

Bienvenid@s

WEBINAR





#WebinarsAEMAC

#WebinarsAEMAC

3

WebinarsAEMAC N°70

Sergio Horta Muñoz

Universidad de Castilla-La Mancha

**Ensayos biaxiales tracción-compresión con
probetas cruciformes y su aplicación a la
caracterización de la respuesta a cortadura**

25/03/2025, 16:00 (GMT+2)



¿Existe un ensayo de cortadura (*in-plane*) preferente en materiales compuestos?



- 1. Grupo COMES-UCLM**
- 2. Contexto de la caracterización a cortadura**
- 3. Metodología de ensayo cruciforme tracción-compresión**
 - » Especificación UNE 0074:2023
- 4. Resultados de aplicación**
- 5. Estado actual y futuros pasos**

1. Grupo COMES-UCLM

**Mecánica de los Medios Continuos,
Ingeniería de Estructuras y de Materiales**



COMES

MECANICA DE LOS MEDIOS CONTINUOS,
INGENIERIA DE ESTRUCTURAS Y MATERIALES

1. Grupo COMES-UCLM



7



Escuela de
Ingeniería Industrial
y Aeroespacial
Toledo
Universidad de Castilla-La Mancha

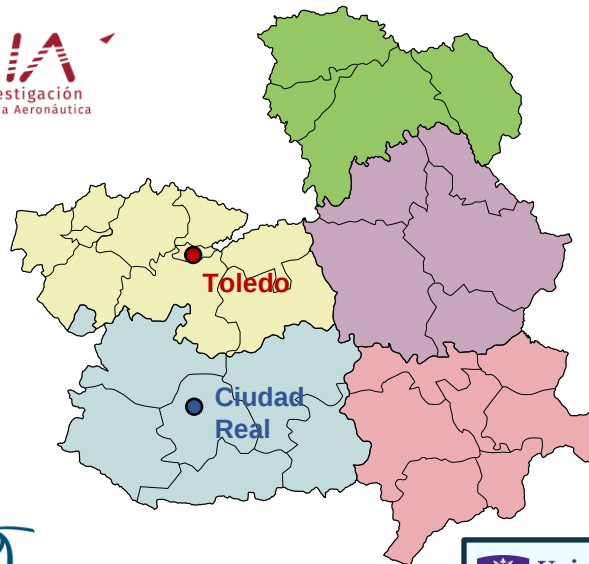


Instituto de Investigación
Aplicada a la Industria Aeronáutica

Laboratorios de Mecánica de los
Medios Continuos y Estructuras
(ETSII+INAIA)

Laboratorios de Ciencia e
Ingeniería de Materiales
(ETSII+INAIA)

Laboratorio de composites (INEI)



M.C. Serna(CU)
A. Romero (TU)
S. Horta (TU)
A. Cañadilla (AyD)
A. Sánchez (Predoctoral)
M. Domínguez (Investigador)

J.J. López (CU)
G.P. Rodríguez (CU)
M. A. Caminero (CU)
J.L. Martínez (CD)



Escuela Técnica Superior
Ingeniería Industrial
Ciudad Real



Instituto de Investigaciones Energéticas
y Aplicaciones Industriales



CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

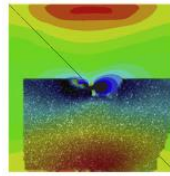
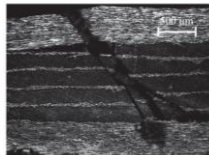
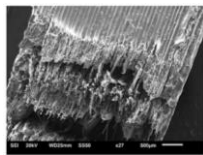


GSI Helmholtzzentrum für
Schwerionenforschung

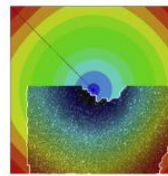
1. Grupo COMES-UCLM. Líneas de investigación

8

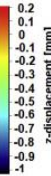
- **Procesado y caracterización de metales – Fabricación aditiva y sinterización por energía solar concentrada**
 - Polímeros
 - Polímeros reforzados con fibras y nanopartículas
 - Metales y compuestos intermetálicos
- **Caracterización multiaxial de FRP**
 - Ensayos estáticos y dinámicos
 - Ensayos multiaxiales
 - Modelado numérico



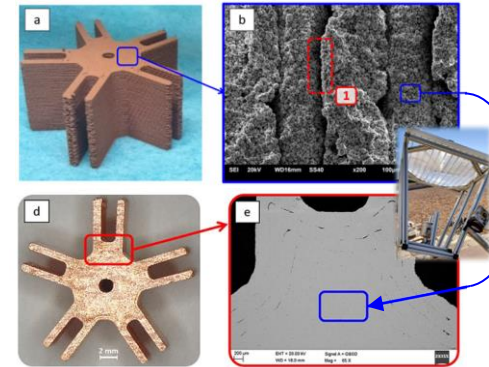
ϵ_y - Experimental



δ_z (mm) - Experimental

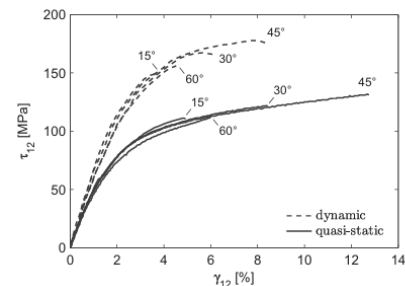
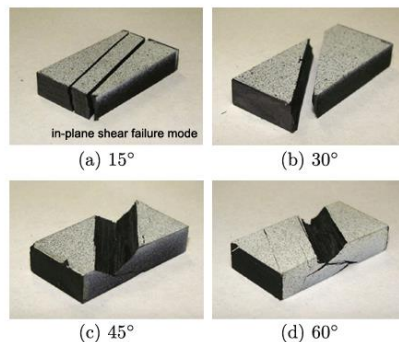
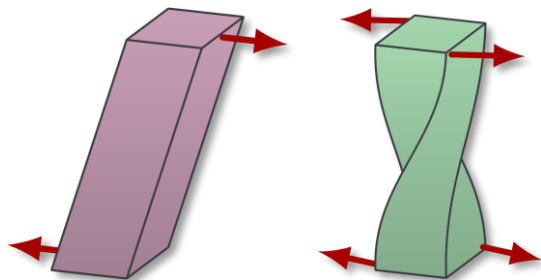


z-displacement [mm]



