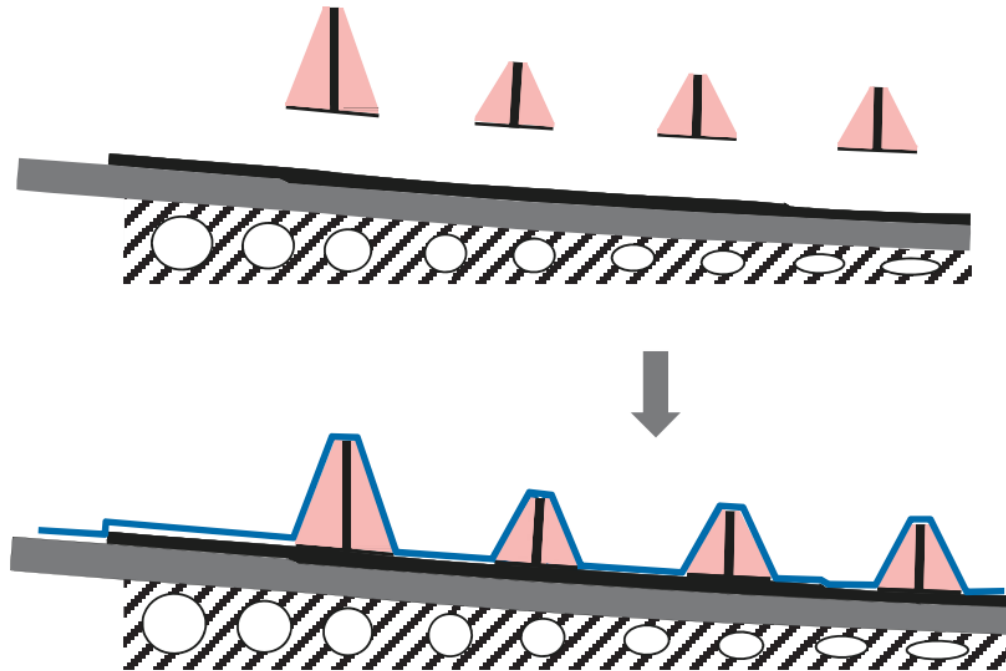
# REALIZZAZIONE DIFFERENZIALE (CONSOLIDAMENTO MULTI-STEP)

STRINGER CONSOLIDATI – PANNELLO DA CONSOLIDARE  
Preparazione Sacco a vuoto



# REALIZZAZIONE DIFFERENZIALE (CONSOLIDAMENTO MULTI-STEP)

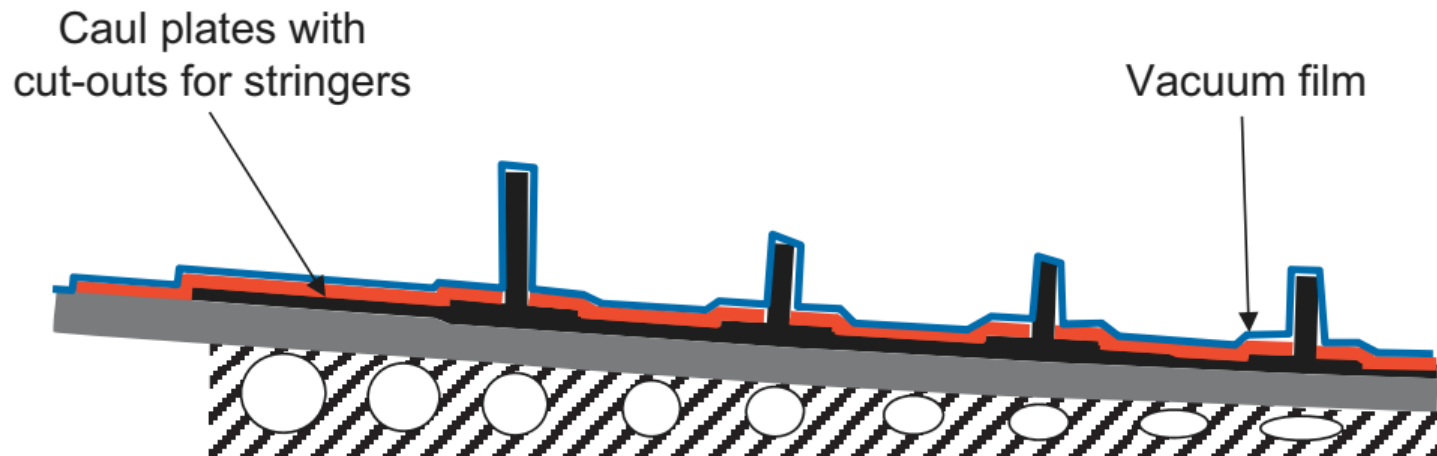
STRINGER CONSOLIDATI – PANNELLO DA CONSOLIDARE  
Sacco a vuoto con utilizzo di supporti angolari (silicone)





