



Universidad  
Carlos III de Madrid  
www.uc3m.es

Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras

Máster en Mecánica Estructural Avanzada

# Mecánica de Materiales Compuestos

Tema 3. Determinación de las propiedades de una lámina

Curso 2010/2011

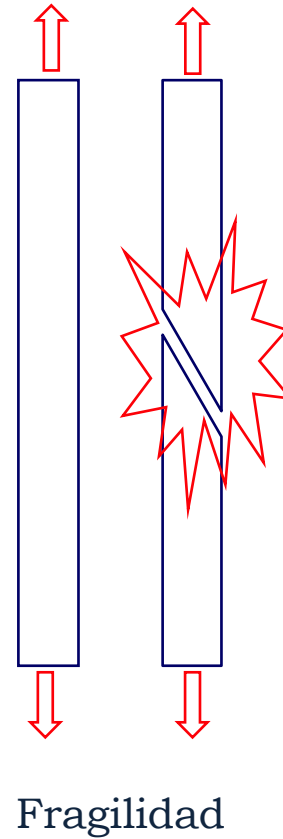
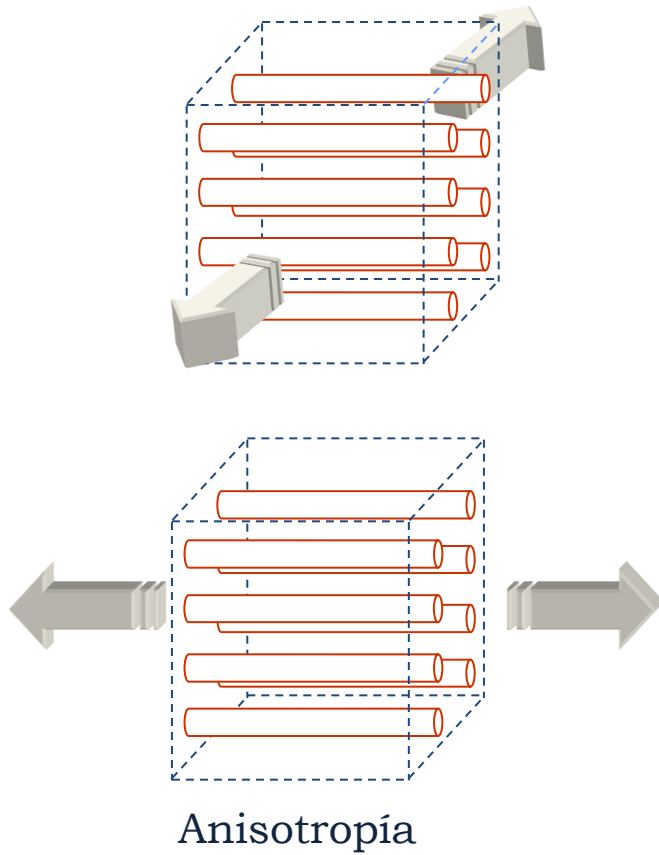


## Tema 3.2. Caracterización Mecánica

### ÍNDICE

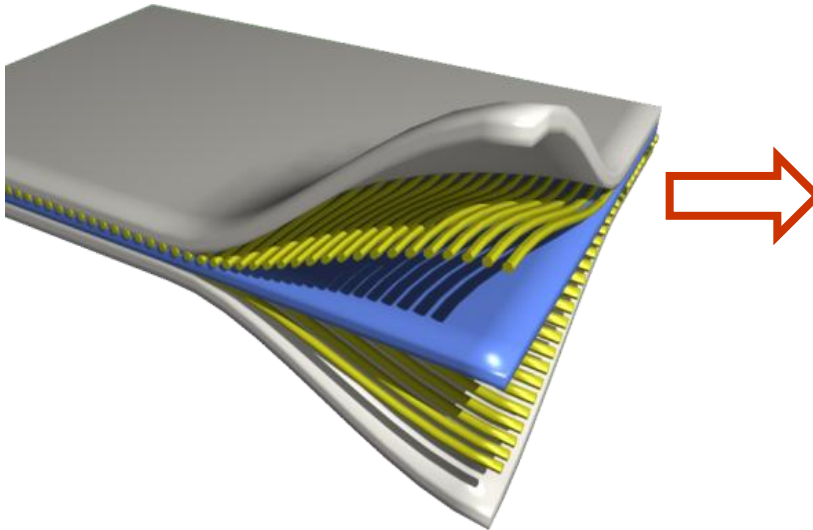
- **Introducción**
- **Ensayos de tracción**
- **Ensayos de compresión**
- **Ensayos de cortadura**
- **Ensayos de flexión**
- **Ensayos de fractura**
- **Otros ensayos**

## Características distintivas de los ensayos sobre materiales compuestos



Fenómenos  
de daño complejos

## Materiales compuestos de tipo laminado



### Propiedades elásticas

$$E_1, E_2, E_3$$

$$G_{12}, G_{13}, G_{23}$$

$$\nu_{12}, \nu_{13}, \nu_{23}$$

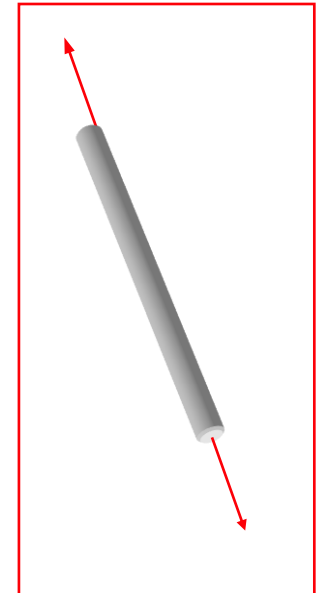
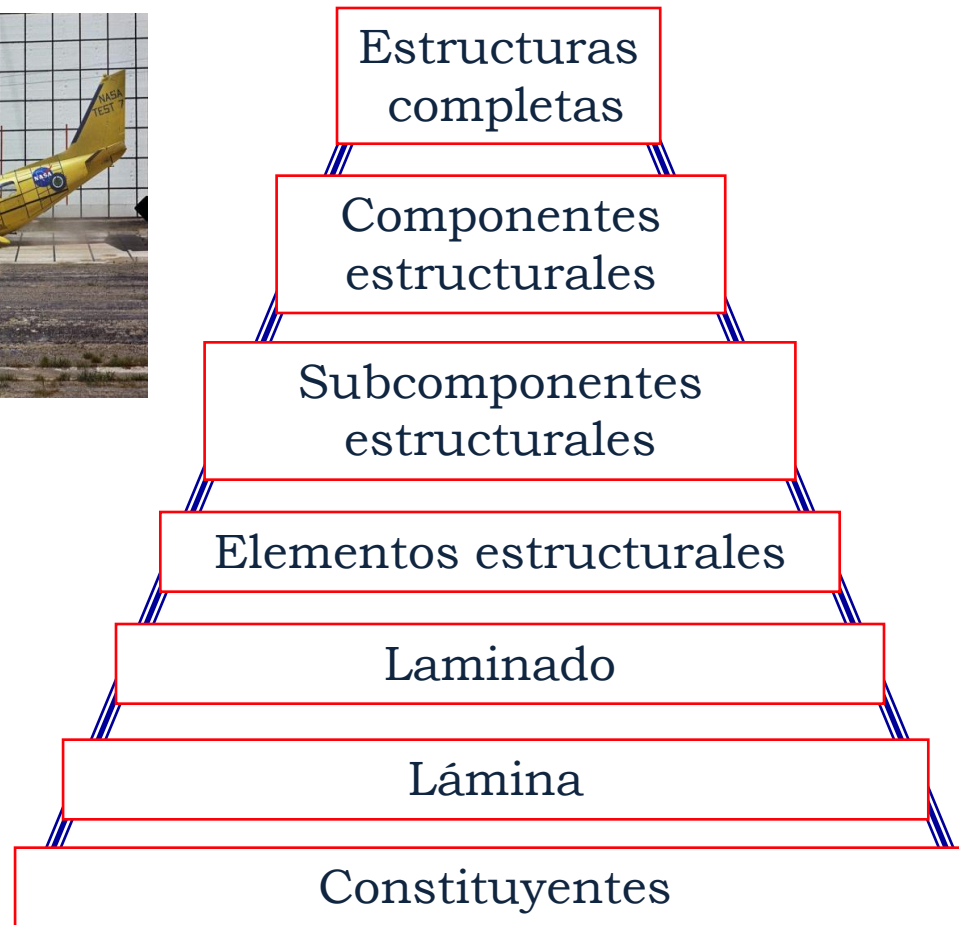
### Propiedades resistentes