M.C. Serna et al. *Compos. Struct.* 136 (2016) 706–711
Compos. Sci. Techn. 156 (2018) 8–18
A. Cañadilla et al. *J. Manuf. Proces.* 134 (2025) 851–865
M.A. Caminero et al. *Compos. Part B* 148 (2018) 93–103

2. Contexto de la caracterización a cortadura

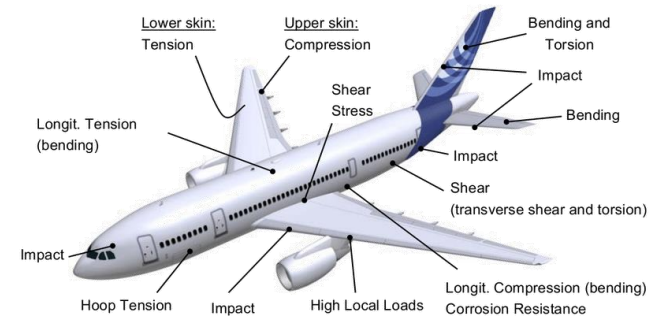


H. Koerber et al.
Mech. Mater. 42 (2010) 1004-1019

Cortadura en aplicaciones de materiales compuestos

10

- » Aplicaciones estructurales de material compuesto: estado multiaxial de cargas
- » Respuesta altamente no lineal a cortadura y uso de ensayos para detallar la iniciación/evolución del daño → mejora en desarrollo de componentes estructurales. Además, ensayos biaxiales $\approx$ ensayos de elemento estructural.
- » Fuselaje, pieles... laminados de espesor delgados dominados por **cortadura**.
- » Necesidad de datos experimentales para diseño óptimo.



Fuente: Renewable Energy Focus

Fuente: H. Speckmann, IMRBPB meeting, EASA(2007)

Estado del arte. Comportamiento no-lineal a cortadura en FRP

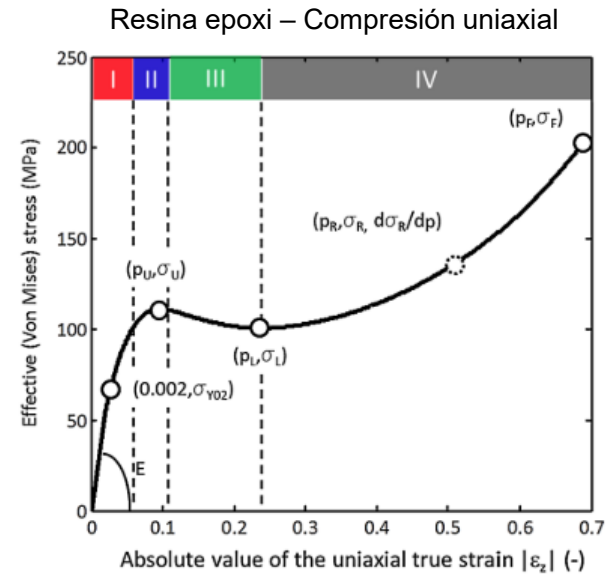
11

Lámina UD-CFRP UD: comportamiento elástico lineal frágil en direcciones principales del material.

Matriz epoxi: **plasticidad** (cortadura/compresión) = alta capacidad de deformación = alta capacidad de absorción de energía.



Fuente: Renewable Energy Focus



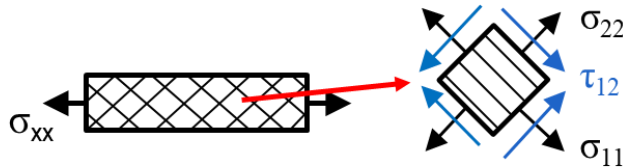
Morelle et al., Mech Time-Depend Mater 21 (2017)

Estado del arte. Comportamiento no-lineal a cortadura en FRP

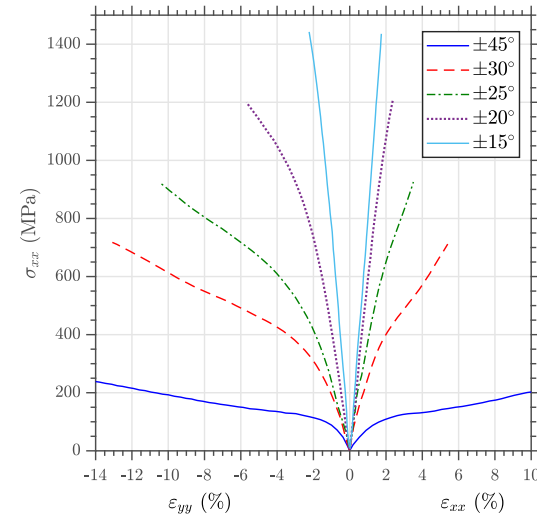
12

$[\pm\theta]_{ns}$ bajo tracción/compresión uniaxial:
Tensiones tangenciales (+normales) en las
direcciones principales del material
(ASTM D3518 - $[\pm45]_{ns}$)

- Plasticidad de matriz inducida por cortadura
- Grandes deformaciones
- Reorientación de fibras = efecto rigidizador



CFRP – Ensayo tracción uniaxial *angle-ply*

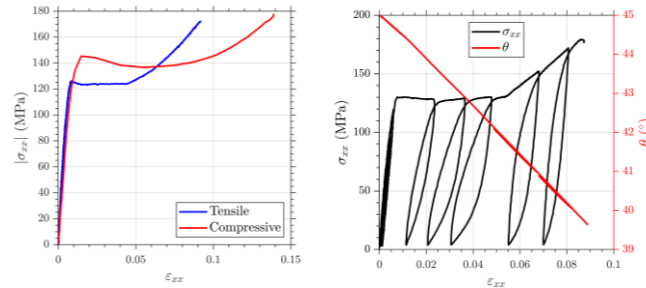
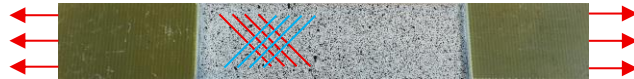


J.D. Fuller y M.R. Wisnom Compos. Part A 69 (2015) 64-71

Ensayos estandarizados...

