

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID



ASPECTOS MICROMECÁNICOS DE LA ROTURA

Carlos Navarro

**Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de
Estructuras**

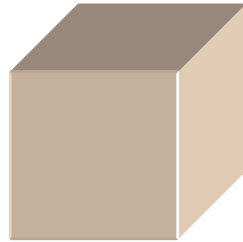


Índice

1. **Introducción**
2. **Resistencia Mecánica en Tracción en dirección de las fibras**
3. **Resistencia Mecánica en Compresión en dirección de las fibras**
4. **Resistencia Mecánica en Tracción en dirección transversal**
5. **Resistencia Mecánica en Compresión en dirección transversal**
6. **Resistencia Mecánica a cortadura plana**

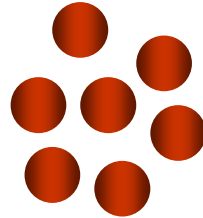


Introducción

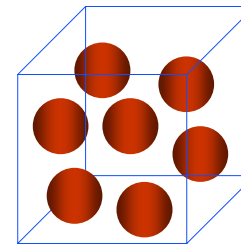


Resistencia mecánica
de la matriz

+



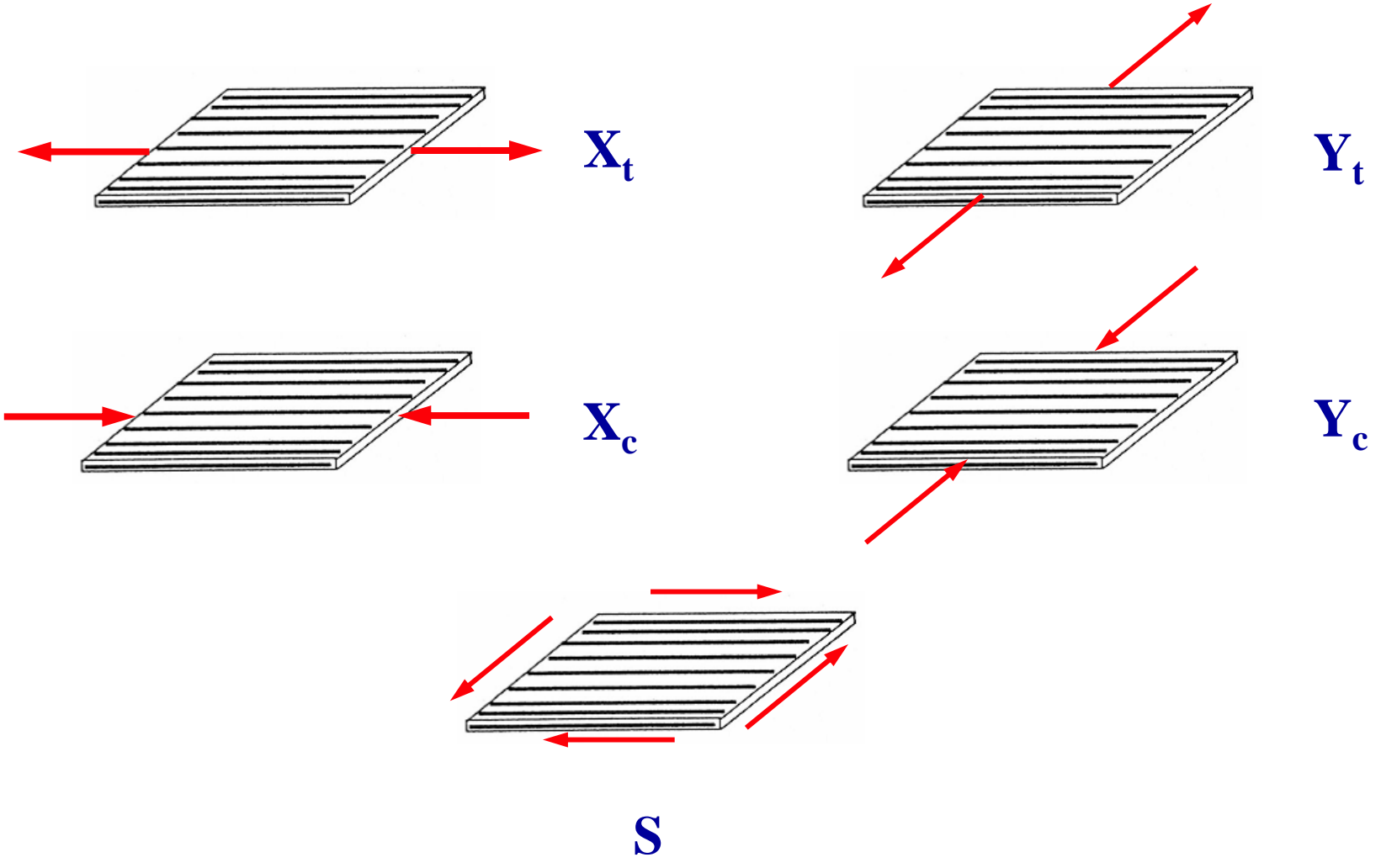
Resistencia mecánica
del refuerzo



Resistencia
mecánica del
material
compuesto



Introducción





Hipótesis:

- Todas las fibras presentan la misma resistencia
- Comportamiento elástico-lineal hasta rotura tanto de la fibra como de la matriz
- Las fibras y la matriz sufren la misma deformación (hipótesis de isodeformación)



Deformaciones de rotura a tracción

Fibra de Vidrio:

$$\varepsilon_f^R = 0,049$$

Fibra de Carbono:

$$\varepsilon_f^R = 0,0094$$

Resina Poliéster:

$$\varepsilon_m^R = 0,014$$

Resina Epoxi:

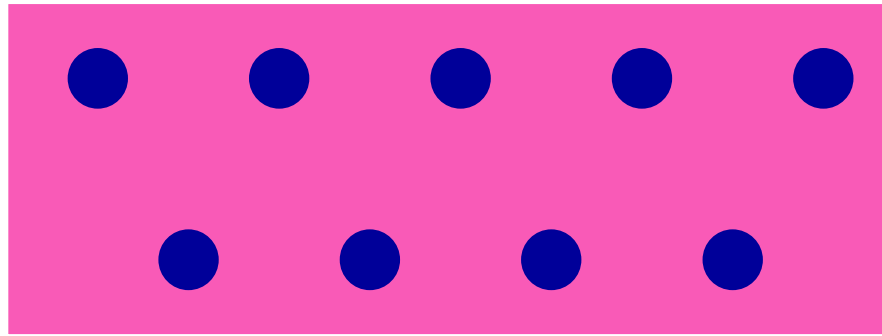
$$\varepsilon_m^R = 0,017$$

$$\varepsilon_f^R \geq \varepsilon_m^R$$

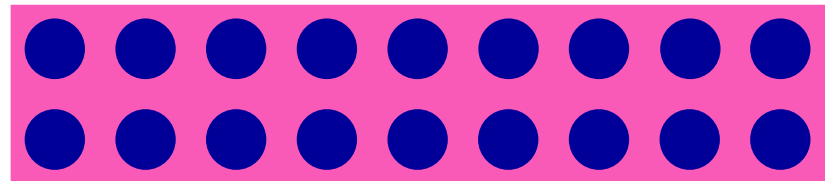
$$\varepsilon_f^R \leq \varepsilon_m^R$$



V_f bajo



V_f alto



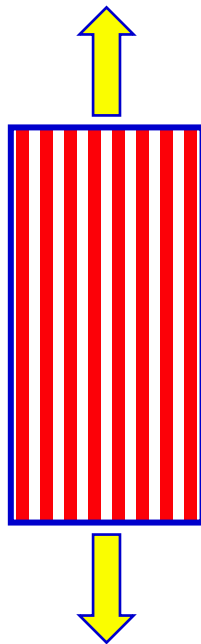


$$X_t$$



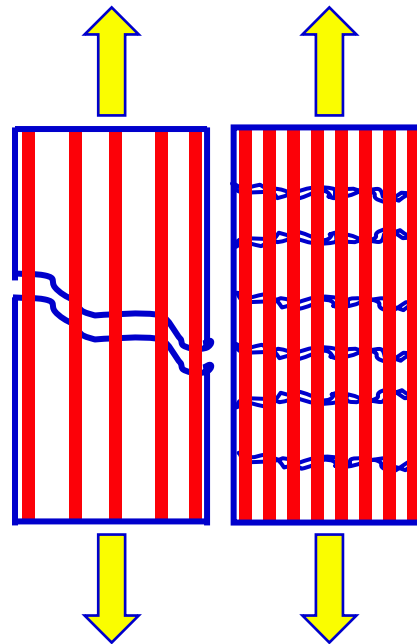
Resistencia Mecánica en tracción en dirección de las fibras

Modos de fallo



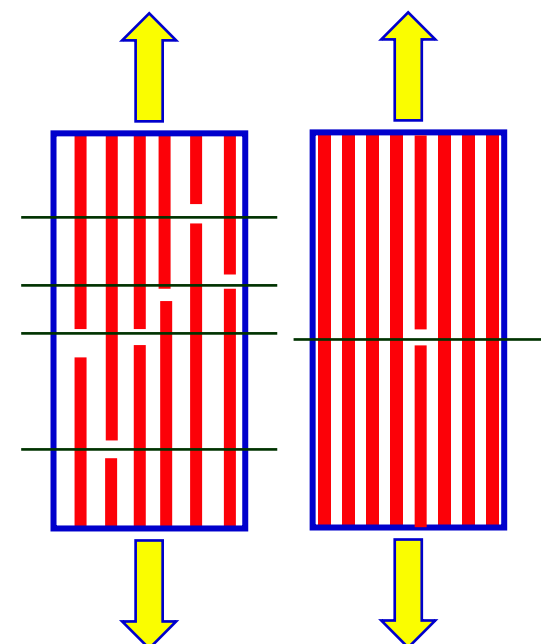
Modelo de Kelly-Davis (1965)

V_f bajos V_f altos



Modo de fallo por rotura de la matriz

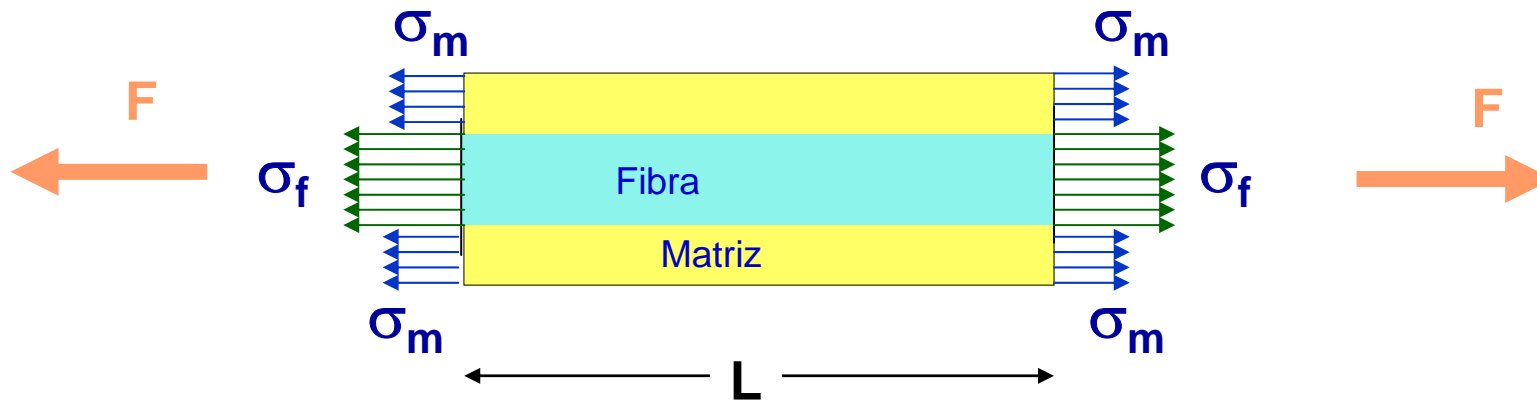
V_f bajos V_f altos



Modo de fallo por rotura de las fibras



Resistencia Mecánica en tracción en dirección de las fibras



$$F = A_f \sigma_f + A_m \sigma_m = \sigma_{MC} A$$

Multiplicando por L :