# REALIZZAZIONE DIFFERENZIALE (CONSOLIDAMENTO MULTI-STEP)

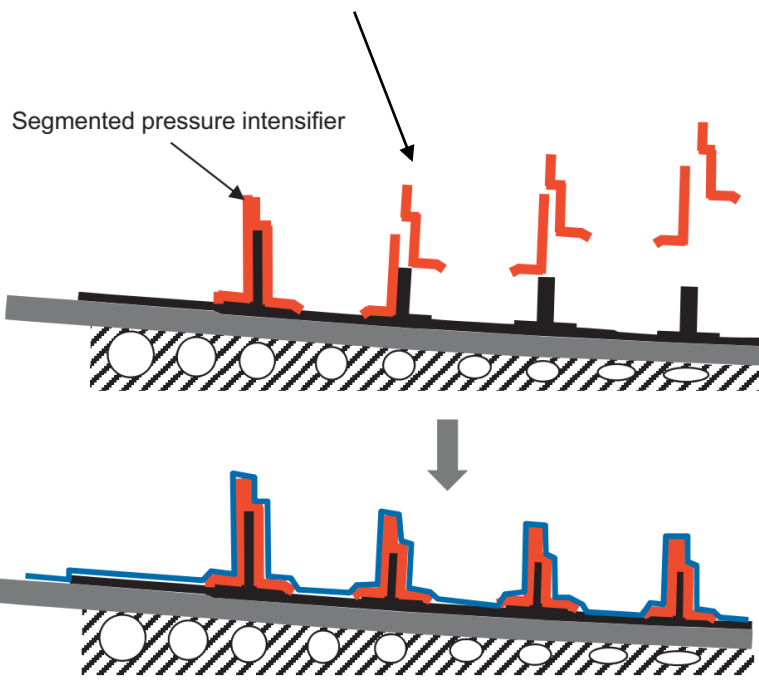
STRINGER CONSOLIDATI – PANNELLO DA CONSOLIDARE  
Sacco a Vuoto con utilizzo di controstampo parziale



# REALIZZAZIONE DIFFERENZIALE (CONSOLIDAMENTO MULTI-STEP)

 **PANNELLO CONSOLIDATO – STRINGER DA CONSOLIDARE**  
Utilizzo di controstampo parziale

Supporti in metallo, CFRP o silicone



# REGOLE DI BASE PER LA SCELTA DEL LAYUP

**Orientazioni generalmente considerate nella progettazione:**

**$0^\circ$ ,  $\pm 45^\circ$ ,  $90^\circ$**

**$0^\circ$ ,  $\pm 30^\circ$ ,  $\pm 45^\circ$ ,  $\pm 60^\circ$ ,  $90^\circ$**

**Utilizzare sequenze di laminazione simmetriche**

(a meno di considerazioni particolari di tipo aeroelastico ed aerodinamico)

**Se non essenziali, spesso si evita di porre gli strati a  $0^\circ$  all'esterno**

(proteggendoli da impatti esterni con strati a  $\pm 45^\circ$ )