$$X, Y, Z$$

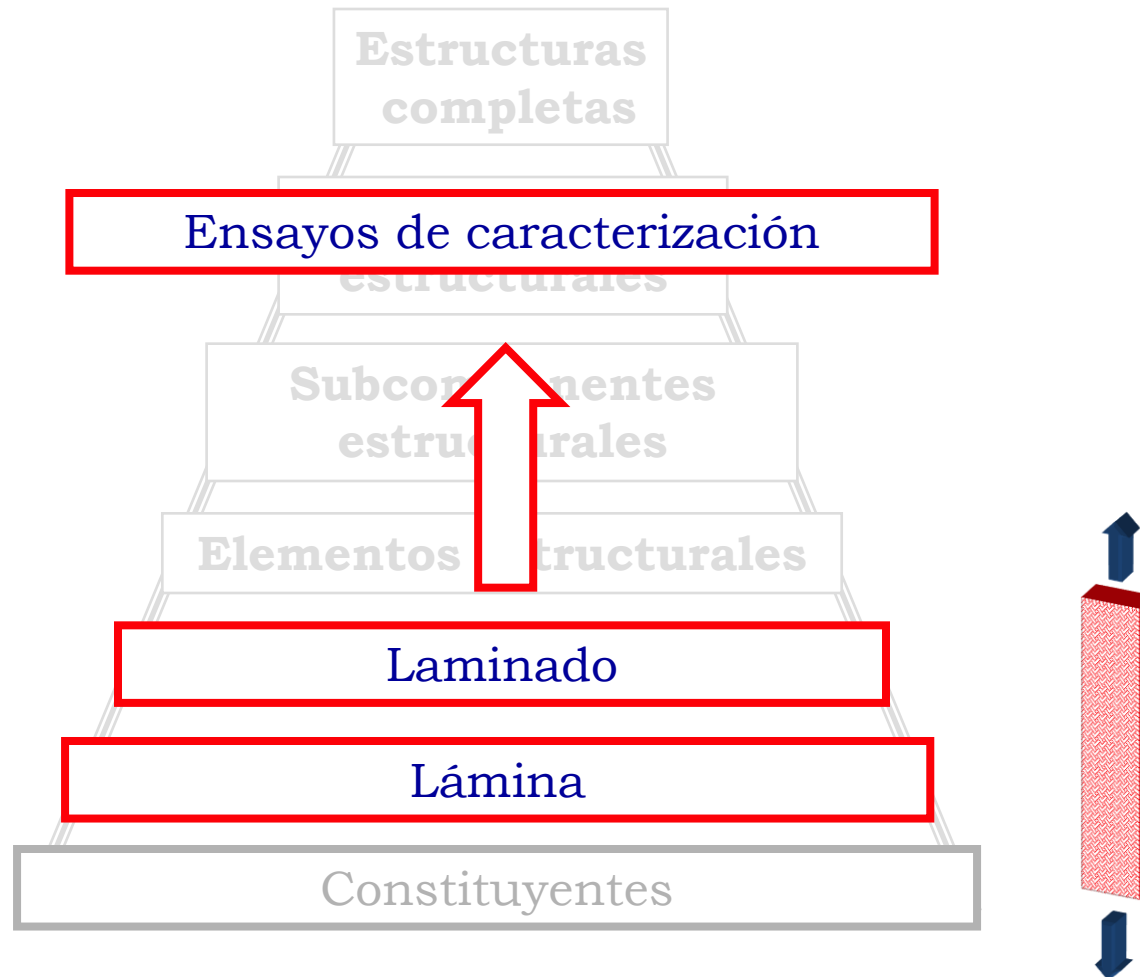
$$X', Y', Z'$$

$$S_{12}, S_{13},$$
$$S_{23}$$

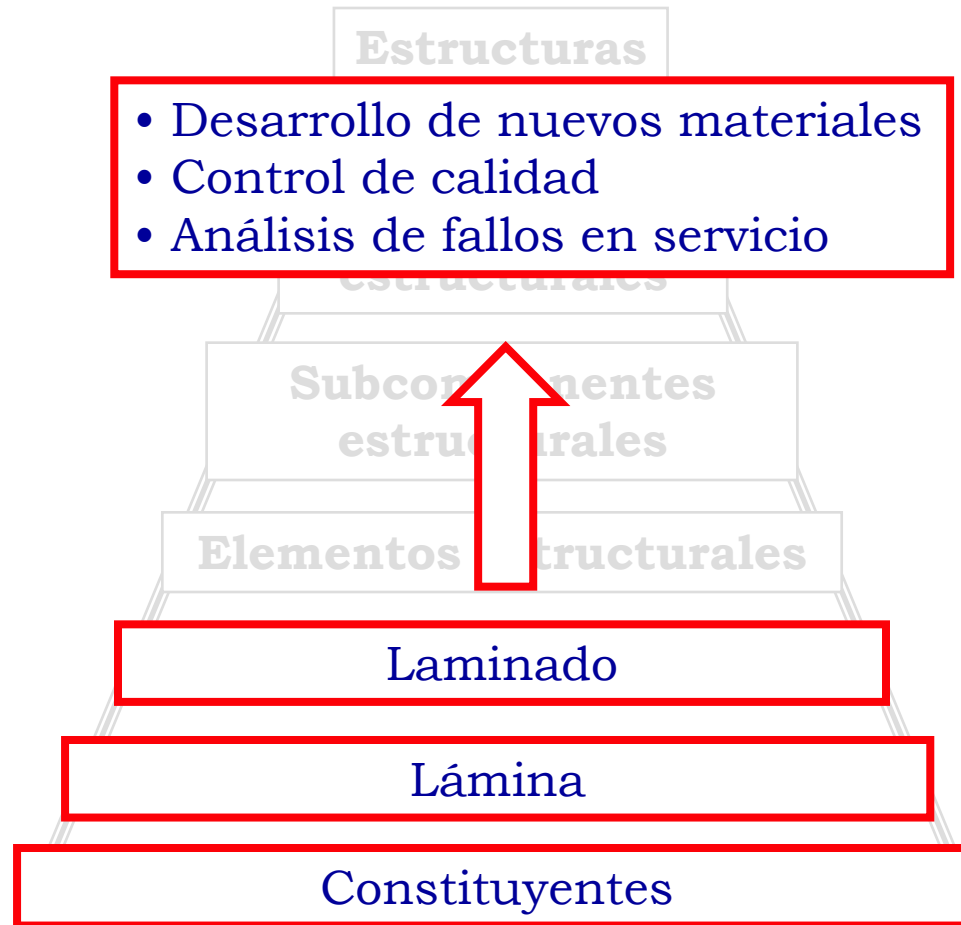
## Niveles de complejidad



## Niveles de complejidad

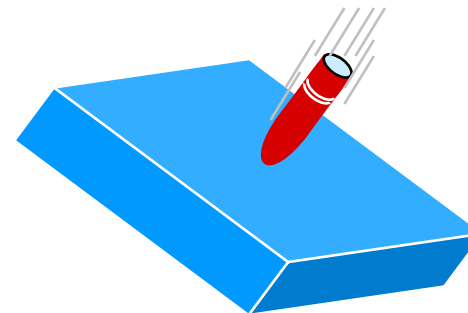
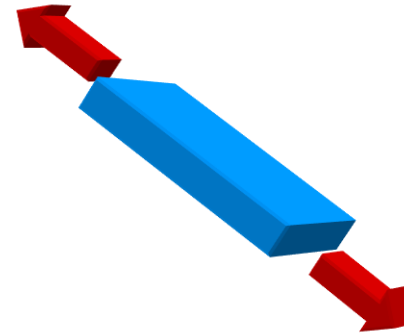


## Importancia de los ensayos



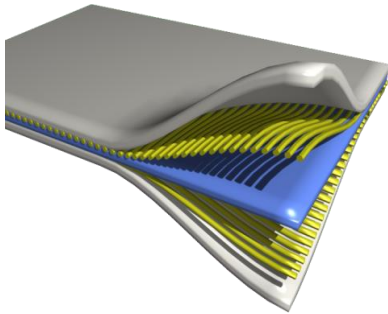
## En función de la velocidad de deformación

- **Ensayos estáticos**  
(  $d\varepsilon/dt < 10^{-1} \text{ s}^{-1}$  )
- **Ensayos a velocidades medias**  
(  $10^{-1} < d\varepsilon/dt < 10^2 \text{ s}^{-1}$  )
- **Ensayos a altas velocidades**  
(  $10^2 < d\varepsilon/dt < 10^4 \text{ s}^{-1}$  )
- **Ensayos a muy altas velocidades**  
(  $10^4 < d\varepsilon/dt$  ) **C**





## En función del modo de carga



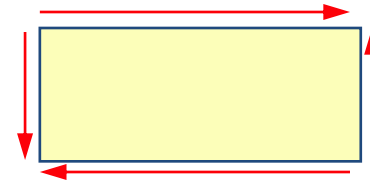
Tracción



Compresión



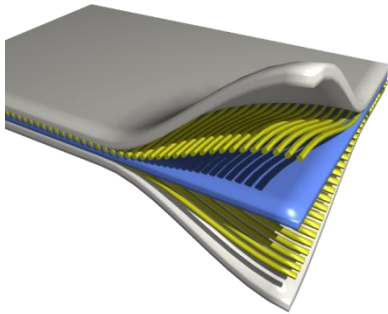
Cortadura plana



Cortadura interlaminar



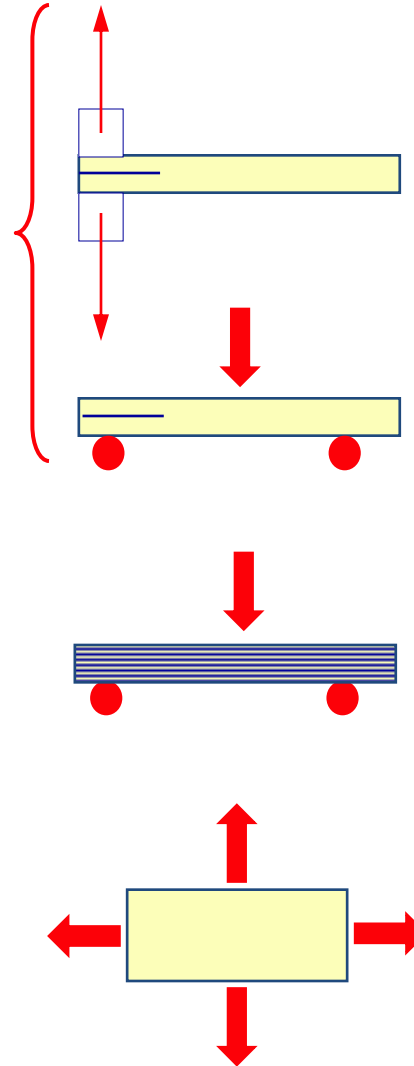
## En función del modo de carga



Ensayos de fractura

Flexión

Ensayos multiaxiales



## Ensayos de Caracterización

Ensayo de tracción

- Plana
- Interlaminar

Ensayo de compresión

Ensayo de cortadura plana

- Ensayo de torsión
- Ensayo de Iosipescu
- Ensayo de Carriles
- Ensayo sobre laminado  $\pm 45$
- Ensayo sobre laminado 10

Ensayo de cortadura interlaminar

- Ensayo de flexión

Propiedades elásticas

$E_1, E_2, E_3$

$G_{12}, G_{13}, G_{23}$

$\nu_{12}, \nu_{13}, \nu_{23}$

Propiedades resistentes

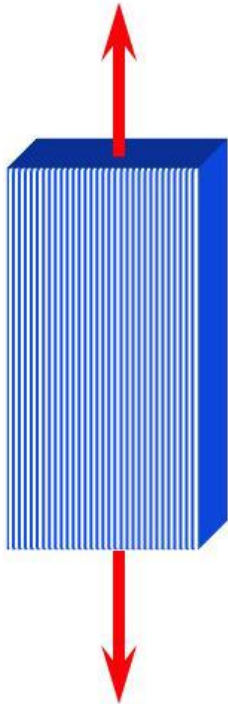
$X, Y, Z$

$X', Y', Z'$

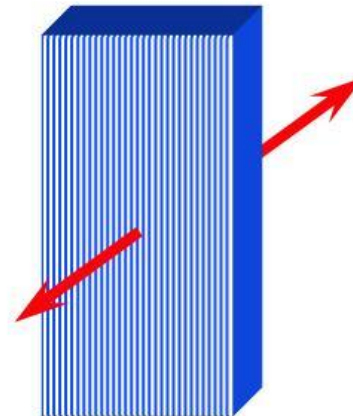
$S_{12}, S_{13},$   
 $S_{23}$



## Tipo de ensayos de tracción



Ensayo de tracción en el plano



Ensayo de tracción interlaminar

## Propiedades que se miden

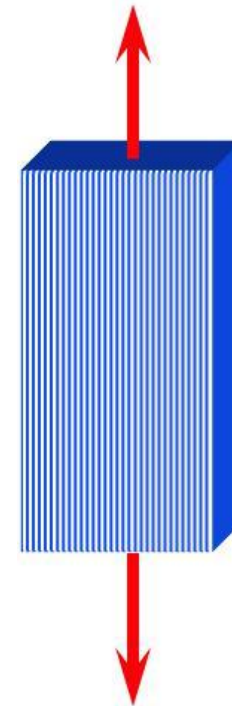
$E_1$  = módulo de elasticidad en dirección de las fibras

$E_2$  = módulo de elasticidad en dirección transversal a las fibras

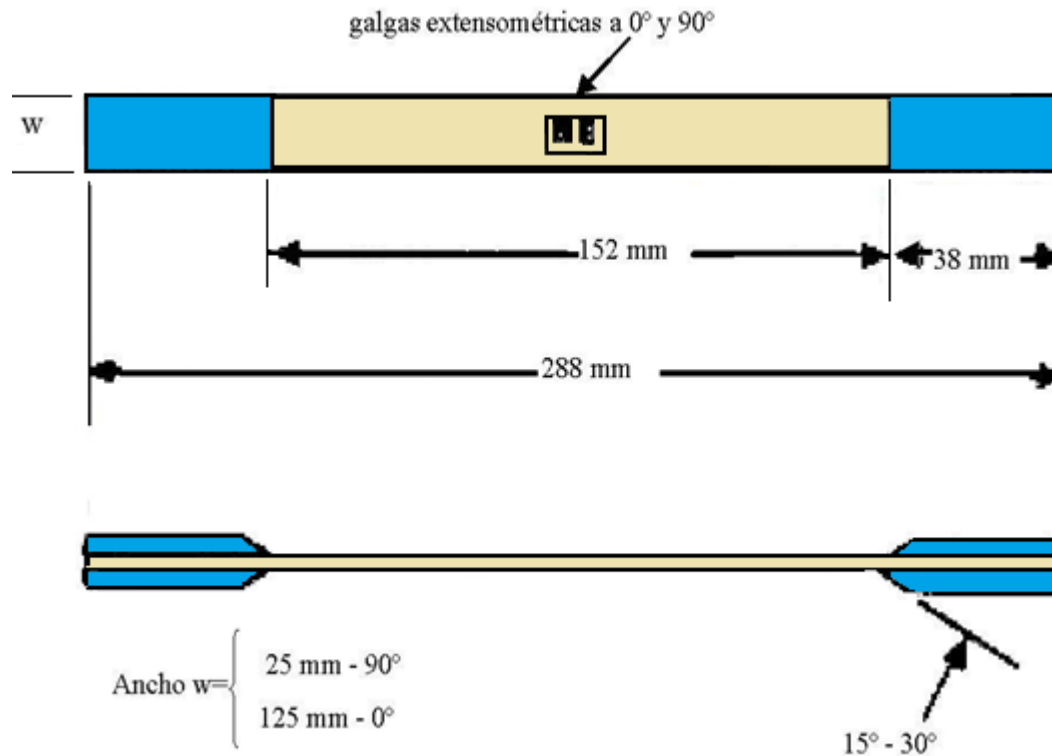
$\nu_{21}$  y  $\nu_{12}$  = coeficientes de Poisson principal y secundario en el plano de la lámina.