$$A_f L \sigma_f + A_m L \sigma_m = \sigma_{MC} A L$$

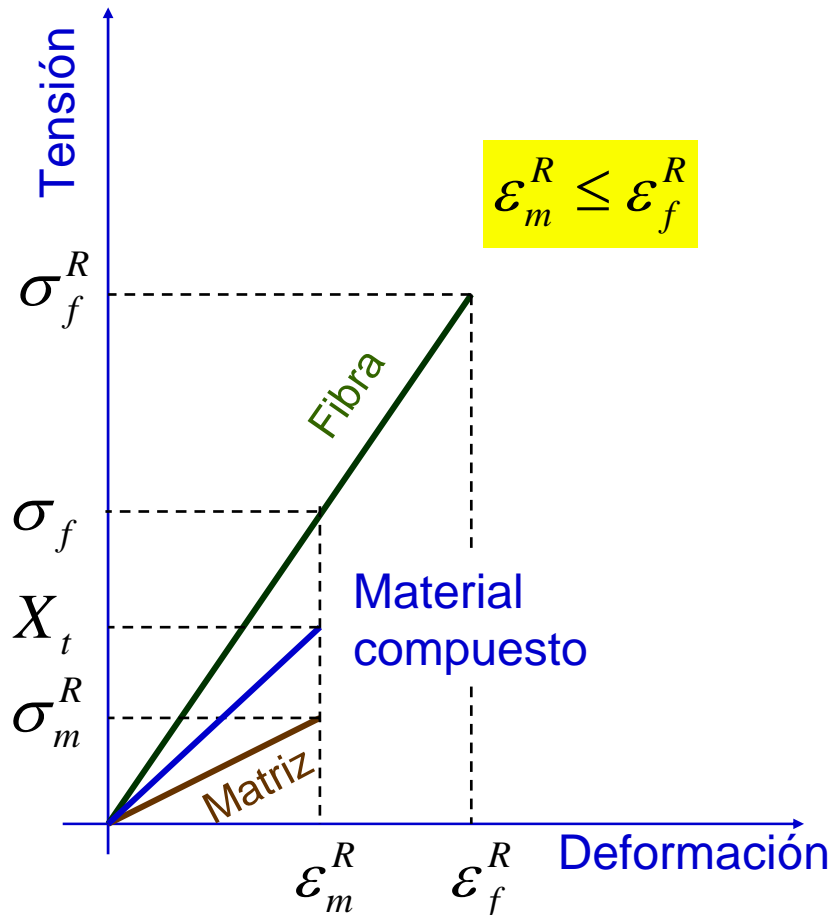
$$\left\{ \begin{array}{l} A_f L = V_f \text{ (Volumen de fibra)} \\ A_m L = V_m \text{ (Volumen de matriz)} \\ A L = V \text{ (Volumen total del material compuesto)} \end{array} \right.$$

$$\sigma_{MC} = V_f \sigma_f + V_m \sigma_m$$



Resistencia Mecánica en tracción en dirección de las fibras

b) La fibra posee una deformación de rotura superior a la de la matriz



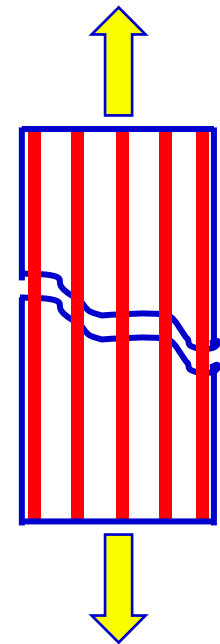
$$\sigma_{MC} = \sigma_f \cdot V_f + \sigma_m \cdot V_m$$

Para V_f bajos:

Al romper la matriz, la carga es absorbida por las fibras, las cuales rompen de inmediato:

$$\begin{aligned} X_t &= \sigma_f V_f + \sigma_m^R \cdot V_m = \\ &= E_f \cdot \epsilon_m^R \cdot V_f + \sigma_m^R \cdot V_m \\ &= \frac{E_f}{E_m} \cdot \sigma_m^R \cdot V_f + \sigma_m^R \cdot V_m \end{aligned}$$

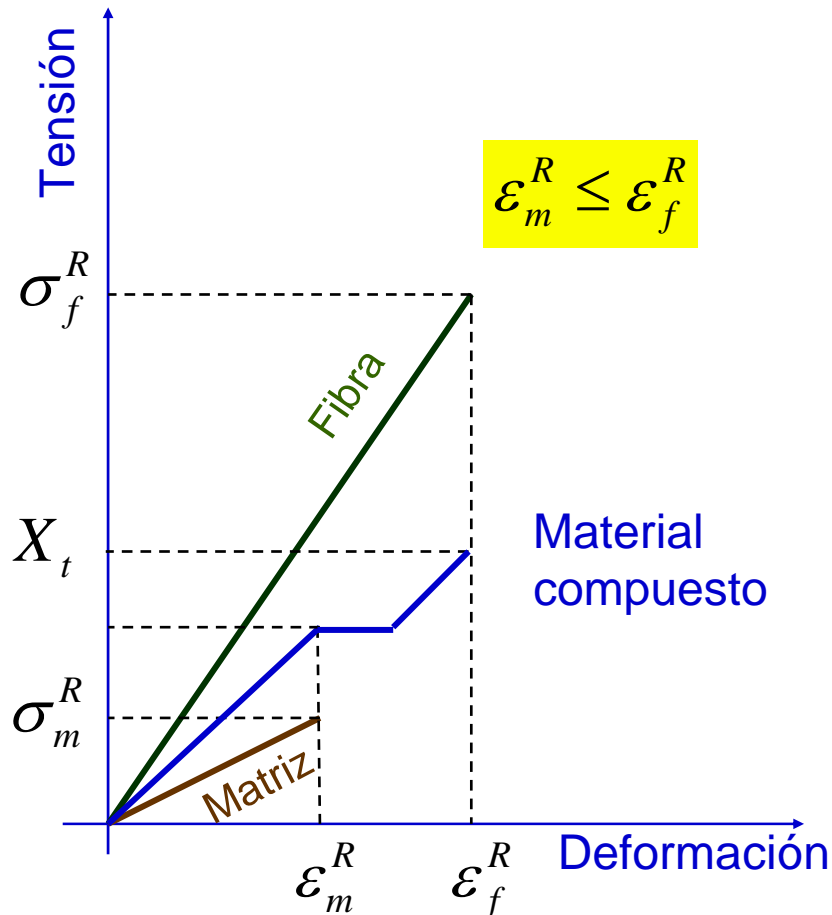
$$X_t = \sigma_m^R \cdot \left[V_f \cdot \frac{E_f}{E_m} + (1 - V_f) \right]$$