# REGOLE DI BASE PER LA SCELTA DEL LAYUP

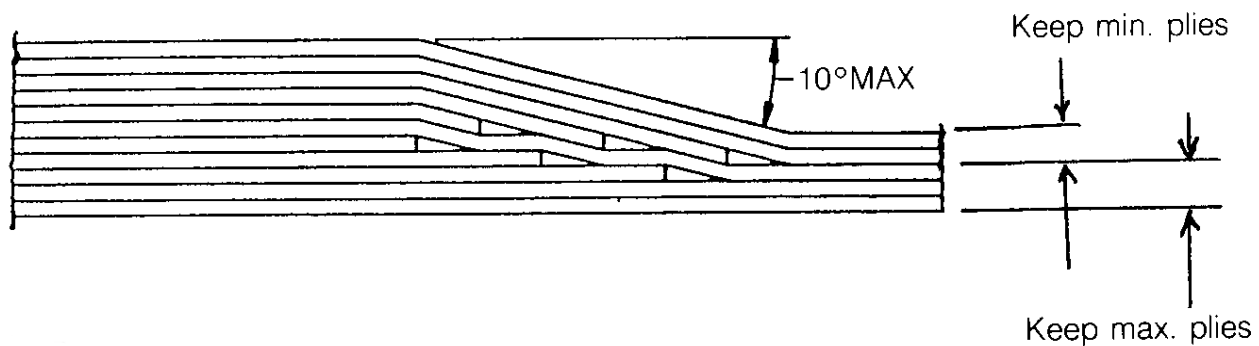
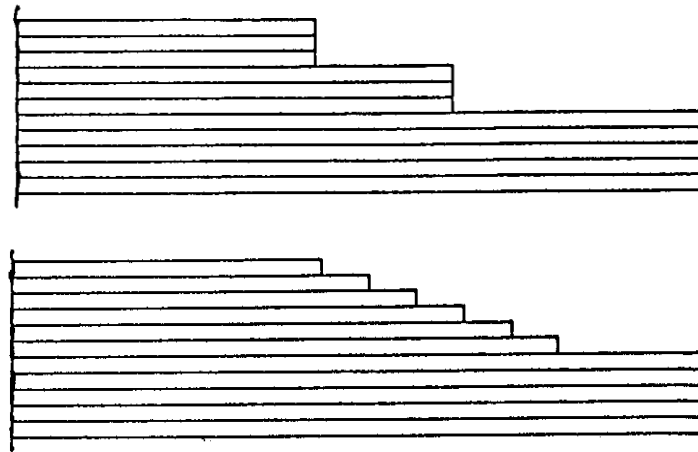
Se un laminato è soggetto a sforzi di fatica, è preferibile **evitare differenze di orientazione maggiori di 60° tra strati adiacenti** (angoli più elevati facilitano la formazioni di microcracks nella matrice in conseguenza degli sforzi residui)

**Evitare di raggruppare molti strati adiacenti con la stessa orientazione** (soprattutto se orientati a 90° rispetto al carico principale): **non più di 4 o 5 strati** adiacenti con la stessa orientazione

E' preferibile che almeno il 5-10% della frazione degli strati abbia una delle orientazioni di base individuate (per minimizzare gli sforzi sulla matrice in ogni direzione)

# REGOLE DI BASE PER LA SCELTA DEL LAYUP

- Evitare variazioni di spessore improvviso : il ply drop-off deve essere progressivo.
- Evitare l'interruzione di una lamina a  $0^\circ$  adiacente ad uno strato a  $90^\circ$



# REGOLE DI BASE PER LA SCELTA DEL LAYUP

I fattori di concentrazione degli sforzi al bordo di un foro/intaglio dipendono dalla sequenza del laminato

Per un foro circolare

$K_t = 7$  per laminati unidirezionali

$K_t = 2$  per laminati [+45/-45]

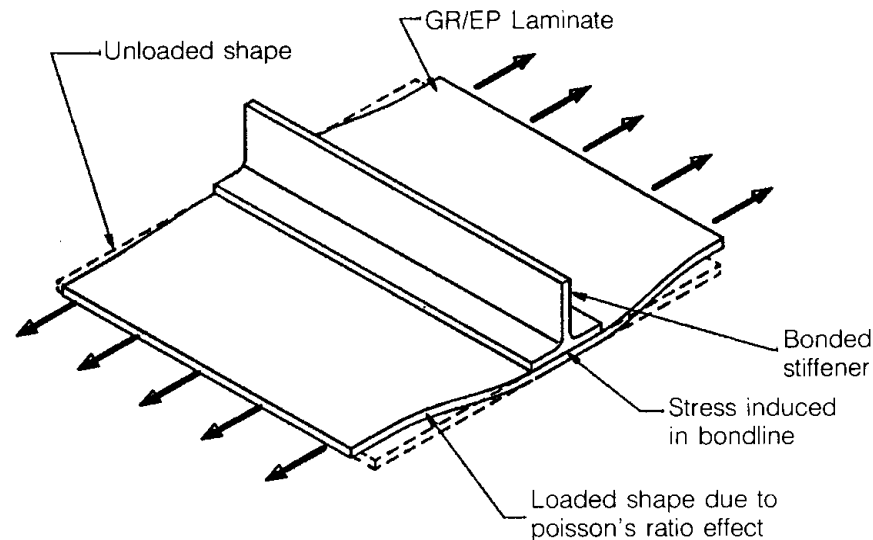
$$K_T^\infty = 1 + \sqrt{\frac{2}{A_{22}} \left[ \sqrt{A_{11}A_{22}} - A_{12} + \frac{A_{11}A_{22} - A_{12}^2}{2A_{66}} \right]}$$