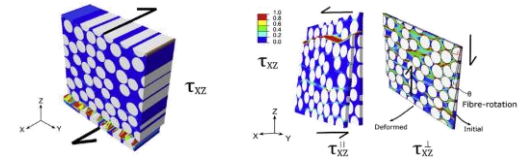
13

Tracción $[\pm 45]_{ns}$



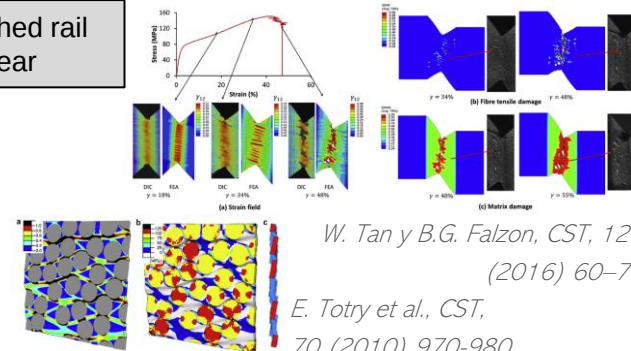
M.C. Serna y S. Horta
Compos. Part B, 233 (2022) 109631

SBSS



W. Tan et al., *Compos. Part B*,
138 (2018) 206–221

V-notched rail shear



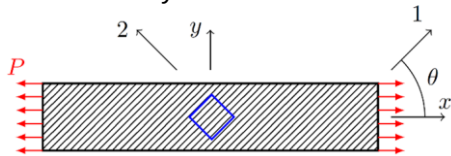
W. Tan y B.G. Falzon, *CST*, 126
(2016) 60–77

E. Totry et al., *CST*,
70 (2010) 970–980

Ensayos estandarizados y no estandarizados

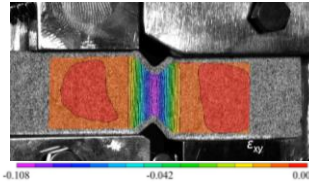
14

Ensayo tracción $\pm 45^\circ$



*ASTM D3518/D3518M-18 (2018).
Shear response by Tensile Test of a $\pm 45^\circ$
laminates*

Iosipescu



*ASTM D5379/D5379M-19e1 (2019) Shear
Properties by the V-Notched Beam Method*

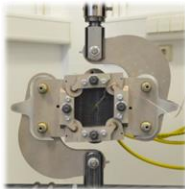
V-Notched Rail

*ASTM D7078/
D7078M-
20e1 (2020)
Shear Properties
by V-Notched Rail
Method*

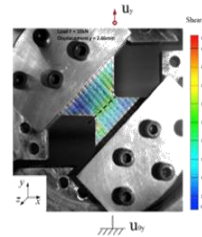


Marco de cortadura

*ISO 20337:2018
(2018) Shear
test method using
a shear frame*

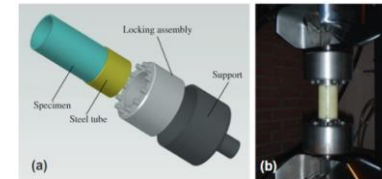


Modified Arcan Fixture



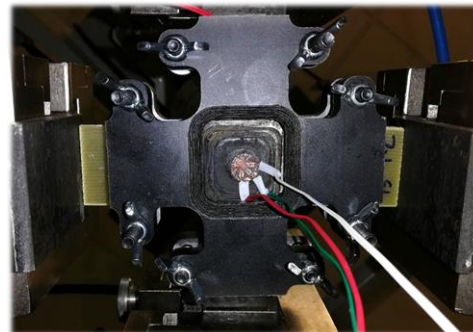
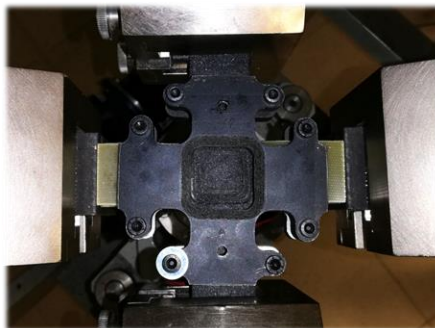
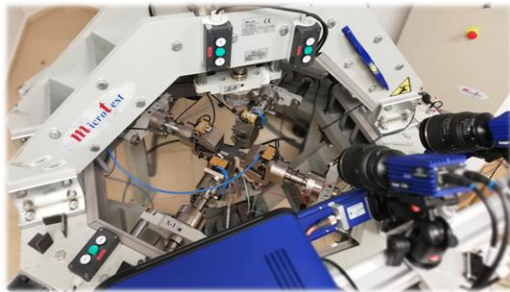
P. Hao et al., Polym. Test., 80 (2019) 106148

Torsión sobre tubos



*M. Quaresimin, P.A. Carraro, Compos.
Part B, 54 (2013) 200-208*

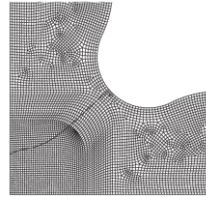
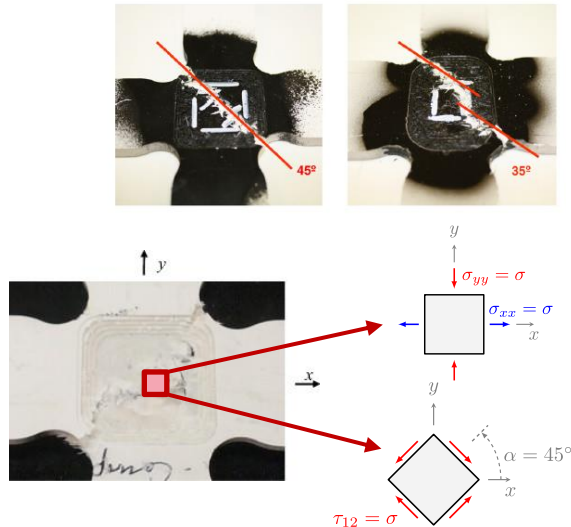
2. Metodología de ensayo cruciforme tracción-compresión