$X$ ,  $Y$  = resistencia mecánica longitudinal y transversal

$X_\varepsilon$ ,  $Y_\varepsilon$  = deformación última longitudinal y transversal



## Geometría de las probetas



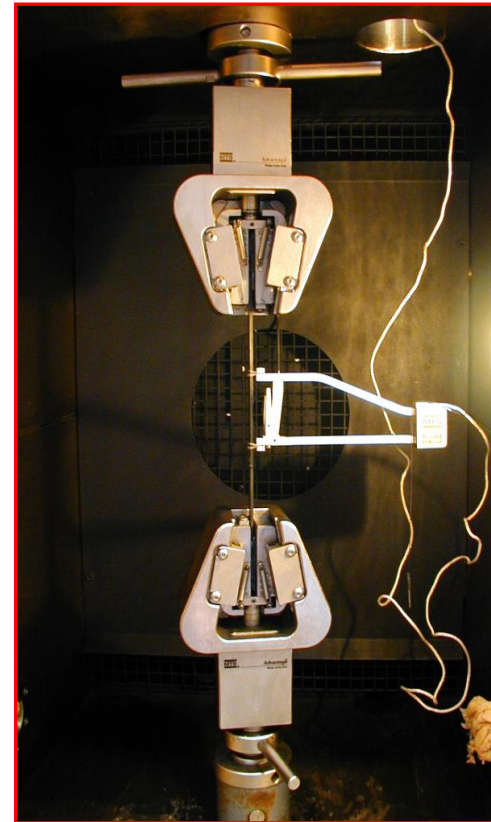
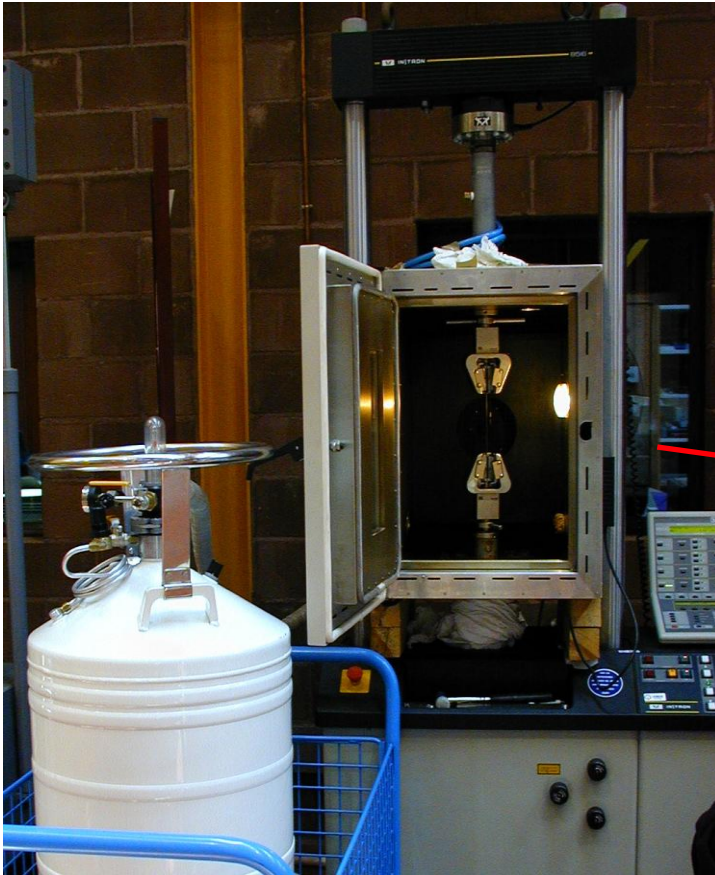
ASTM D3039 “Standard test method for tensile properties of polymer matrix composites”



## Recomendaciones

- El acabado de la probeta es muy importante
- El alineamiento de la probeta es crucial
- Se puede producir daño durante el mecanizado o el amarre
- Los laminados unidireccionales poseen una baja resistencia a cortadura

## Instalación experimental



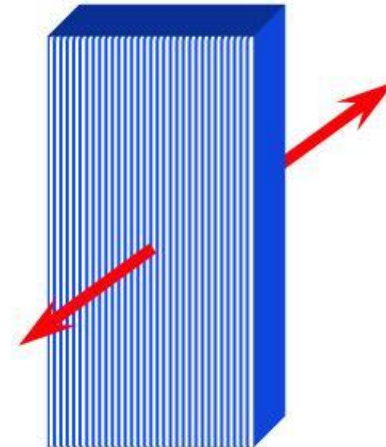


## Propiedades que se miden

$E_3^t$  =módulo de elasticidad en dirección perpendicular al plano del laminado

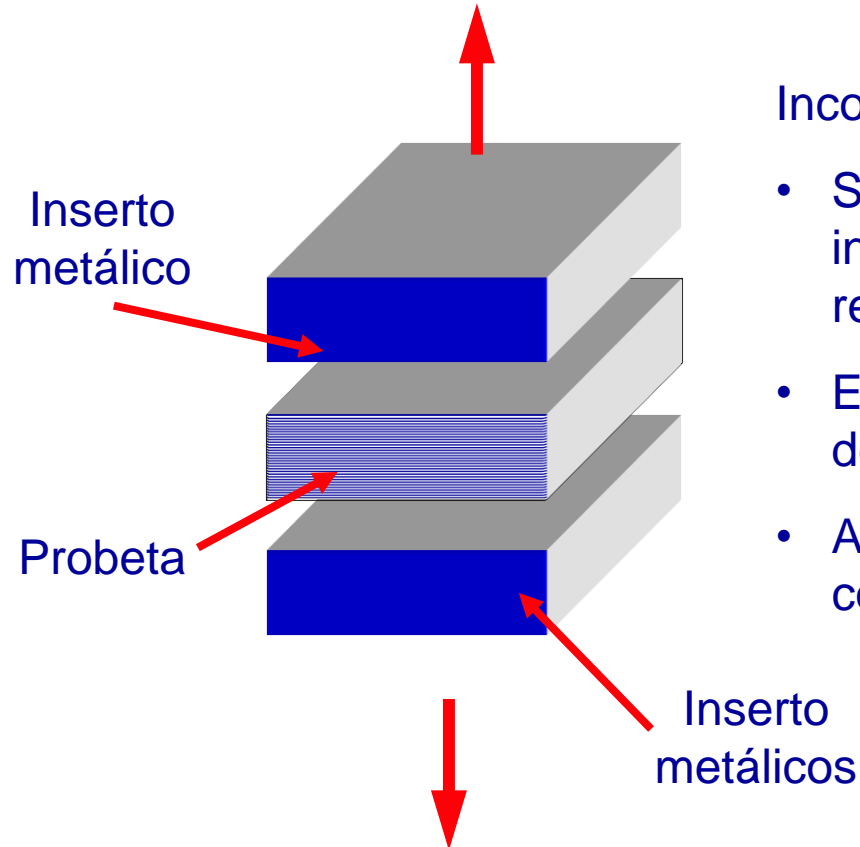
$\nu_{31}^t$  = coeficiente de Poisson en el plano de las fibras y del espesor (plano 1-3)

$F_z^t$  =carga máxima en tracción en la dirección perpendicular al plano del laminado



**No existe normativa específica**

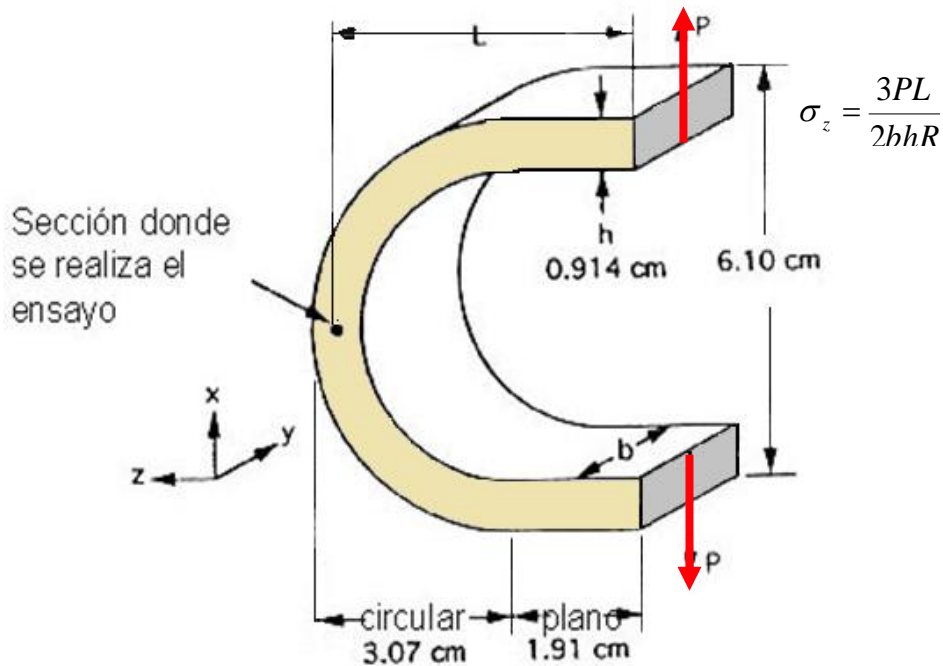
## Ensayo de tracción directa



### Inconvenientes

- Sólo es válido si la resistencia interlaminar es inferior a la resistencia del adhesivo
- Es muy sensible a la preparación de la probeta
- Aparecen fenómenos de concentración de tensiones

## Ensayo de tracción indirecta



Probeta semicircular

(radio  $R$ , ancho  $b$  y espesor  $h$ ):

$$\sigma_z = \frac{3 \cdot P \cdot L}{2 \cdot b \cdot h \cdot R}$$

$L$  distancia entre la línea de carga y la zona de ensayo.



## Propiedades que se miden

$E_1^c$  = módulo de elasticidad en dirección de las fibras a compresión

$E_2^c$  = módulo de elasticidad en dirección transversal a las fibras  
a compresión

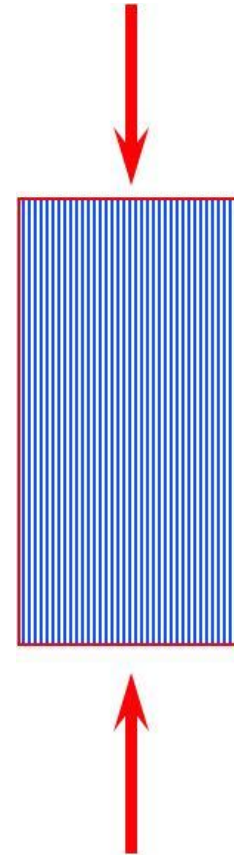
$\nu_{21}^c$  y  $\nu_{12}^c$  = coeficientes de Poisson principal y secundario  
en el plano de la lámina

$X'$  ,  $Y'$  = resistencia mecánica longitudinal y transversal a compresión

$X'_\epsilon$  ,  $Y'_\epsilon$  = deformación última longitudinal y transversal a compresión