Resistencia Mecánica en tracción en dirección de las fibras

b) La fibra posee una deformación de rotura superior a la de la matriz



$$\sigma_{MC} = \sigma_f \cdot V_f + \sigma_m \cdot V_m$$

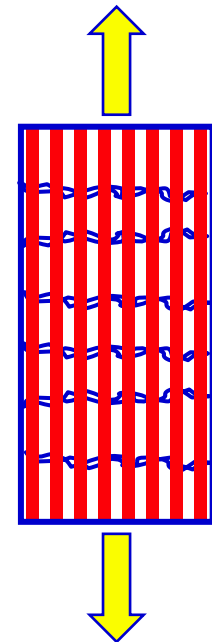
Para V_f altos

Al romper la matriz, las fibras siguen resistiendo hasta que:

$$\sigma_{MC} = \sigma_f \cdot V_f$$



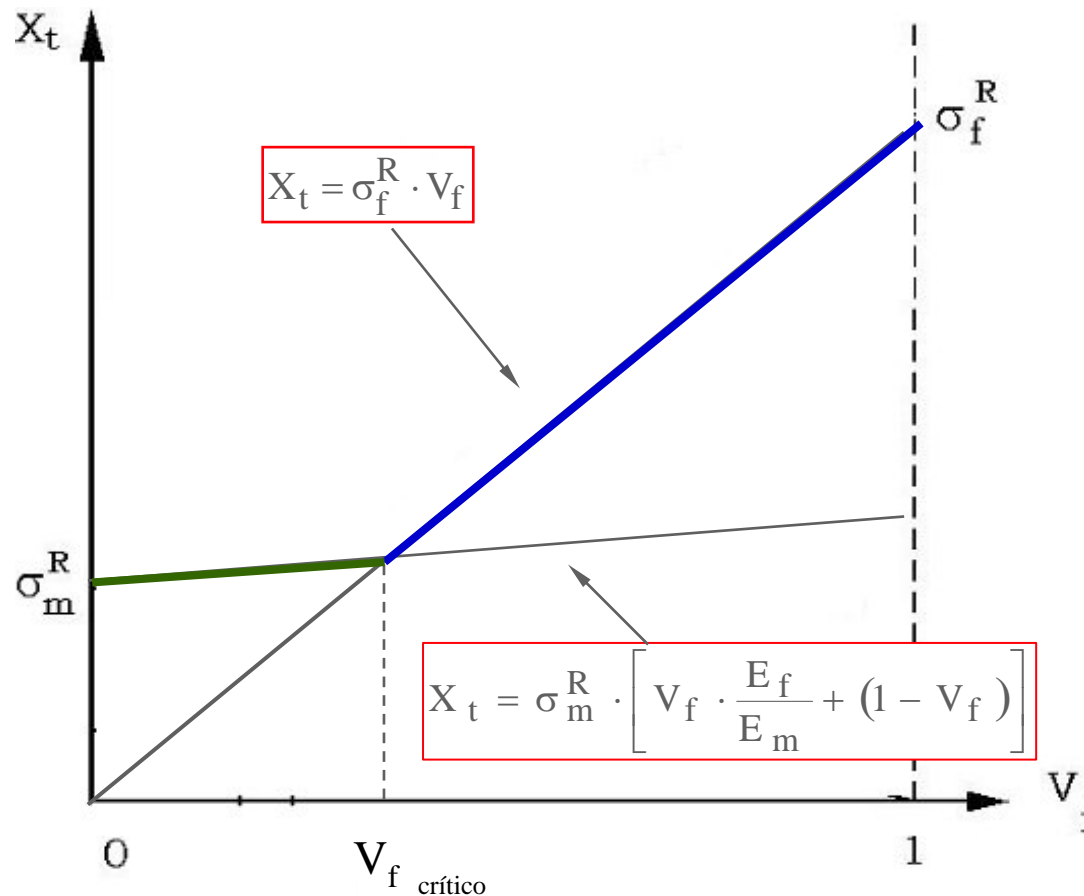
$$X_t = \sigma_f^R \cdot V_f$$





Resistencia Mecánica en tracción en dirección de las fibras

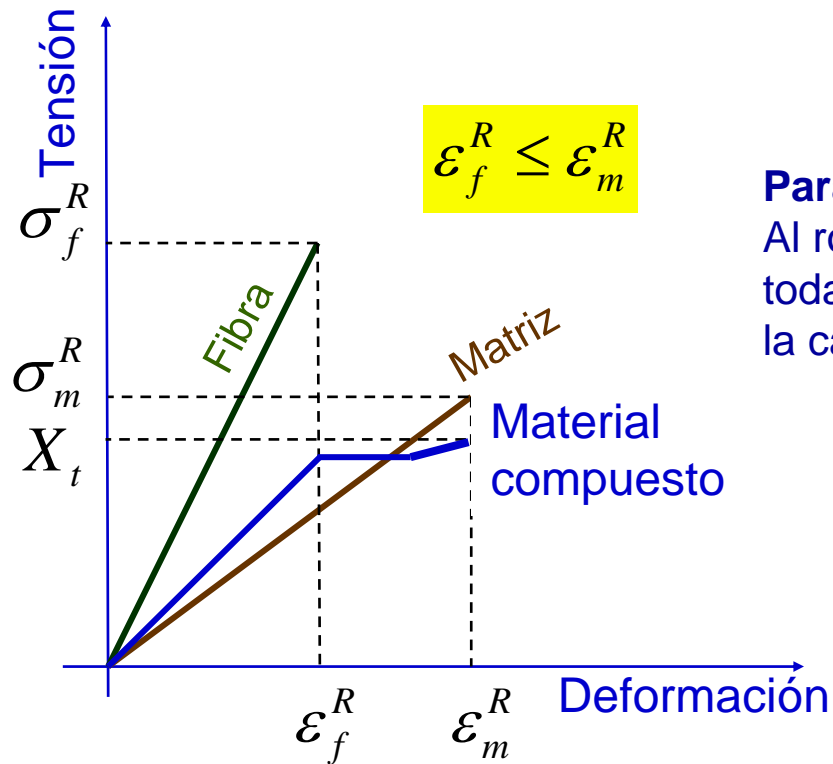
b) La fibra posee una deformación de rotura superior a la de la matriz