Experiencia en ensayos biaxiales

16

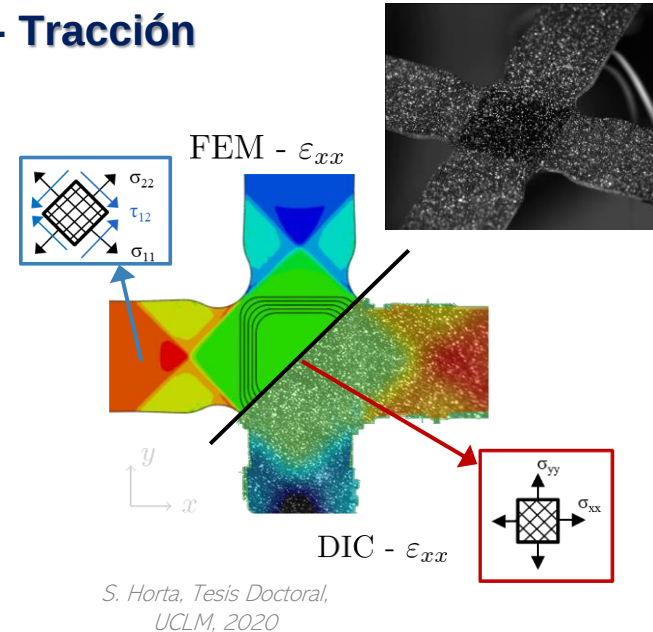
■ Ensayos biaxiales en probetas cruciformes - Tracción



M.C. Serna y J.J. López CST 72
(2011) 91–96

M.C. Serna y J.L. Martínez
Comp. Struct.
122 (2015) 440–444

M.C. Serna et al. Compos.
Struct. 119 (2015) 264–271

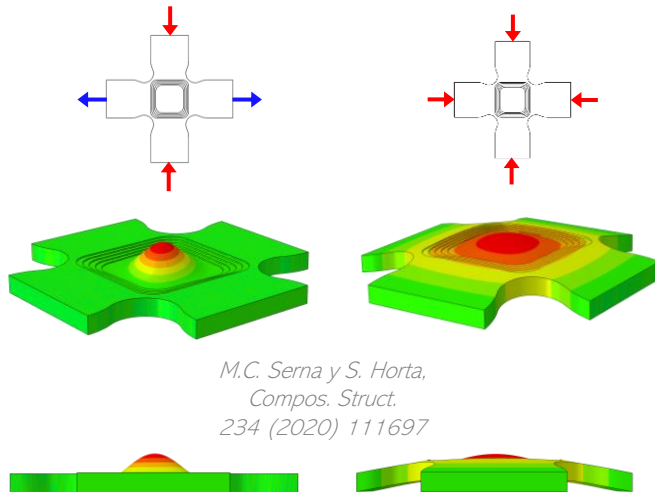


S. Horta, Tesis Doctoral,
UCLM, 2020

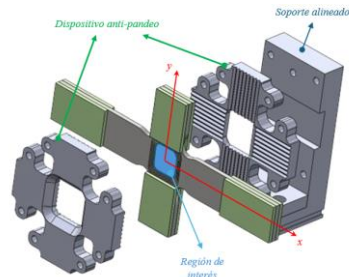
Experiencia en ensayos biaxiales

17

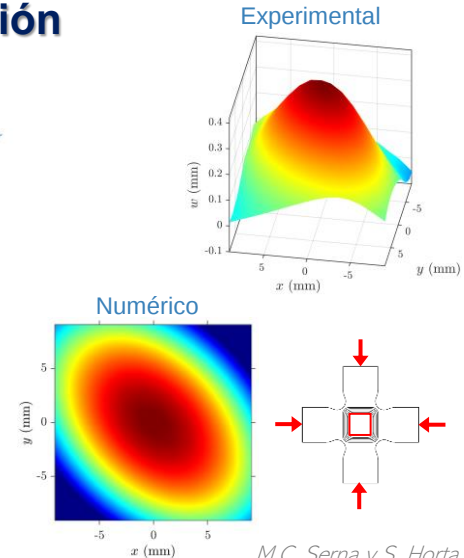
■ Ensayos biaxiales en probetas cruciformes - Compresión



*M.C. Serna y S. Horta,
Compos. Struct.
234 (2020) 111697*



*M.C. Serna y S. Horta,
Modelo de Utilidad
ES1295252P*



*M.C. Serna y S. Horta,
Compos. Part B
286 (2024) 111764*

Marco actual de trabajo

18

Investigación fundamental:
estudio teórico-experimental
estados biaxiales (2010-2012)

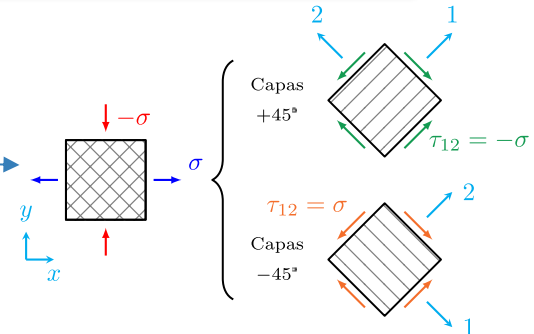
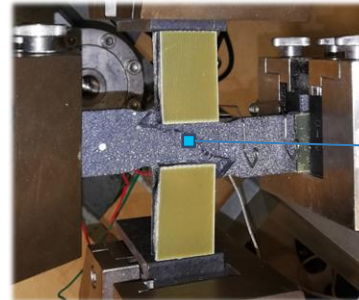
Retos: **COMMUL** (2016-2019)

Prueba de Concepto: **BISHEAR**
(2021-2024)



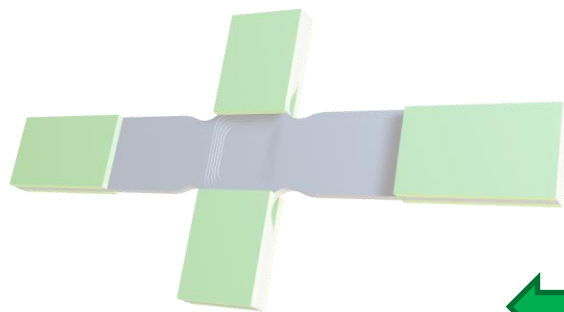
Regional: **CORA**
(2024-2027)