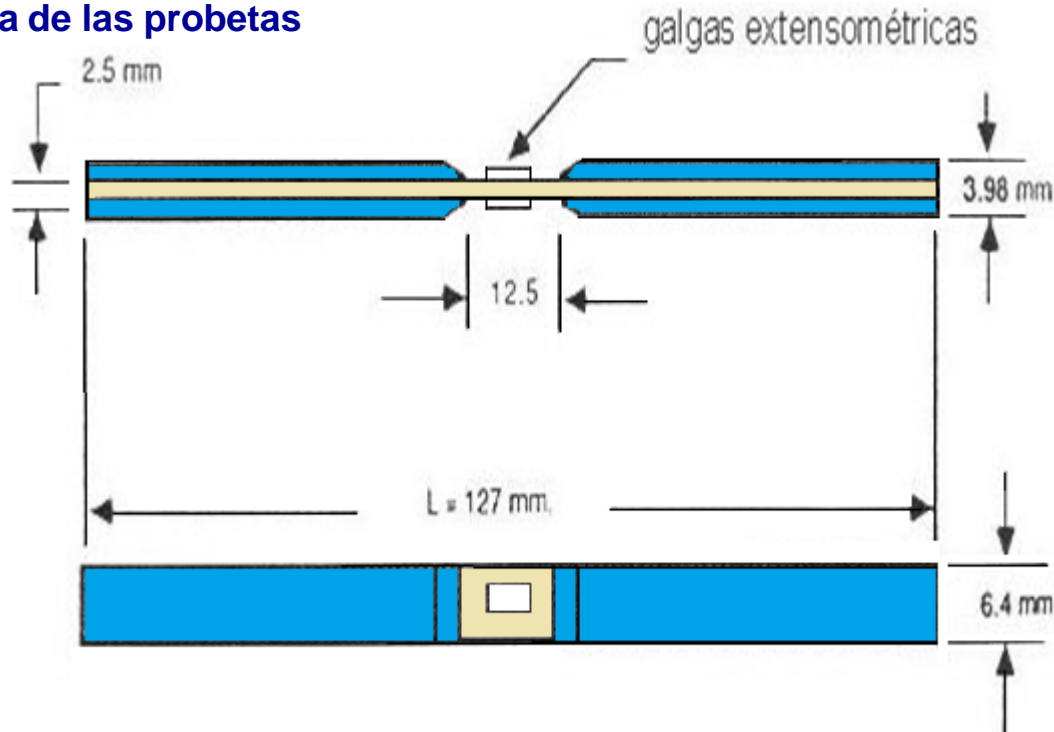
## Tipos de ensayo de compresión

- Ensayo Celanese
- Ensayo IITRI
- Ensayo de compresión sobre sándwich
- Ensayo de flexión sobre sándwich



## Ensayo Celanese

### Geometría de las probetas

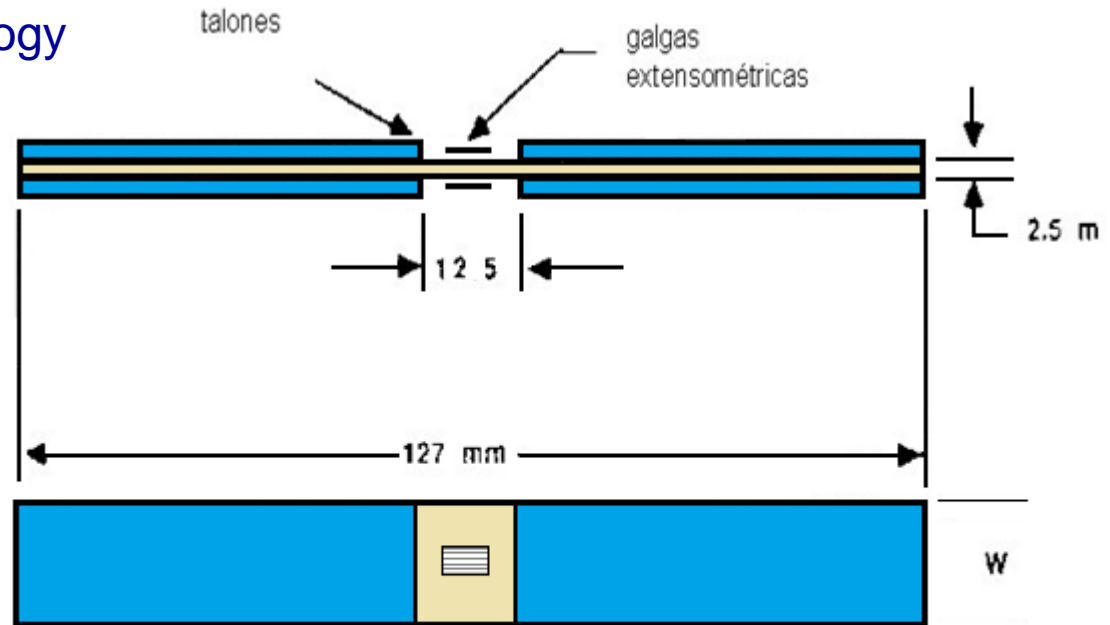


Norma ASTM D3410 "Compressive properties of polymer matrix composite materials with unsupported gage section by shear loading" Part A

## Ensayo IITRI

Illinois Institute Technology  
Research Institute

Geometría de las probetas



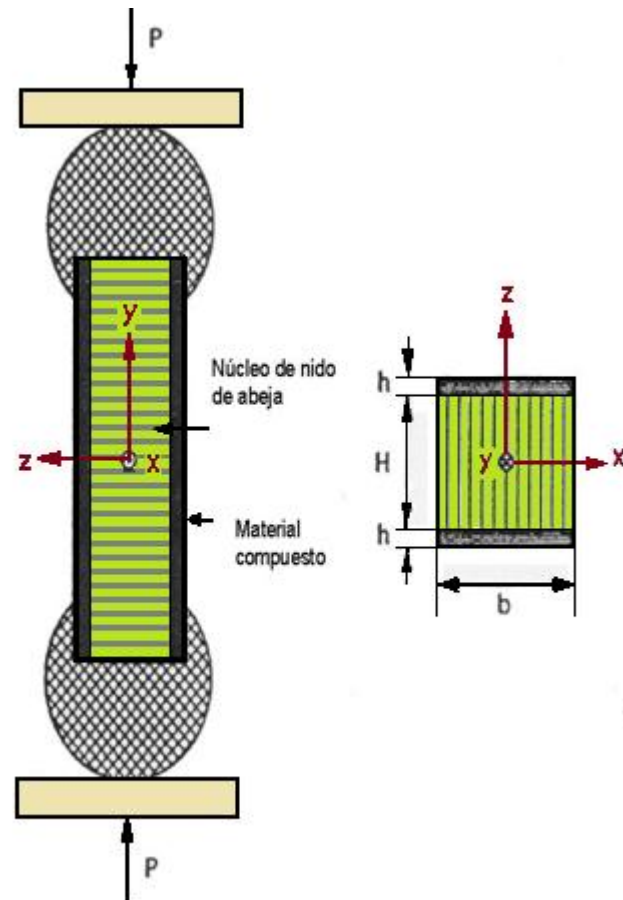
$W = 12.5 \text{ mm. ( } 90^\circ \text{ probeta )}$

$W = 6.4 \text{ mm. ( } 0^\circ \text{ probeta )}$

Norma ASTM D3410 "Compressive properties of polymer matrix composite materials with unsupported gage section by shear loading" Part B

## Ensayo de compresión sobre probetas sándwich

ASTM D5467 “Compressive properties of unidirectional polymer matrix composites using a sandwich beam”

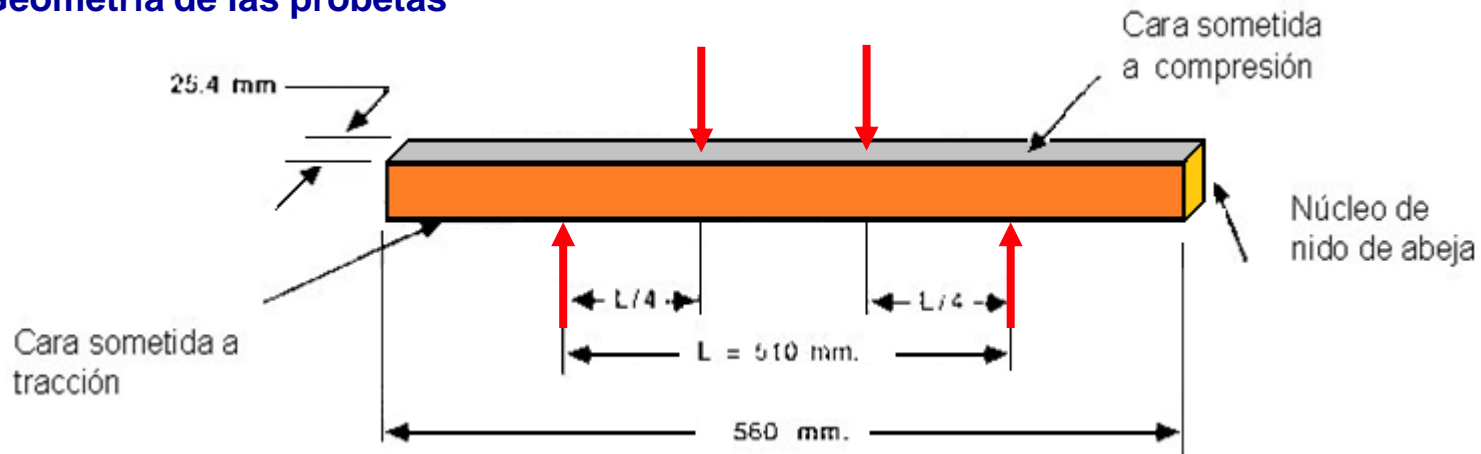




## Ensayo de flexión sobre probetas sándwich

ASTM D5467. Compressive properties of unidirectional polymer composites using a sandwich beam.

### Geometría de las probetas



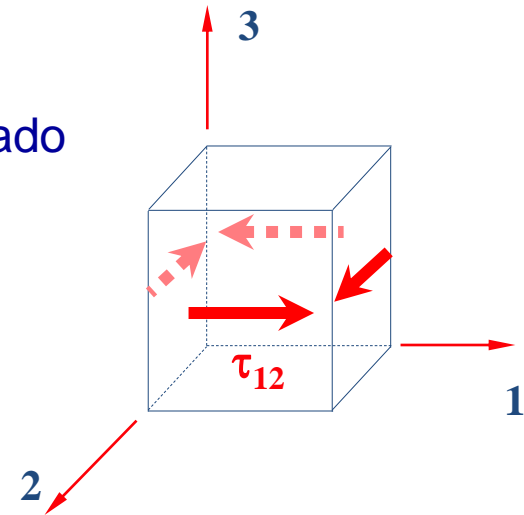
$$\sigma = \frac{P \cdot L}{8 \cdot B \cdot e_p \cdot (e_p + e_n)} \Rightarrow E_x = \frac{P \cdot L}{8 \cdot B \cdot e_p \cdot \varepsilon_x \cdot (e_p + e_n)}$$

## Propiedades que se miden

$G_{12}$  = módulo de cortadura en el plano del laminado

$S$  = resistencia máxima a cortadura

$S_{\varepsilon}$  = deformación última a cortadura

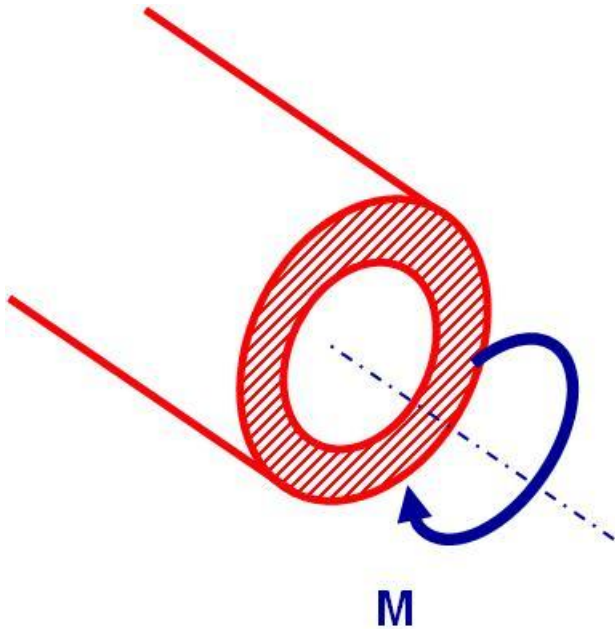




## Tipos de ensayos de cortadura plana

- Ensayo de torsión
- Ensayo de cortadura directa
  - Ensayo de flexión sobre probeta entallada
  - Ensayo de carriles
- Ensayo de cortadura indirecta
  - Ensayo de tracción sobre laminado [ $\pm 45^\circ$ ]n
  - Ensayo de tracción sobre laminado [ $10^\circ$ ]n