Resistencia Mecánica en tracción en dirección de las fibras

a) La fibra posee una deformación de rotura inferior a la de la matriz



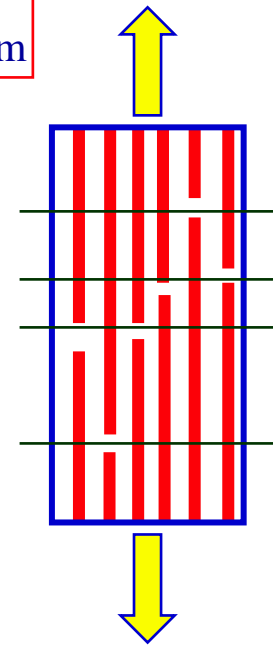
$$\sigma_{MC} = \sigma_f \cdot V_f + \sigma_m \cdot V_m$$

Para V_f bajos

Al romper las fibras, la matriz, todavía, puede seguir soportando la carga exterior:

$$\sigma_{MC} = \sigma_m \cdot V_m$$

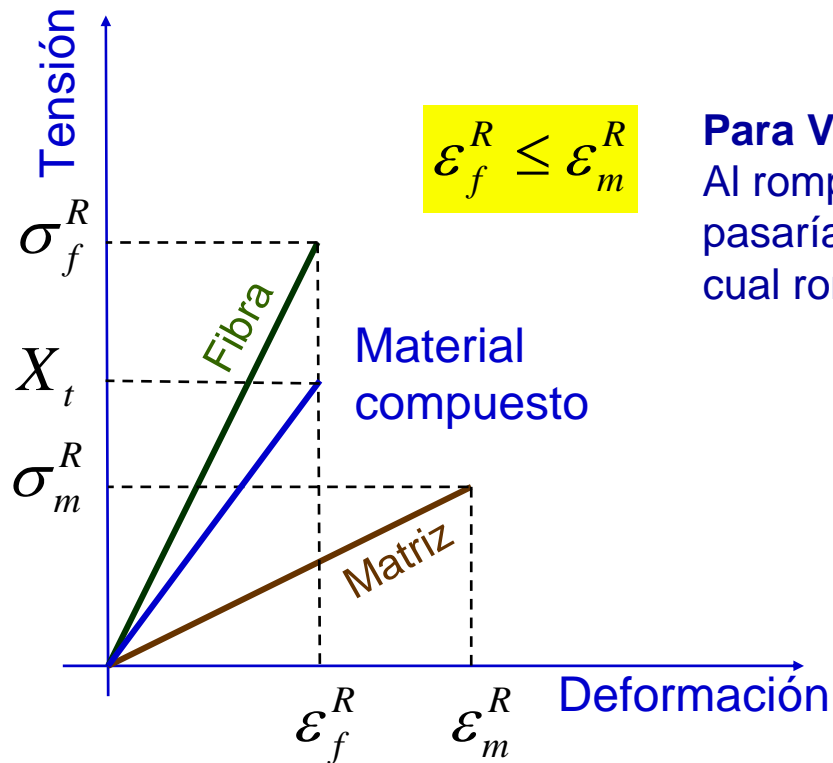
$$X_t = \sigma_m^R \cdot (1 - V_f)$$





Resistencia Mecánica en tracción en dirección de las fibras

a) La fibra posee una deformación de rotura inferior a la de la matriz



$$\epsilon_f^R \leq \epsilon_m^R$$

Para V_f altos

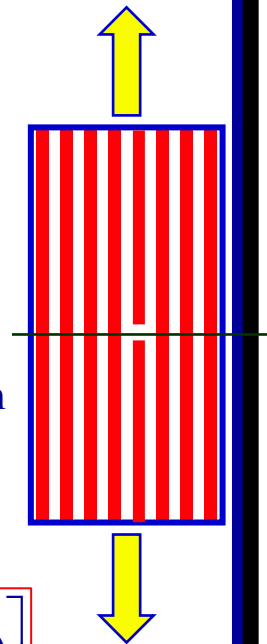
Al romper las fibras, toda la carga exterior pasaría a ser soportada por la matriz, la cual rompería casi de inmediato:

$$\sigma_{MC} = \sigma_f \cdot V_f + \sigma_m \cdot V_m$$

$$\begin{aligned} X_t &= \sigma_f^R \cdot V_f + E_m \cdot \epsilon_f^R \cdot V_m \\ &= \sigma_f^R \cdot V_f + \frac{E_m}{E_f} \cdot \sigma_f^R \cdot V_m \end{aligned}$$

$$X_t = \sigma_f^R \cdot \left[V_f + \frac{E_m}{E_f} \cdot (1 - V_f) \right]$$

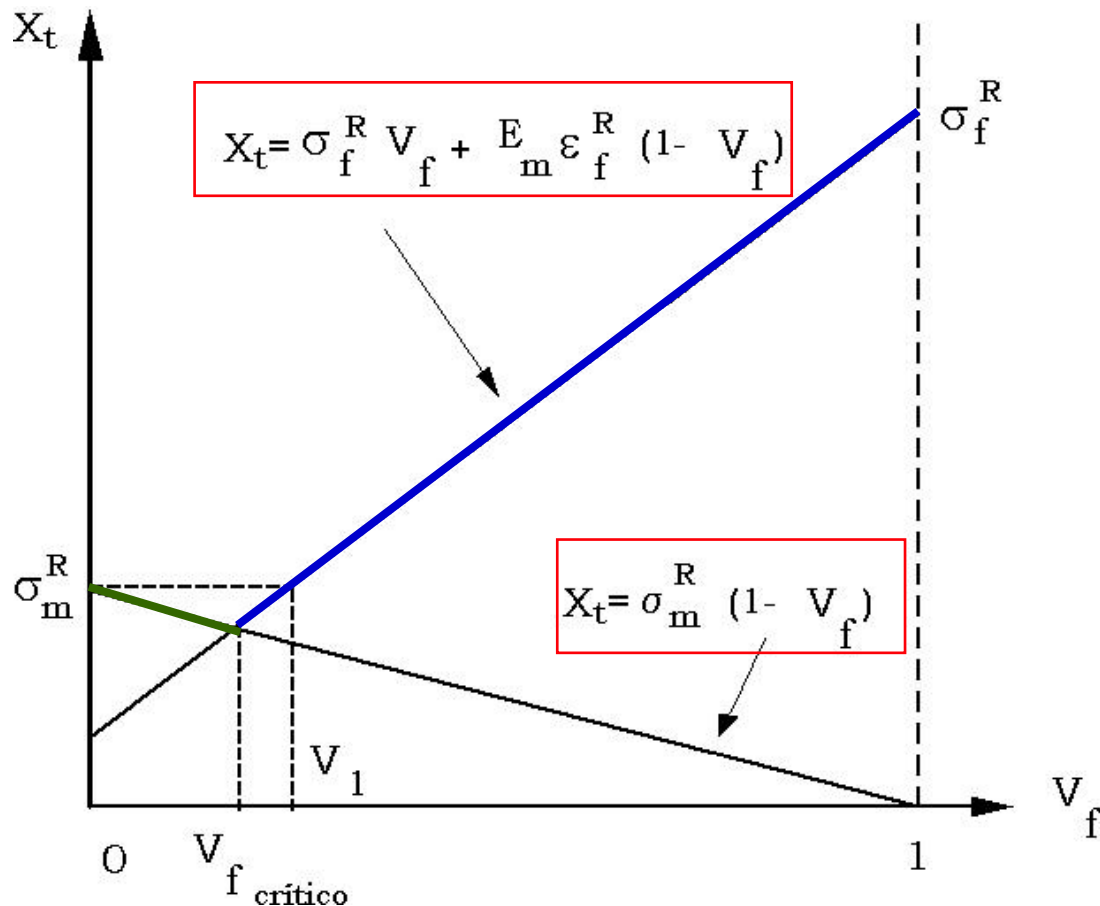
$$\text{Si } E_f \gg E_m : \quad X_t \approx \sigma_f^R \cdot V_f$$