Gen. Conocimiento:
RENO (2023-2026)

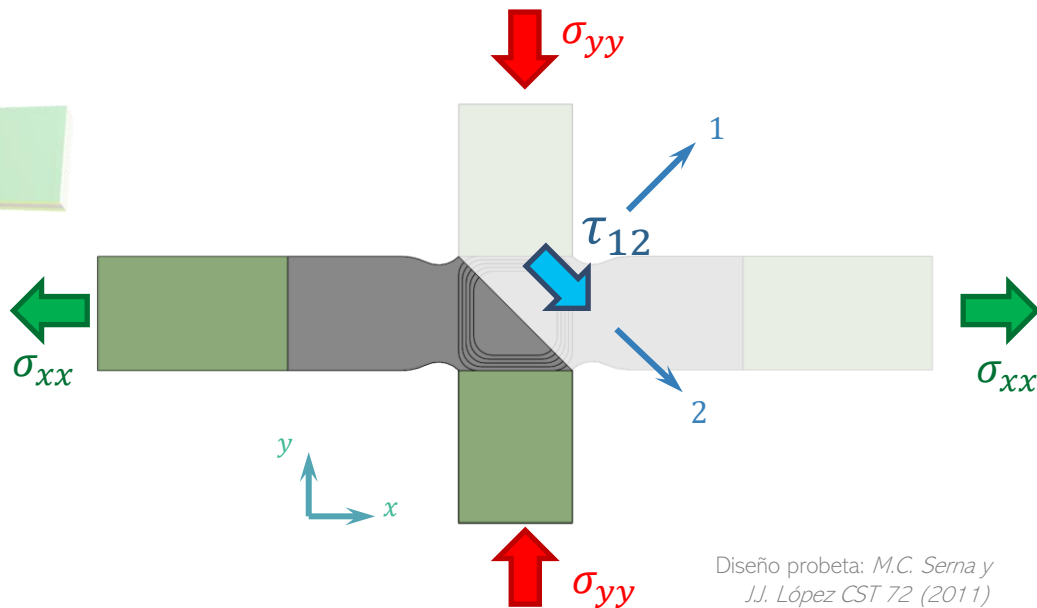


Ensayo tracción-compresión en laminados

19



Configuración requerida para
UD-ply = $[\pm 45^\circ]_{ns}$



Diseño probeta: M.C. Serna y
J.J. López CST 72 (2011)

Especificación UNE 0074:2023

20

UNE

Normalización
Española

ESPECIFICACION UNE 0074:2023

🇪🇸 Materiales plásticos. Método de ensayo de cortadura mediante tracción-compresión sobre probeta cruciforme.

🇬🇧 Plastic materials. Shear test method by means of tension-compression on cruciform specimen

🇫🇷 Matériaux plastiques. Méthode d'essai de cisaillement par traction-compression sur éprouvette cruciforme

📄 Descargar extracto

📄 Ver parte del contenido de la norma >

Fecha Edición: 2023-05-31 / **Vigente**

ICS: 83.120 / Plásticos reforzados

CTN: CTN 53/GT 8 - Ensayo biaxial tracción-compresión en laminados de matriz polimérica reforzados con fibra



ANAIP Asociación Española de
Industriales de Plásticos

SIEMENS Gamesa
RENEWABLE ENERGY

INSTITU
TO
EDUAR
DO
TOR
ROJA

Instituto de Ciencias de la Construcción
EDUARDO TORROJA



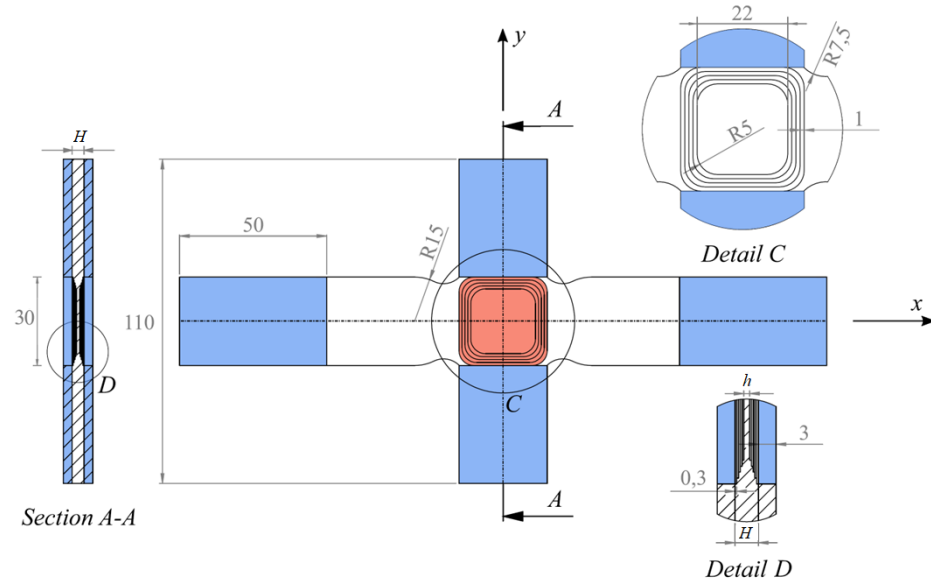
AIMPLAS
INSTITUTO TECNOLÓGICO
DEL PLÁSTICO

Probeta cruciforme recomendada

21

Recomendación:

- Relación espesores brazo/zona central: $H / h = 4$
- Mecanizado CNC

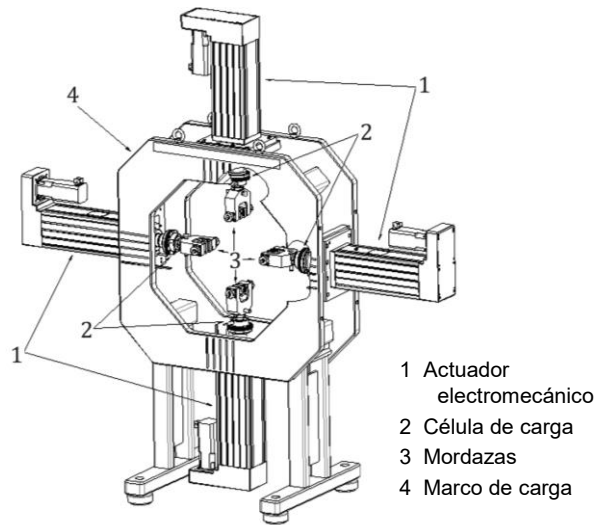


S. Horta, M.C. Serna, Compos. Part B 261 (2023) 110792

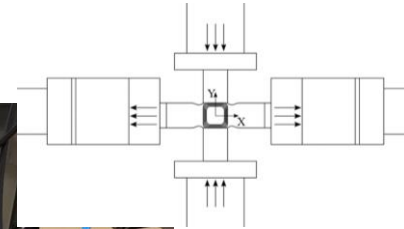
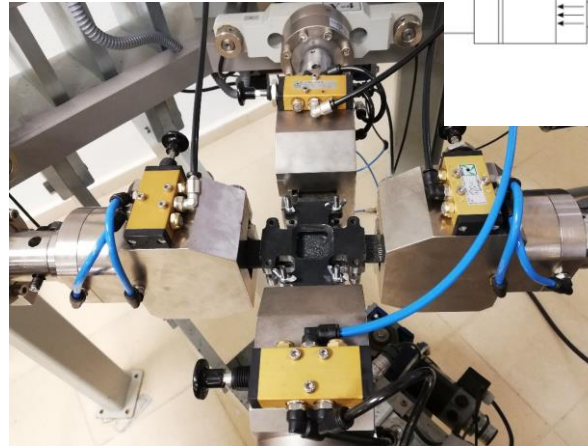
Basada en diseño de: A. Smits et al., Compos Sci Tech 66 (7-8) (2006) 964–975

Instalación de ensayo

22



ISO 16842 (2021) Metallic materials – Sheet and Strip – Biaxial tensile testing method using a cruciform specimen

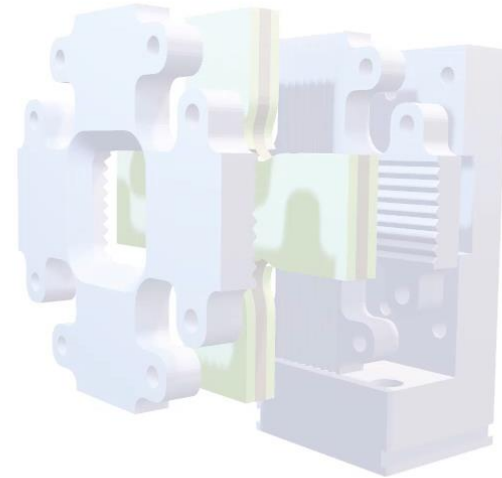
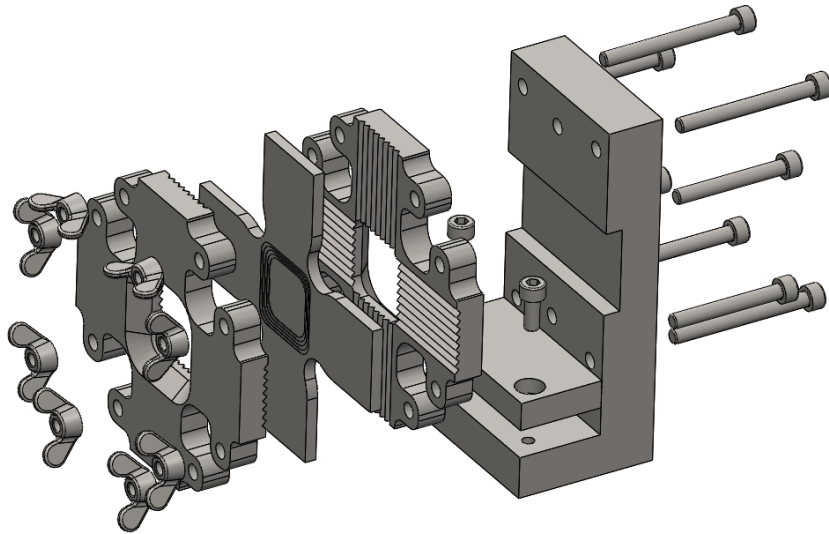


Recomendación:

- ❖ Control en fuerza
 $F_x/F_y = 1/-1$
- ❖ Rampa carga: 20 N/s
- ❖ Platos de compresión
- ❖ Útil anti-pandeo

Útil antipandeo

23

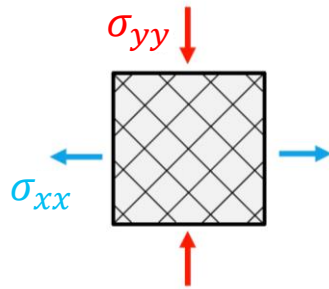


M.C. Serna y S. Horta, Modelo de Utilidad P2018/109819

Medición y cálculo de resultados

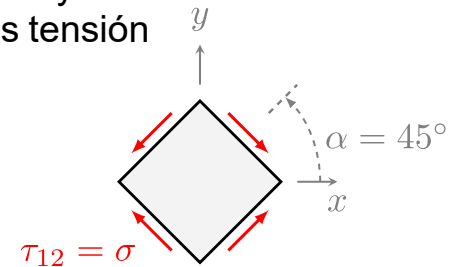
24

Mediante medición de tensión normal aplicada y deformaciones longitudinales en ROI, obtenemos tensión tangencial y deformación angular