$A_{ij}$  = termini della matrice di rigidezza del laminato  $[A]$  (sul piano)

# REGOLE DI BASE PER LA SCELTA DEL LAYUP

## Coefficiente di Poisson del laminato

Può essere importante ridurre il coefficiente di contrazione trasversale per evitare o ridurre la nascita di sforzi localizzati

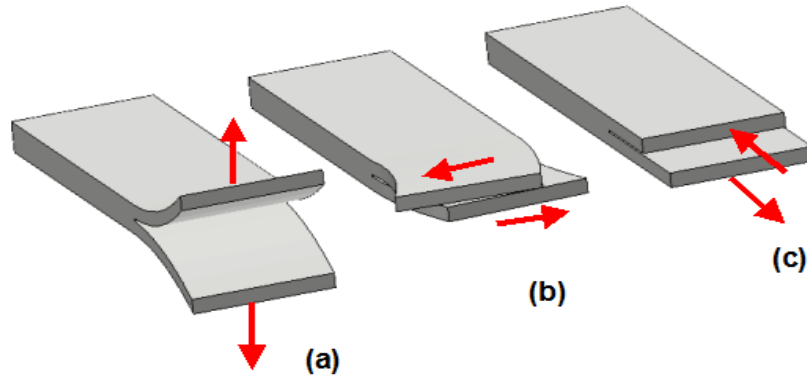


Per ridurre il coefficiente di Poisson:

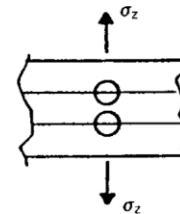
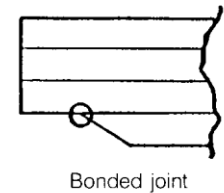
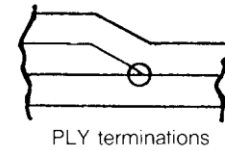
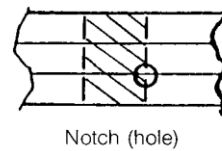
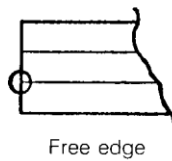
- Ridurre il numero di strati a  $0^\circ$
- Aumentare il numero di strati a  $90^\circ$

# DELAMINAZIONE

La delaminazione è una modalità di rottura tipica dei laminati



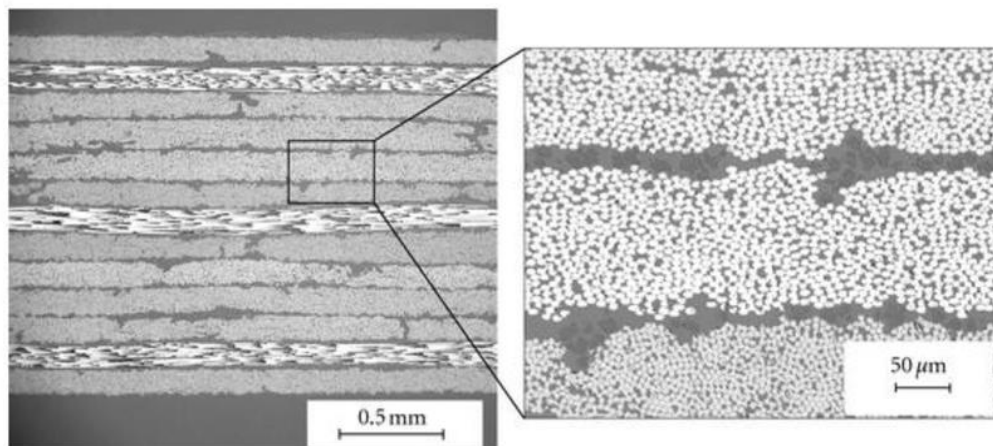
Geometrie e configurazioni  
**critiche** per la  
delaminazione