Resistencia Mecánica en tracción en dirección de las fibras

a) La fibra posee una deformación de rotura inferior a la de la matriz



Para un volumen de fibras V_1 , la resistencia a tracción coincide con la de la matriz, aunque existan fibras

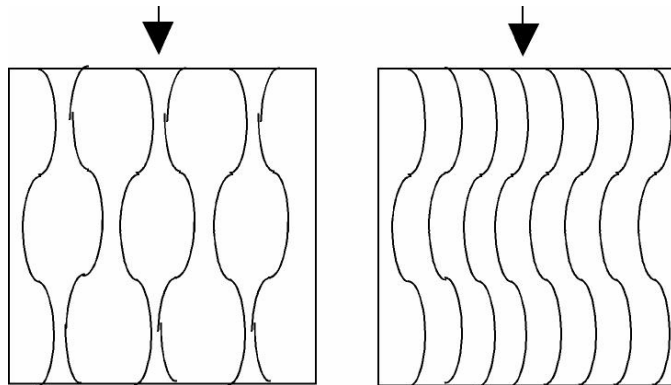


X_c



Resistencia Mecánica en compresión en dirección de las fibras

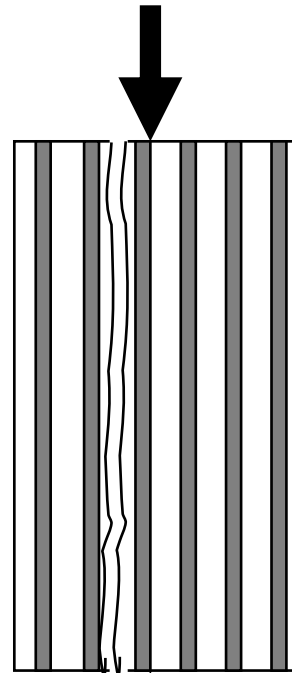
Modos de fallo en compresión en dirección de las fibras



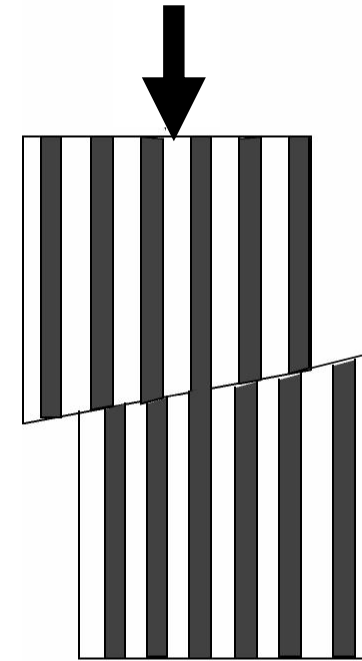
Rotura fuera de fase
(Modo extensional)

Rotura en fase
(Modo de corte)