## Ensayo de torsión



$$(\tau_{12})_{\max} = \frac{2 \cdot M \cdot r_o}{\pi \cdot (r_o^4 - r_i^4)}$$

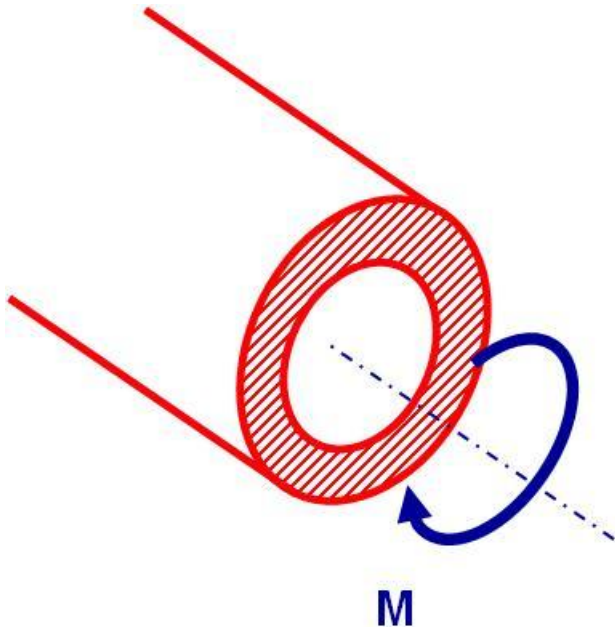
$$(\gamma_{12})_{\max} = (\varepsilon_x)_{45^\circ} - (\varepsilon_x)_{-45^\circ} = 2 \cdot (\varepsilon_x)_{45^\circ}$$

$r_i$  = radio interior

$r_o$  = radio exterior

M = Momento torsor aplicado

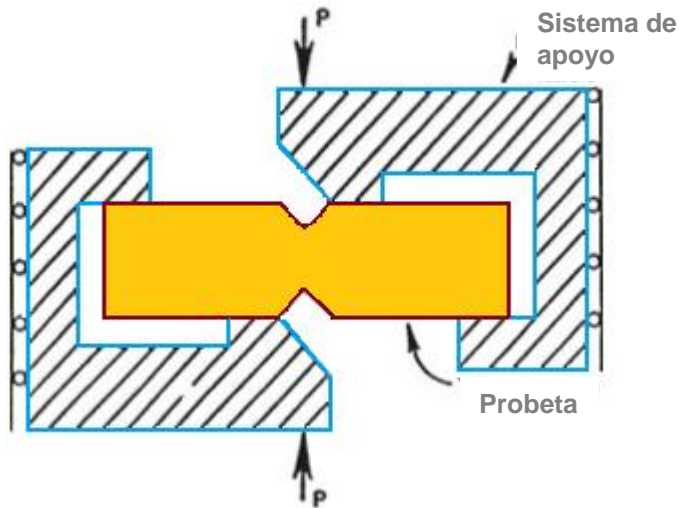
## Ensayo de torsión



Inconvenientes:

- Compleja fabricación de la probeta
- Ensayo no representativo en algunos casos
- Sistema de amarre de la probeta complicado
- Necesidad de un perfecto alineamiento de la probeta

## Ensayo de flexión sobre probeta con doble entalla



Se genera un estado de cortadura pura aplicando un par de fuerzas sobre una probeta con una doble entalla

ASTM D5379 "Test method for shear properties of composite materials by the V-notched beam method"

## Ensayo de flexión sobre probeta con doble entalla

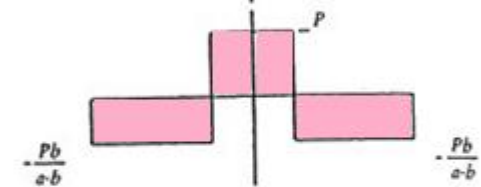
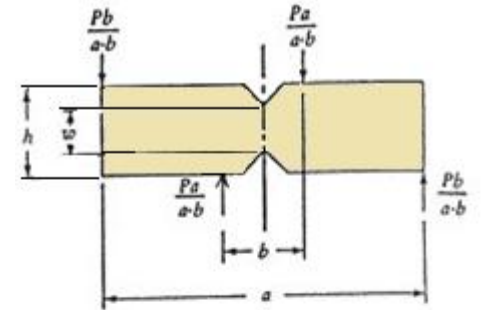
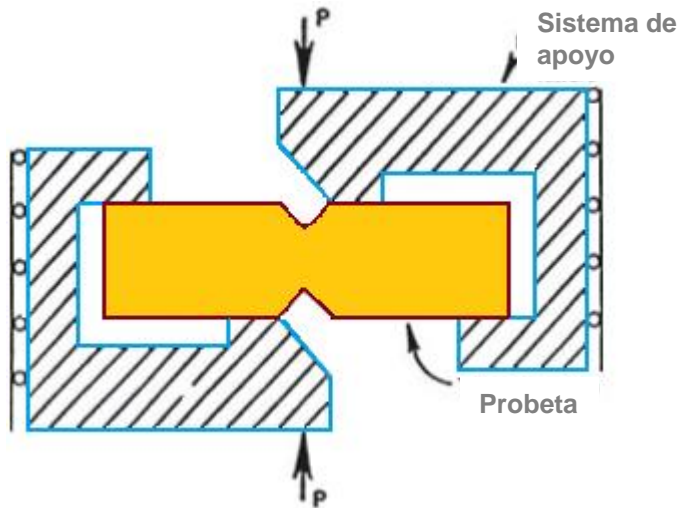


Diagrama de esfuerzo cortante

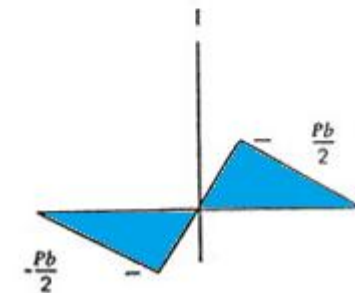
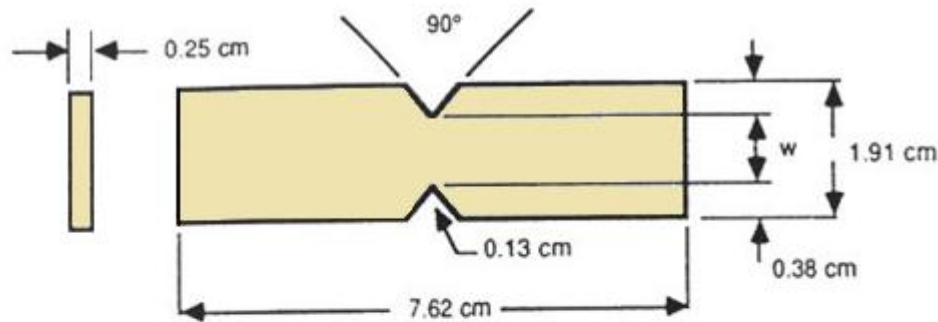


Diagrama de momento flector

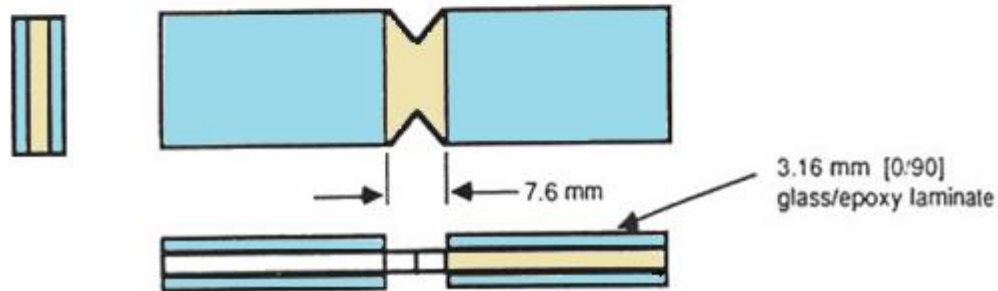
## Ensayo de flexión sobre probeta con doble entalla

Sin talones

Geometría de las probetas

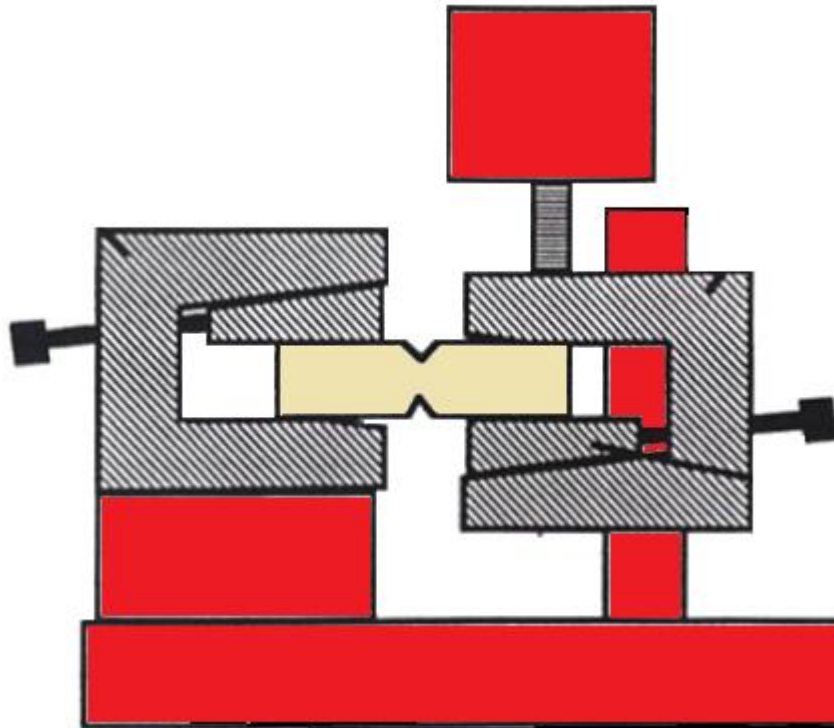


Con talones

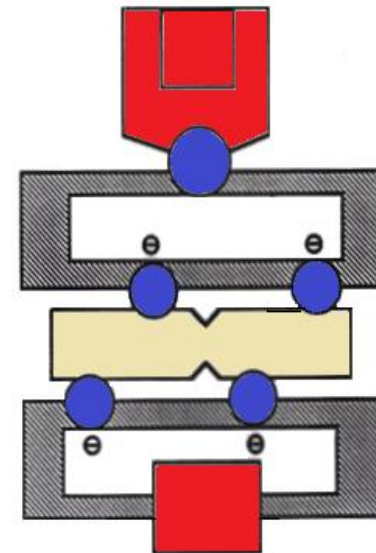




## Ensayo de flexión sobre probeta con doble entalla



Ensayo Iosipescu



Ensayo de flexión en cuatro puntos

## Ensayo de flexión sobre probeta con doble entalla

Ensayo Iosipescu

$$(\tau_{12})_{\max} = \frac{P}{w \cdot h}$$

Ensayo de flexión en cuatro puntos

$$(\tau_{12})_{\max} = \frac{P \cdot (a - b)}{w \cdot h \cdot (a + b)}$$

$$(\gamma_{12})_{\max} = (\varepsilon_x)_{45^\circ} - (\varepsilon_x)_{-45^\circ} = 2 \cdot (\varepsilon_x)_{45^\circ}$$



## Ensayo de flexión sobre probeta con doble entalla

### Inconvenientes:

- En los materiales ortótropos aparece un fenómeno de concentración de tensiones en el fondo de la entalla
- En los laminados multidireccionales la carga de rotura es muy elevada
- En ciertos materiales y configuraciones la rotura no es evidente

## Ensayo de carriles

ASTM D4255 "Guide for testing for inplane shear properties of composite laminates"