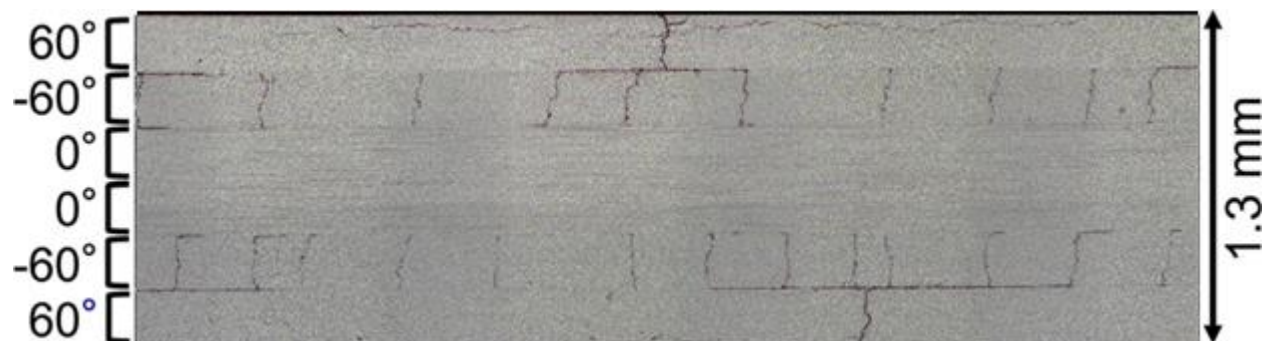
Normal load



# ACCUMULAZIONE DEL DANNO



FRATTURE  
DELLA  
MATRICE



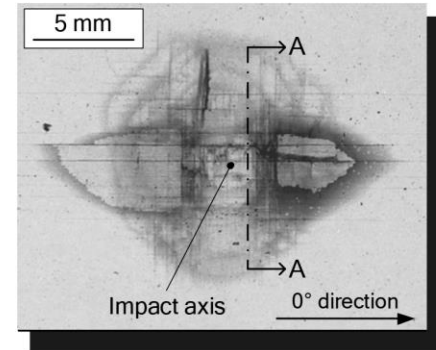
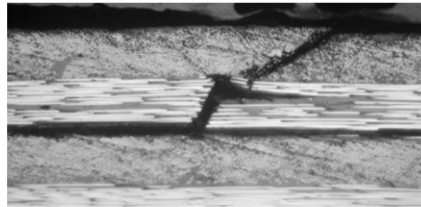
# ACCUMULAZIONE DEL DANNO

## DANNEGGIAMENTO DA IMPATTO

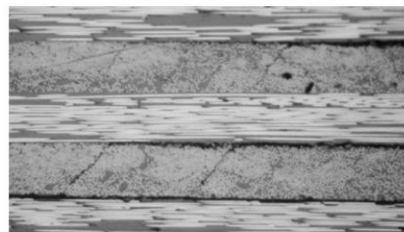
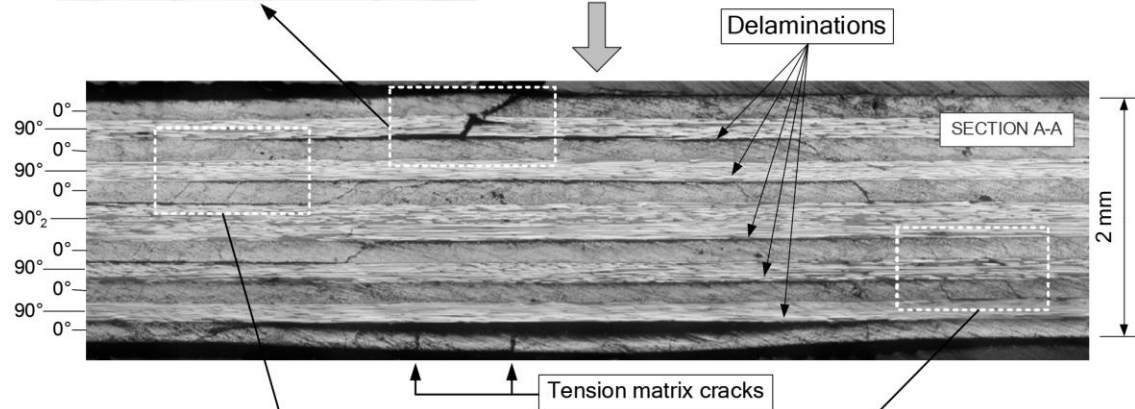
Laminato [0/90]3s

IMPACT ENERGY = 4.1 J

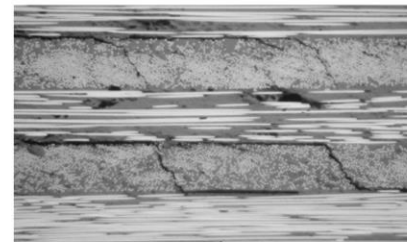
Fibre fracture in 90° layer



IMPACT



Shear matrix cracks and delaminations



Shear matrix cracks and delaminations