Micropandeo
de las fibras



Rotura
transversal por
efecto Poisson

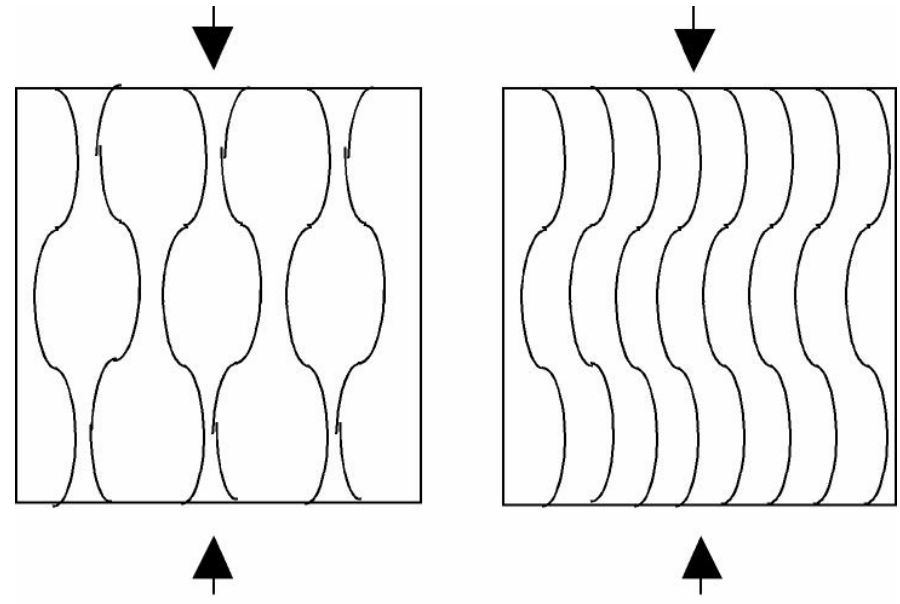


Rotura por
cortadura



Resistencia Mecánica en compresión en dirección de las fibras

Micropandeo de las fibras



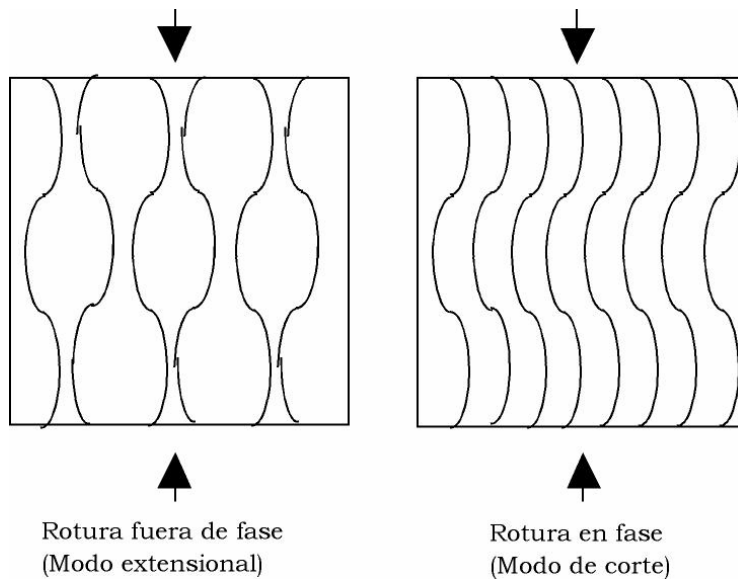
Rotura fuera de fase
(Modo extensional)

Rotura en fase
(Modo de corte)



Resistencia Mecánica en compresión en dirección de las fibras

Micropandeo de las fibras



Cuando el volumen específico de fibras es bajo, predomina el Modo extensional

$$X_c = 2 \cdot V_f \cdot \sqrt{\frac{E_m \cdot E_f \cdot V_f}{3 \cdot (1 - V_f)}}$$

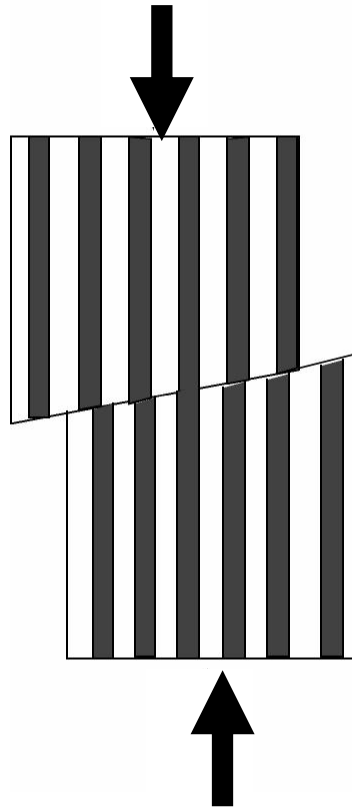
Para valores más altos de V_f , el modo de rotura de corte es el predominante. **(Rosen, 1965)**

$$X_c = \frac{G_m}{1 - V_f}$$



Resistencia Mecánica en compresión en dirección de las fibras

Rotura por cortadura de las fibras



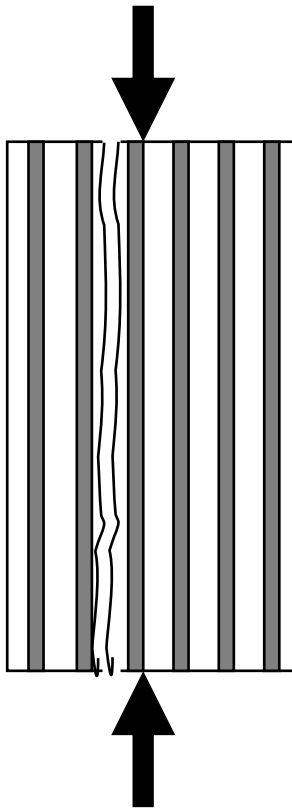
Aparece con cierta frecuencia en láminas con un alto contenido de fibras, y está gobernado por el fallo a cortante de las propias fibras

$$X_c = 2 \cdot S_f \cdot \left[V_f + (1 - V_f) \cdot \frac{E_m}{E_f} \right]$$



Resistencia Mecánica en compresión en dirección de las fibras

Rotura transversal por efecto Poisson



El fallo se produce cuando la deformación transversal a tracción, producida por efecto Poisson, alcanza un valor crítico (Deformación a rotura transversal)

$$X_c = \frac{(E_f \cdot V_f + E_m \cdot V_m) \cdot \left(1 - V_f^{1/3}\right)}{v_f \cdot V_f + v_m \cdot V_m} \cdot \varepsilon_m^R$$

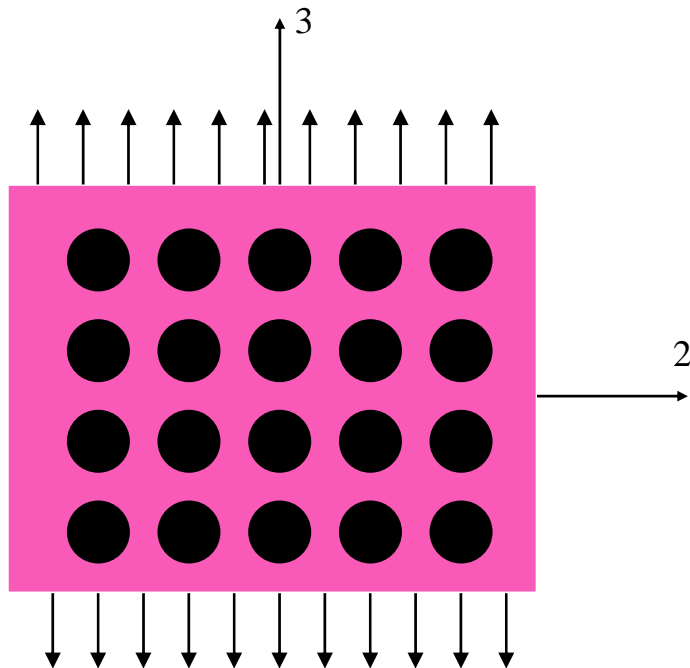


Y_t



Resistencia Mecánica en tracción en dirección transversal

Este modo de sollicitación puede ser el más crítico por la baja resistencia a tracción de la resina.