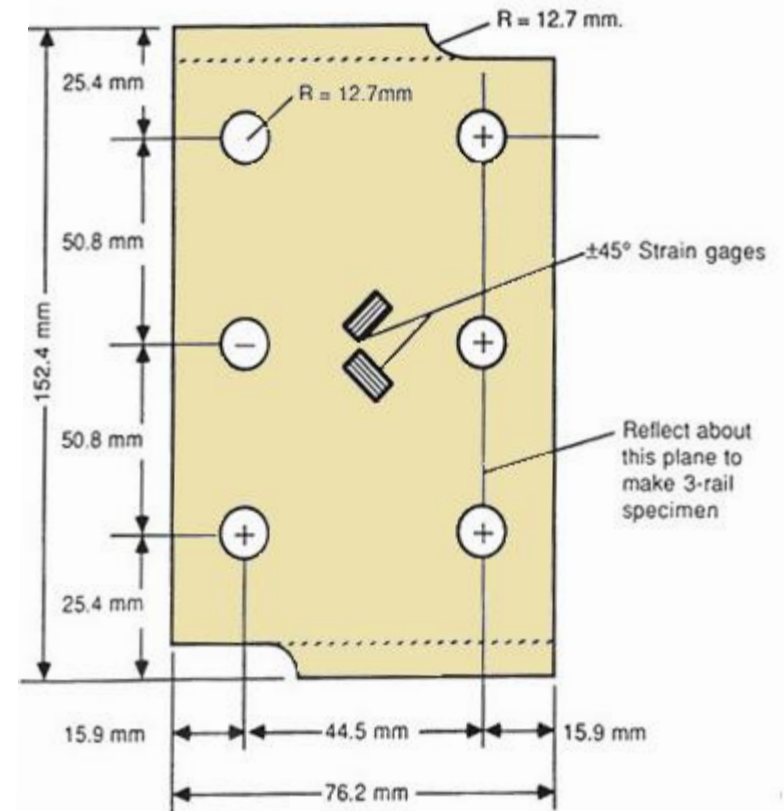
$$(\tau_{12})_{med} = \frac{P}{2 \cdot L \cdot h}$$

$$\gamma_{12} = |\varepsilon_{45^\circ} - \varepsilon_{-45^\circ}|$$

P= carga aplicada

L= Longitud de la probeta a lo largo del carril

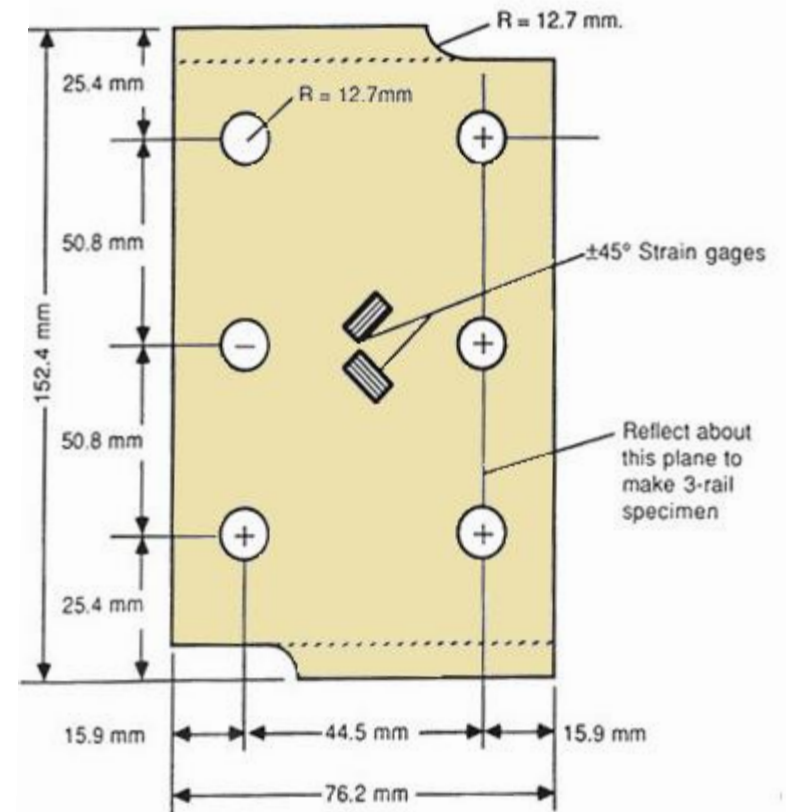
h = espesor



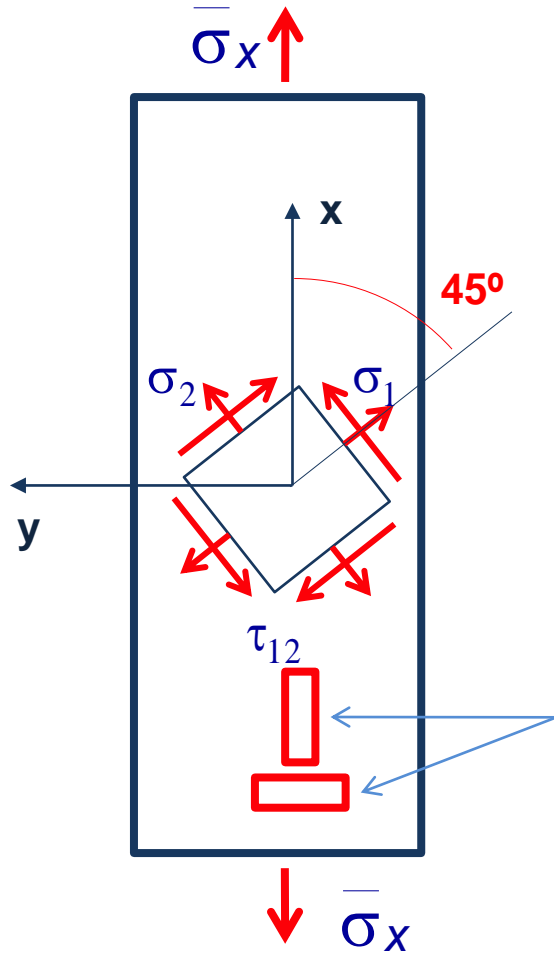
## Ensayo de carriles

Inconvenientes:

- El estado tensional de cortadura no es uniforme
- Gran dispersión de resultados
- Mayor tamaño de probetas que otros métodos



## Ensayo de tracción sobre laminado $[\pm 45^\circ]_{ns}$



$$\bar{\sigma}_x = \frac{P}{w \cdot h} \quad \left. \begin{array}{l} \sigma_1 \neq 0 \\ \sigma_2 \neq 0 \end{array} \right\} \tau_{12} = \frac{\bar{\sigma}_x}{2}$$

$$\gamma_{12} = \varepsilon_x - \varepsilon_y$$

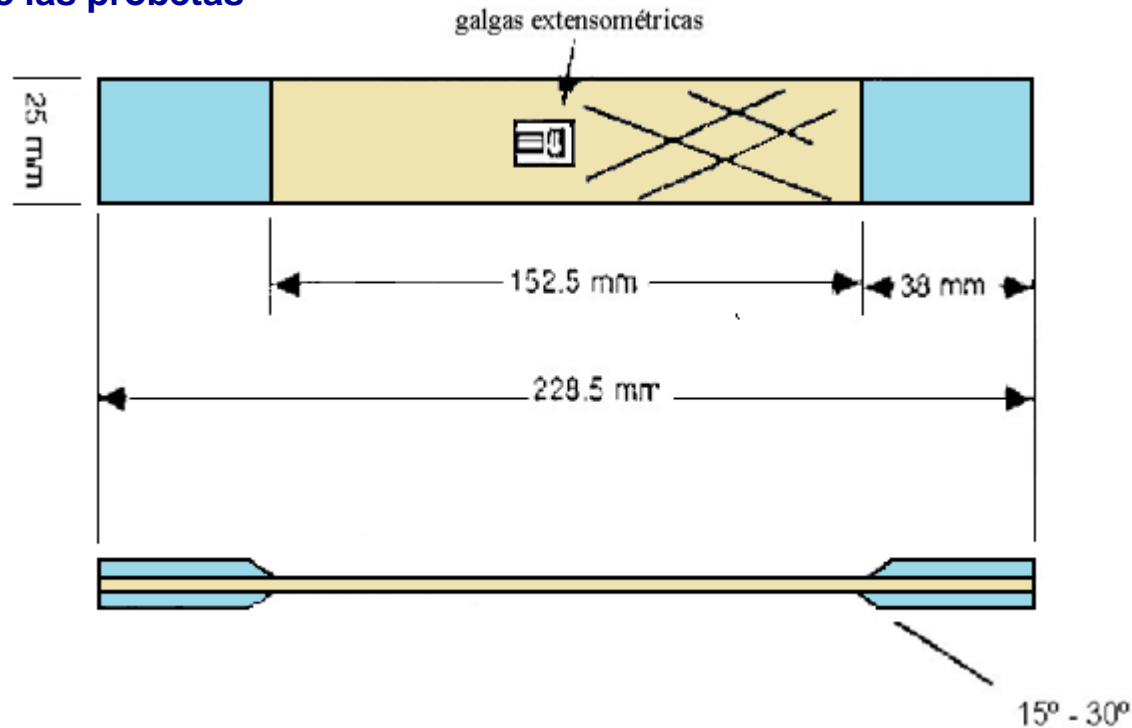
$$G_{12} = \frac{\tau_{12}}{\gamma_{12}} = \frac{\bar{\sigma}_x}{2 \cdot (\varepsilon_x - \varepsilon_y)}$$

Galgas  
extensométricas

## Ensayo de tracción sobre laminado $[\pm 45^\circ]_{ns}$

ASTM D3518M “Test method for in-plane shear response of polymer matrix composites by tensile test of a  $\pm 45^\circ$  laminate”

### Geometría de las probetas



## Ensayo de tracción sobre laminado $[\pm 45^\circ]_{ns}$

Inconvenientes:

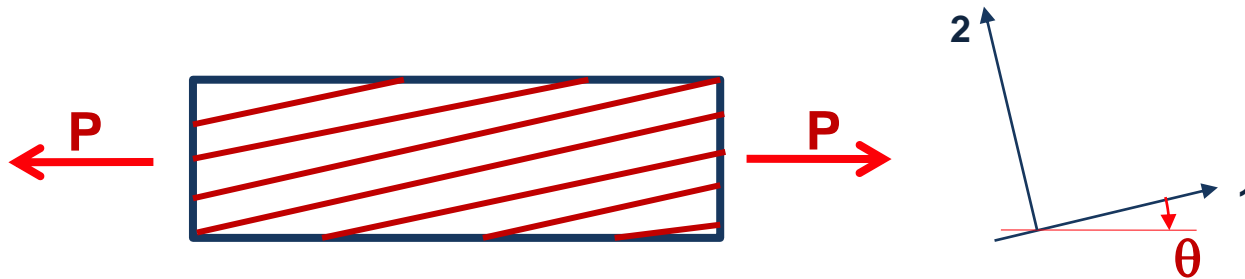
- La secuencia de apilamiento, el número de láminas y el espesor influyen en el valor de resistencia a cortadura
- El estado de tensión sobre cada lámina no es de cortadura pura

$$\sigma_1 \neq 0 \quad \sigma_2 \neq 0 \quad \tau_{12} = \frac{\sigma_x}{2}$$

- En materiales muy dúctiles se produce un cambio de orientación en las fibras para grandes deformaciones
- Sobreestima el valor de la resistencia a cortadura



## Ensayo de tracción sobre laminado $[10^\circ]_{ns}$



Tensión media sobre el laminado

$$\bar{\sigma}_x = \frac{P}{w \cdot h}$$

Tensión en dirección de las fibras

$$\sigma_1 \neq 0 \quad \sigma_2 \neq 0$$

$$\tau_{12} = m \cdot n \cdot \bar{\sigma}_x$$

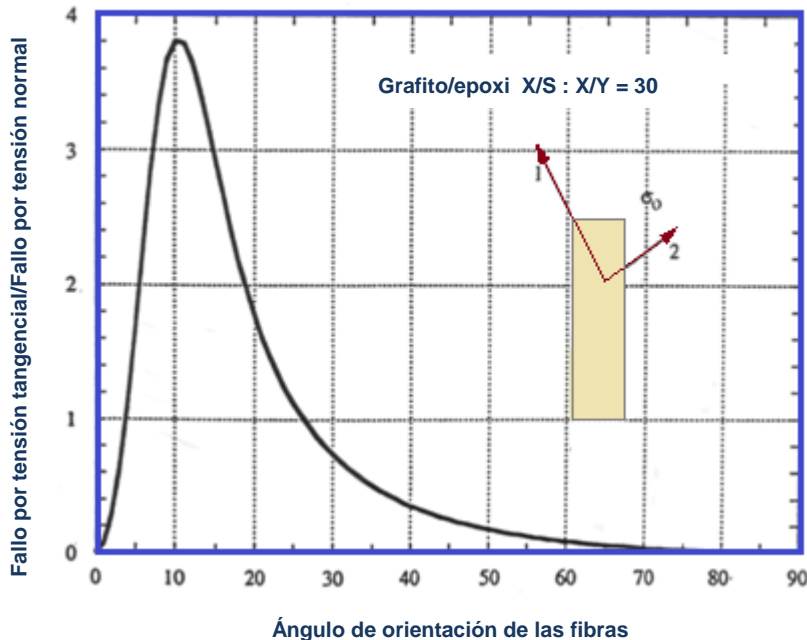
siendo :

$$m = \cos \theta \quad n = \sin \theta$$

## Ensayo de tracción sobre laminado $[10^0]_{ns}$

Deformación de cortadura

Contribución de la tensión tangencial en el fallo



$$\gamma_{12} = -(m^2 + 2mn - n^2)\varepsilon_x - (m^2 - 2mn - n^2)\varepsilon_y + (2m^2 - 2n^2)\varepsilon_{45}$$

Es necesario medir la deformación en tres direcciones mediante una roseta de tres galgas extensométricas

Para  $\theta = 10^\circ$  el efecto de cortadura es máximo.