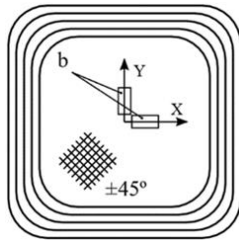


$$\tau_{12} = \frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2}$$

$$\gamma_{12} = \varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy}$$



Región
central
rebajada

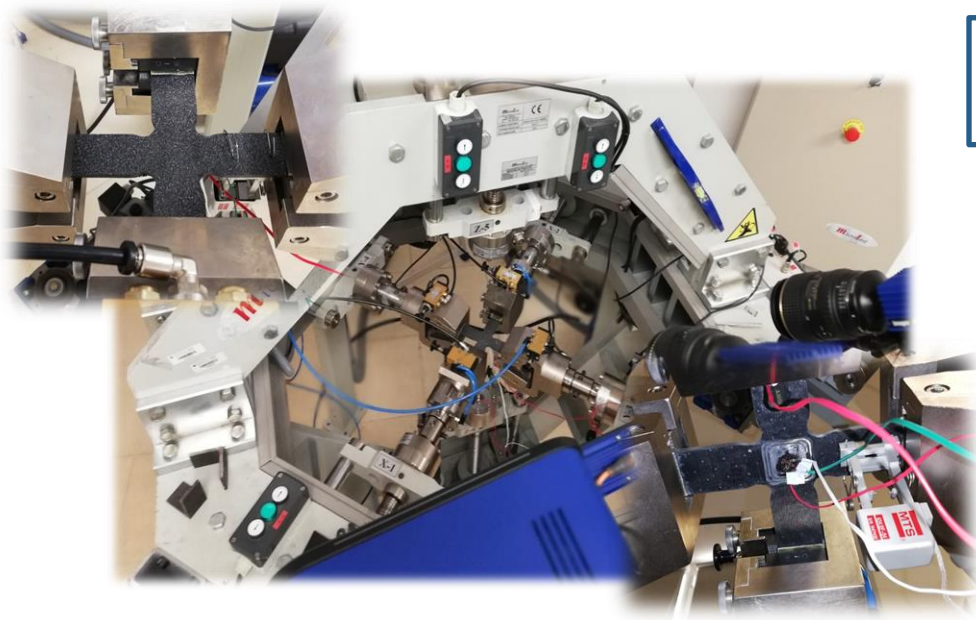


Recomendaciones:

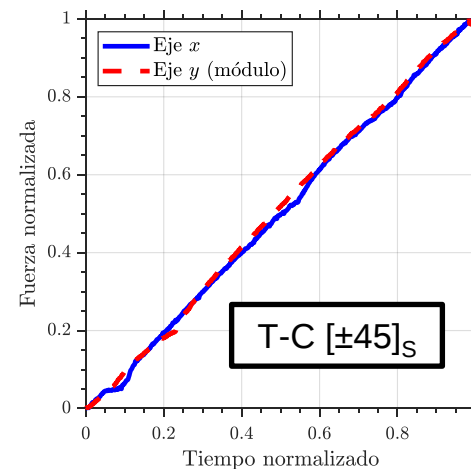
- ❑ Sistema DIC para medida de campo completo en superficie frontal.
- ❑ Galgas extensométricas en cara trasera para cuantificar desviaciones/inestabilidades.

Instalación de ensayo

25

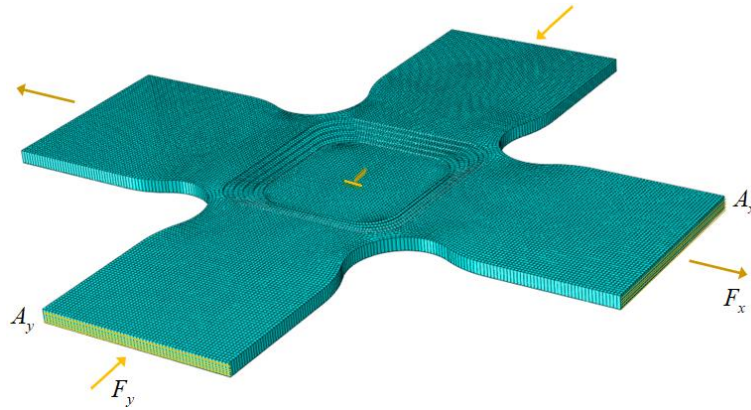


**Máquina biaxial, cuasi-estático,
control en fuerza aplicada**
(4 actuadores electromecánicos sincronizados)



Cálculo de tensiones en zona central

26



$$\sigma_{xx} = \frac{F_x}{A_x} f \quad \sigma_{yy} = \frac{F_y}{A_y} f$$

Laminado $[\pm 45]_{4s}$
M21E/IMA12K con probeta
recomendada

$$f = 3.7$$

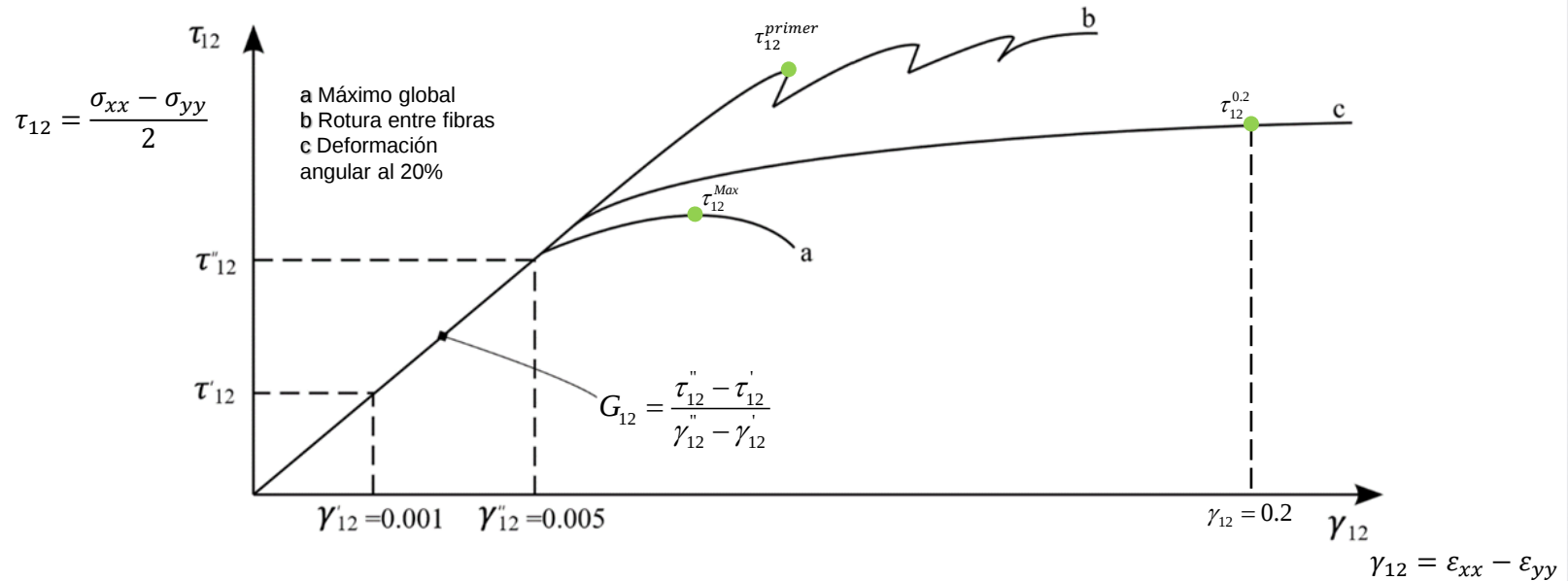
f : Factor **numérico** que relaciona tensión aplicada
con tensión transmitida a la región central