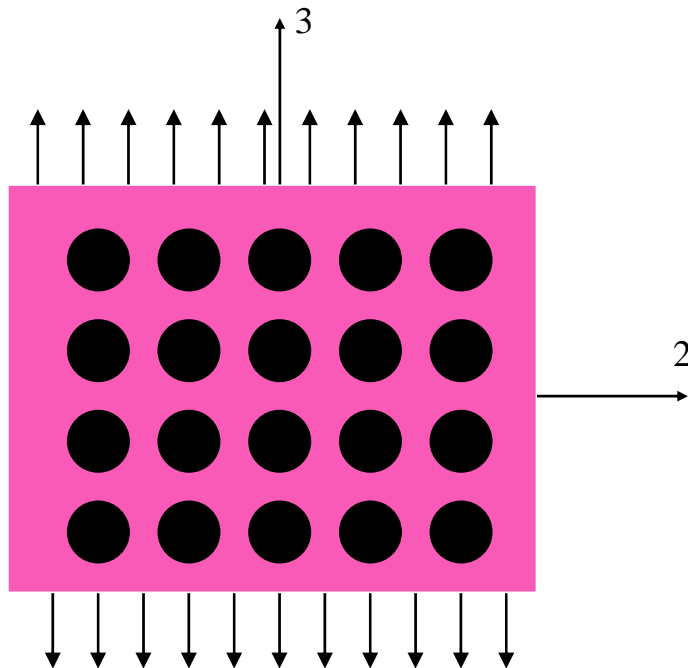
Cuando actúan cargas en el sentido transversal de la lámina, aparece el fenómeno de concentración de tensiones en zonas de la matriz próximas a las fibras (interfase fibra/matriz).



La resistencia mecánica a tracción en dirección transversal es menor que la de la matriz



Resistencia Mecánica en tracción en dirección transversal



Está gobernada por muchos factores:

- Propiedades de las fibras y de la matriz
- La resistencia de la interfase fibra-matriz
- La presencia y distribución de huecos
- Distribución interna de tensiones y deformaciones



Resistencia Mecánica en tracción en dirección transversal

Si la unión en la interfase es débil:
(Para una distribución cuadrada de fibras)

$$Y_t = \sigma_m^R \cdot \left[1 - 2 \cdot \left(\frac{V_f}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \right]$$

Si la unión en la interfase es fuerte:
(Kies, 1962)

$$Y_t = \frac{E_2 \cdot \sigma_m^R}{E_m \cdot F} \quad F = \frac{1}{\frac{2 \cdot r}{R} \cdot \left(\frac{E_m}{E_{f_2}} - 1 \right) + 1}$$



Y_c



Resistencia Mecánica en compresión en dirección transversal

Existen varios mecanismos:

- Fallo por cortadura de la matriz
- Fallo por cortadura de la matriz con despegue fibra-matriz
- Fallo por aplastamiento de las fibras

La rotura se produce por cortadura en un plano paralelo a las fibras en una dirección perpendicular a ellas. El plano forma un ángulo de unos 45° respecto a la dirección de carga.

$$Y_c = E_2 \cdot \left[\frac{2 \cdot r}{R} \cdot \frac{E_m}{E_f} + \left(1 - \frac{2 \cdot r}{R} \right) \right] \cdot \varepsilon_m^R$$

La resistencia mecánica en compresión es menor que en tracción

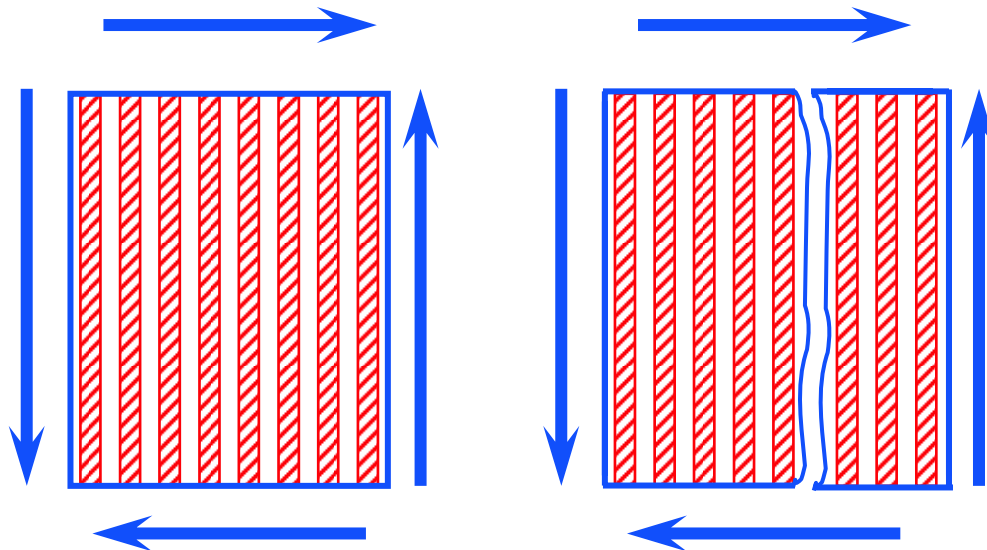


S



Resistencia Mecánica en cortadura plana

En estas condiciones aparece una gran concentración de tensiones a lo largo de la interfase fibra/matriz. Estas tensiones pueden causar el fallo por cortadura de la matriz y/o el despegue fibra-matriz.



Fallo por cortadura
(Kies, 1962)

$$S = \frac{G_{12} \cdot \tau_m^R}{G_m \cdot F}$$

$$F = \frac{1}{\frac{2 \cdot r}{R} \cdot \left(\frac{G_m}{G_f} - 1 \right) + 1}$$



RESUMEN



Valores típicos de las resistencias (MPa)

	<i>UD CFRP</i>	<i>UD GRP</i>	<i>woven GRP</i>	<i>SiC/Al</i>
X_t	2280	1080	367	1462
X_c	1440	620	549	2990
Y_t	57	39	367	86
Y_c	228	128	549	285
S	71	89	97	113

UD CFRP = Unidirectional carbon fiber reinforced plastic (lámina unidireccional reforzada con fibras de carbono)

UD GRP = Unidirectional glass fiber reinforced plastic (lámina unidireccional reforzada con fibras de vidrio)

Woven GRP = Lámina reforzada por tejido de fibra de vidrio

SiC/Al = material compuesto de matriz metálica (Al) reforzado por fibras de carburo de silicio (SiC)