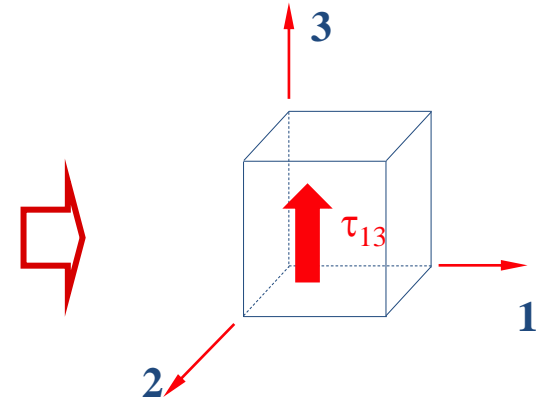
## Ensayo de tracción sobre laminado $[10^0]_{ns}$

Inconvenientes:

- La probeta no está sometida a un estado de cortadura pura
- Sobreestima el valor del módulo de cortadura  $G_{12}$  y proporciona un valor menor de resistencia a cortadura
- Únicamente se ensaya laminados unidireccionales

## PROPIEDADES:

- Resistencia a cortadura interlaminar  $\tau_{13}$
- Módulo de elasticidad  $G_{13}$



## TIPOS DE ENSAYOS:

- Método de cortadura directa

Ensayo de cortadura sobre probeta de doble entalla

Ensayo de cortadura sobre probeta de doble entalla en V

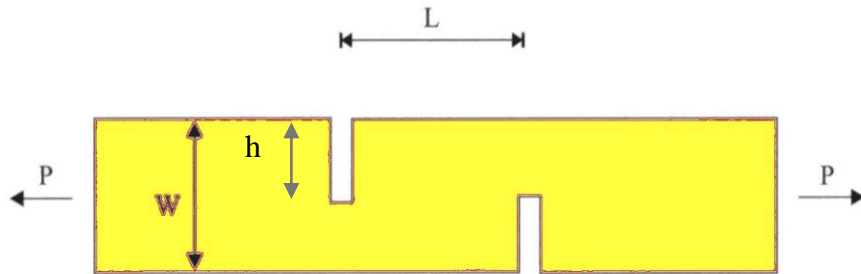
- Método de cortadura inducida

Ensayo de flexión sobre viga gruesa

## Ensayo sobre probeta de doble entalla

Se someten a tracción o compresión probetas de laminado unidireccional

### Geometría de las probetas



$$h = w/2$$

P= Carga aplicada

w= anchura de la probeta

L= distancia entre muescas

$$\tau_{13} = \frac{P}{w \cdot L}$$

ASTM D3846. Test method for in-plane shear strength of reinforced plastics.



## Ensayo sobre probeta de doble entalla

Inconvenientes:

- Aparece un fenómeno de concentración de tensiones en el fondo de la muesca
- El estado de cortadura no es uniforme
- El fallo se produce por cortadura si se cumple:

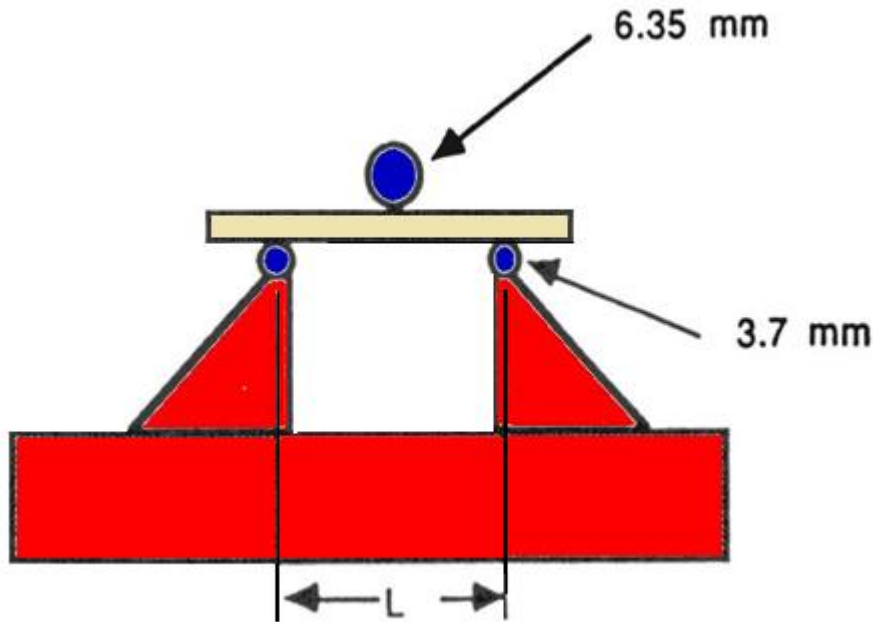
Ensayo de tracción

$$\frac{F_{13}}{X} < \frac{h}{2L}$$

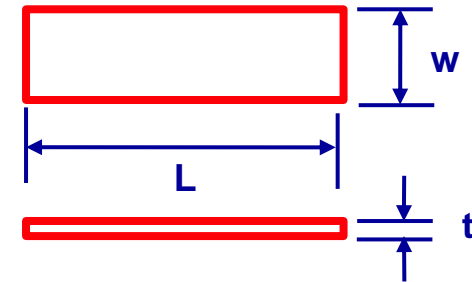
Ensayo de compresión

$$\frac{F_{13}}{X'} < \frac{h}{2L}$$

## Ensayo de flexión sobre probeta gruesa



### Geometría de las probetas



$$L/t = 4$$

$$t = 80-125 \text{ mm}$$

$$w = 25 \text{ mm}$$

$$L = 6 t$$

ASTM D2344. Test Method for aparent interlaminar shear strength of parallel fiber composites by short-beam method.



## Ensayo de flexión sobre probeta gruesa

$$\tau_{13} \cong \frac{3P}{4wh}$$

P= Carga aplicada

w= anchura de la probeta

h= espesor

Para asegurar el fallo debido a cortadura debe cumplirse:

$$\frac{2L}{h} < \frac{X}{\tau_{13}}$$

Inconvenientes:

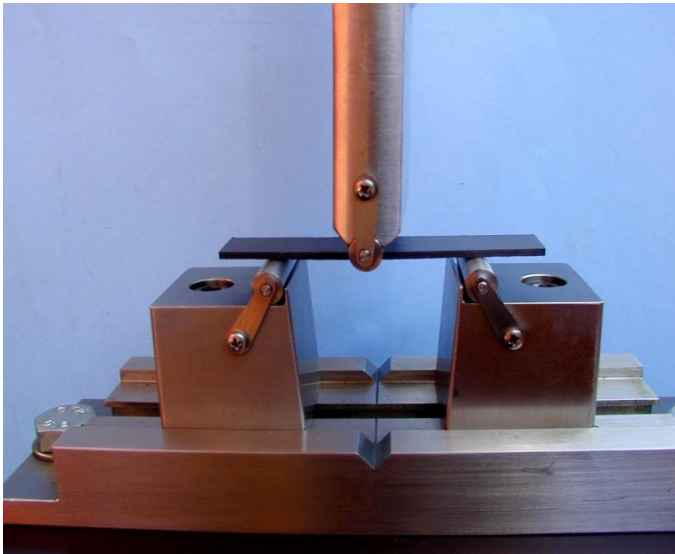
- El estado tensional es muy complejo
- La rotura raramente se produce solo por cortadura
- El único valor que se puede obtener es la resistencia a cortadura



## Descripción

### PROPIEDADES:

- Resistencia mecánica a flexión
- Rigidez a flexión



### Geometría de las probetas



$d / h > 16:1$  (se recomienda 32:1 o 40:1)

## Tipos de ensayos de flexión

Ensayo de flexión  
en tres puntos

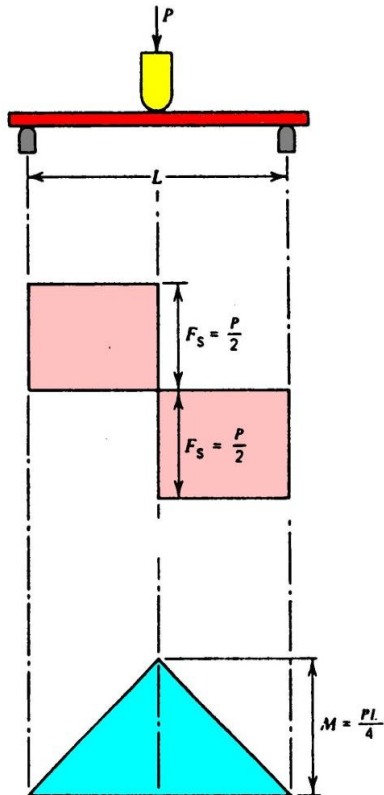
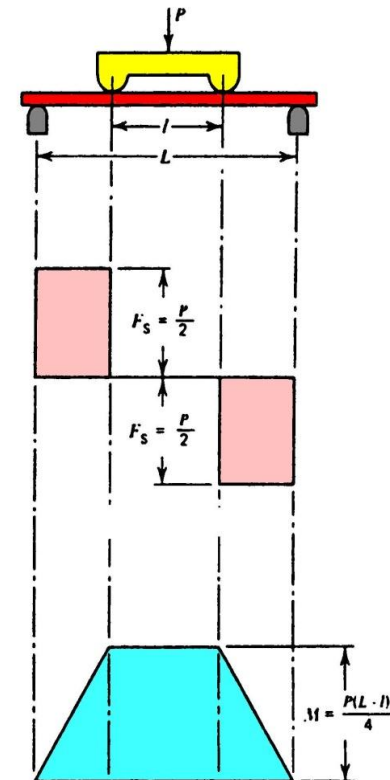


Diagrama de  
esfuerzos  
cortantes

Diagrama de  
momentos  
flectores

Ensayo de flexión  
en cuatro puntos





## Tipos de ensayos de flexión

### Ensayo de flexión en tres puntos

Resistencia mecánica a flexión

$$\sigma_R^f = \frac{3PL}{2BH^2}$$

P = carga aplicada

L = distancia entre apoyos

H = Espesor de la probeta

B = Anchura de la probeta

Rigidez a flexión

$$K^f = \frac{L^3}{4BH^3} \cdot \frac{P}{d}$$

P/d = Pendiente de la curva  
carga-desplazamiento

## Tipos de ensayos de flexión

### Ensayo de flexión en cuatro puntos – configuración L/4

Resistencia mecánica a flexión

$$\sigma_R^f = \frac{3PL}{4BH^2}$$

P = carga aplicada

L = distancia entre apoyos

H = Espesor de la probeta

B = Anchura de la probeta

Rigidez a flexión

$$K^f = \frac{0.17L^3}{BH^3} \cdot \frac{P}{d}$$

P/d = Pendiente de la curva  
carga-desplazamiento



## Tipos de ensayos de flexión

### Ensayo de flexión en cuatro puntos – configuración L/3

Resistencia mecánica a flexión

$$\sigma_R^f = \frac{PL}{BH^2}$$

P = carga aplicada

L = distancia entre apoyos

H = Espesor de la probeta

B = Anchura de la probeta

Rigidez a flexión

$$K^f = \frac{0.21L^3}{BH^3} \cdot \frac{P}{d}$$

P/d = Pendiente de la curva  
carga-desplazamiento

## Tipos de ensayos de flexión

En probetas muy esbeltas aparecen grandes flechas que impiden utilizar la teoría clásica de Resistencia de Materiales.

Desplazamiento máximo  $> 10\%L$

Resistencia mecánica a flexión

**En tres puntos**

$$\sigma_R^f = \frac{3PL}{2BH^2} \cdot \left( 1 + \left( \frac{d}{L} \right)^2 - 4 \frac{H}{L} \cdot \frac{d}{L} \right)$$



**Configuración L/4**

$$\sigma_R^f = \frac{3PL}{4BH^2} \cdot \left( 1 - 10.91 \frac{H}{L} \cdot \frac{d}{L} \right)$$

**Configuración L/4**

$$\sigma_R^f = \frac{PL}{BH^2} \cdot \left( 1 + 4.7 \left( \frac{d}{L} \right)^2 - 7.04 \frac{H}{L} \cdot \frac{d}{L} \right)$$



## Normativa

- ASTM D790. Flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials.
- ASTM C393. Flexure test of flat sandwich constructions
- EN 63 (UNE 53288:80). Plásticos reforzados con fibra de vidrio. Determinación de las características de flexión: Método de los tres puntos de apoyo.
- UNE-EN-2746:1999. Material aeroespacial. Plásticos reforzados con fibra de vidrio. Ensayo de flexión.



## Normativa

- UNE-EN-2562: 1997. Material aeroespacial. Plásticos reforzados con fibra de carbono. Laminados unidireccionales. Ensayos de flexión paralela a las fibras.
- UNE 53189-3: 1977. Materiales plásticos. Placas de materiales estratificados con resinas termoestables. Determinación de la resistencia a flexión.
- UNE-EN-ISO 14125: 1999. Compuestos plásticos reforzados con fibras. Determinación de las propiedades a flexión.



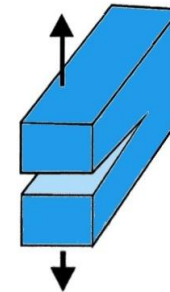
## Modos de fallo

PROPIEDADES



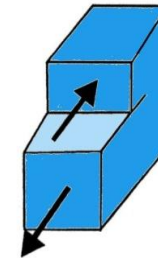
$G_c$

Modo I



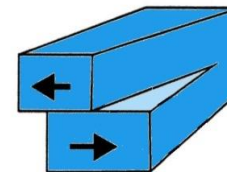
$G_I$

Modo II



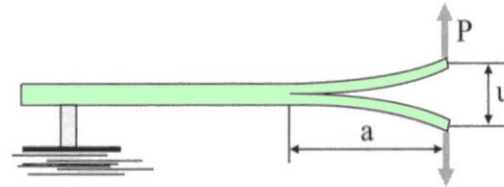
$G_{II}$

Modo III

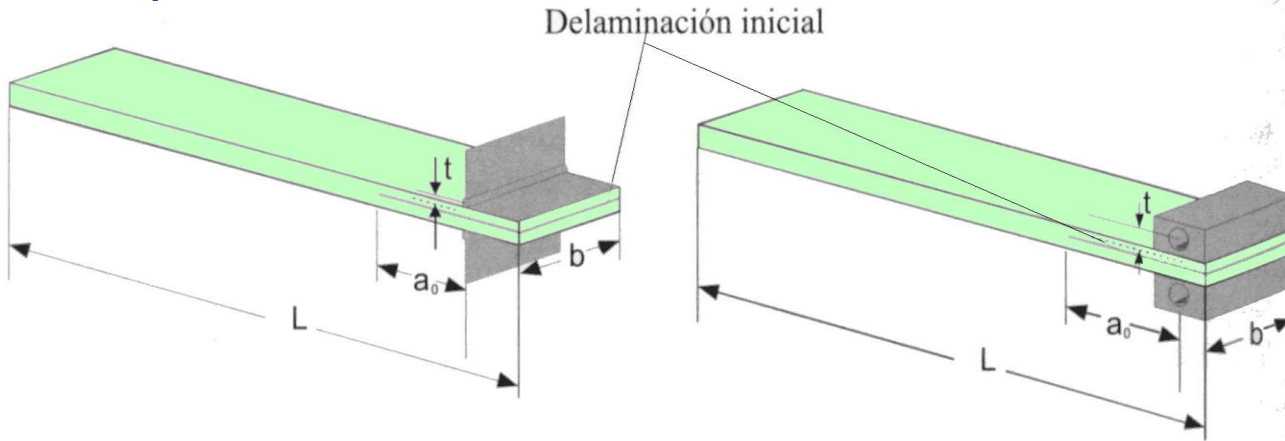


$G_{III}$

## Ensayo en modo I. Ensayo DCB



### Geometría de las probetas



$$L \geq 125 \text{ mm}$$

$$20 \leq b \leq 25 \text{ mm}$$

$$3 \leq h \leq 5 \text{ mm}$$

$$a_0 = 50 \text{ mm}$$

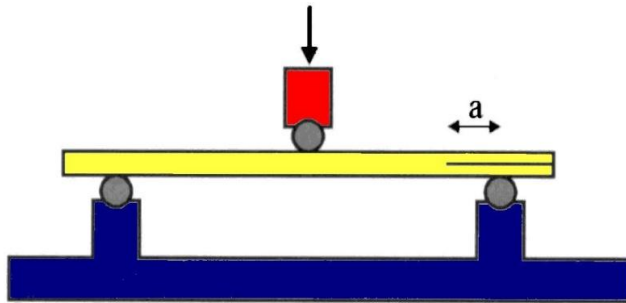


## Ensayo en modo I. Ensayo DCB

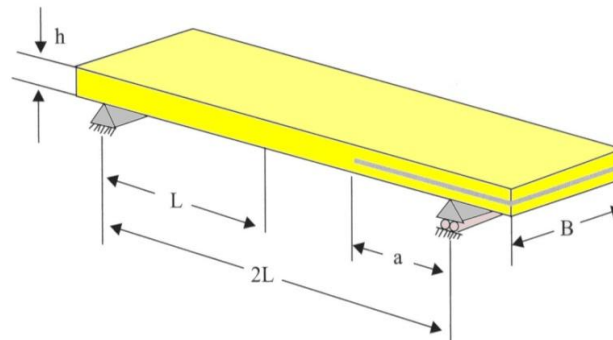
### NORMATIVA:

- ASTM D5528. Standard test method for mode I interlaminar fracture toughness of unidirectional fiber-reinforced polymer matrix composites.

## Ensayo en modo II. Ensayo ENF



### Geometría de las probetas



$L = 50 \text{ mm}$

$B = 25 \text{ mm}$

$3 [ h [ 5 \text{ mm}$

$a_0 = 25 \text{ mm}$



## Ensayo en modo II. Ensayo ENF

El ensayo se realiza sobre laminados unidireccionales, pero su uso no está limitado a ellos

### Inconvenientes

- Existe una interacción compleja entre la geometría y la carga
- La probeta es asimétrica
- Pueden aparecer fenómenos de fricción entre los labios de la fisura que pueden alterar el resultado



## Ensayo en modo mixto

Las fisuras se propagan de forma que combinan varios modos de fractura

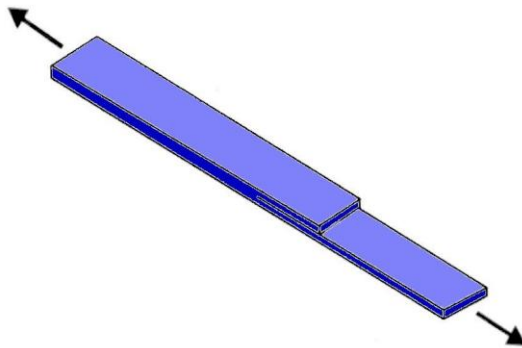
- Fisuras con bordes curvos
- Fisuras de borde

Existen diversos ensayos en modo mixto:

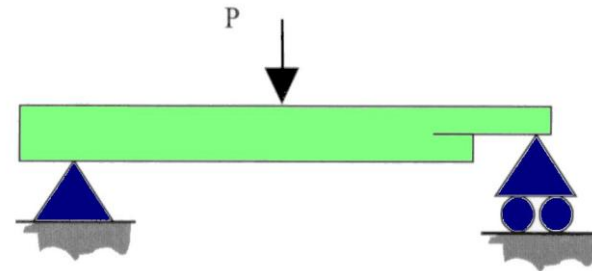
- Ensayo CLS
- Ensayo SLB
- Ensayo USLB
- Ensayo UENF

Todos estos ensayos tienen la limitación de que NO es posible variar el ratio Modo I / Modo II

## Ensayo en modo mixto

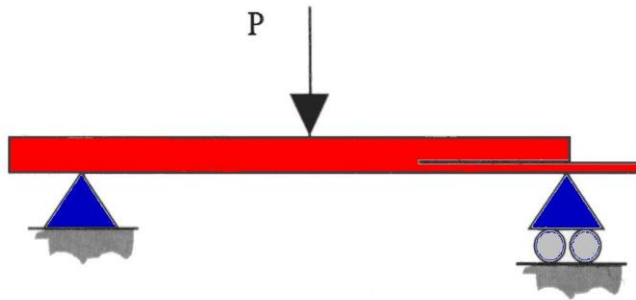


Ensayo CLS (crack lap shear)

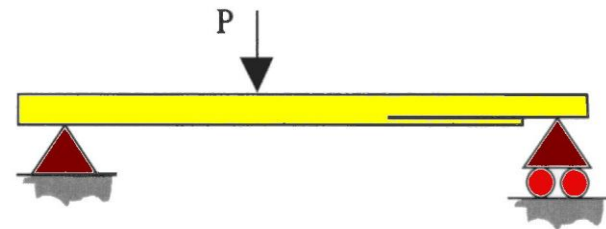


Ensayo SLB (single leg bending)

## Ensayo en modo mixto



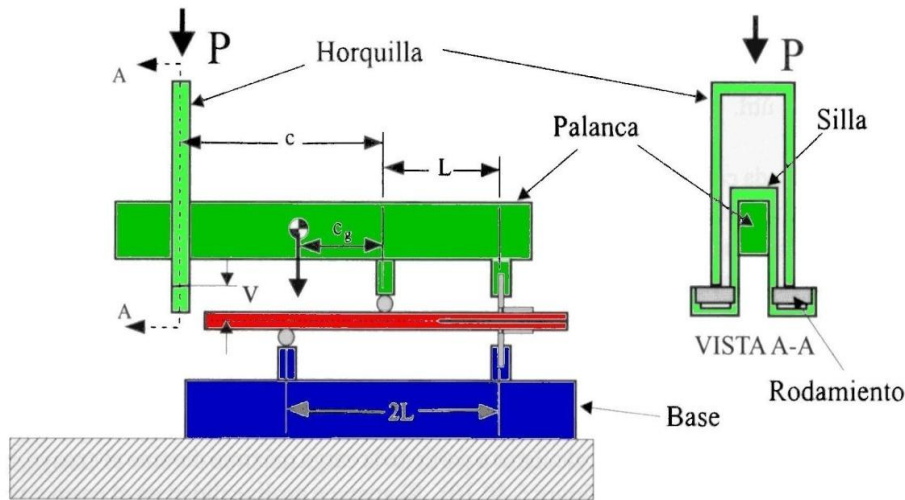
Ensayo CLS (crack lap shear)



Ensayo SLB (single leg bending)

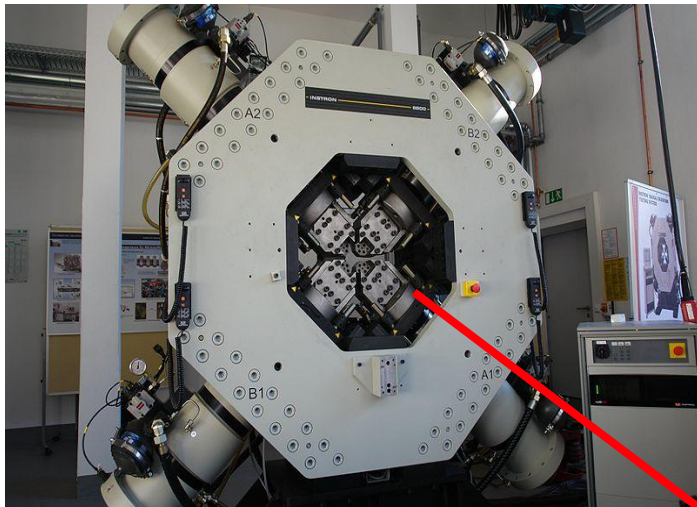


## Ensayo en modo mixto. Ensayo MMB



Es posible ensayar cualquier ratio Modo I / Modo II, desde Modo I puro a Modo II puro

## Ensayos biaxiales



Geometría de las probetas