S. Horta, M.C. Serna, Compos. Part B 261 (2023) 110792

MC Serna, JJ López, Compos Sci Technol 72 (2011) 91-96

Curva tensión-deformación. Rigidez y resistencia

27



3. Resultados de aplicación

Campaña de ensayos

29

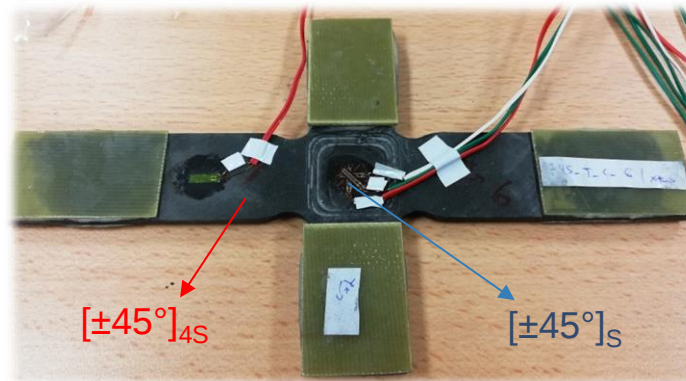
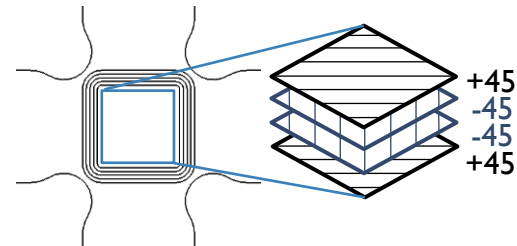
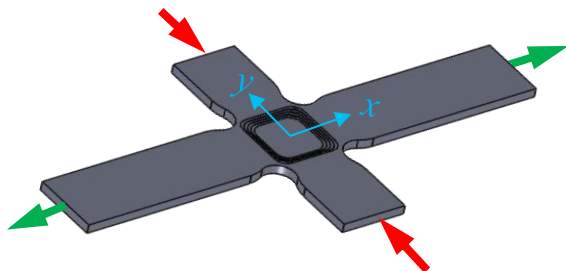
Prepreg CFRP-UD Hexcel® M21E/34%/UD-268/IMA-12K

Laminado en prensa de platos calientes + Mecanizado CNC

Máquina triaxial MICROTTEST MAEFH

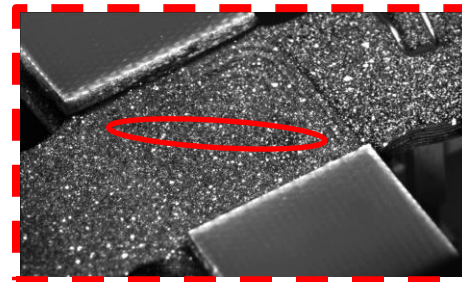
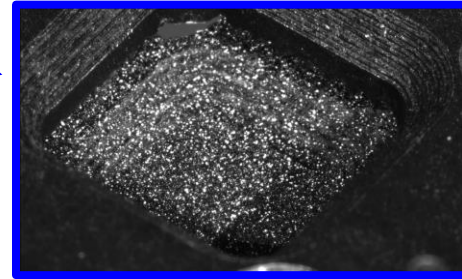
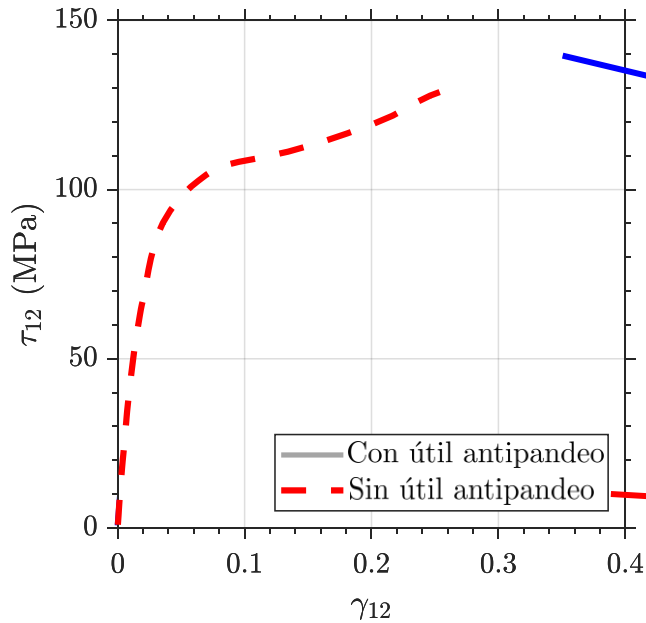
Sistema 3D-DIC LaVision StrainMaster

Caja extensometría KYOWA PCD-300



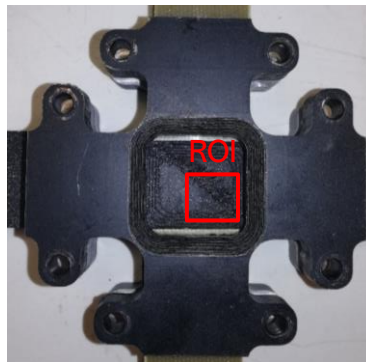
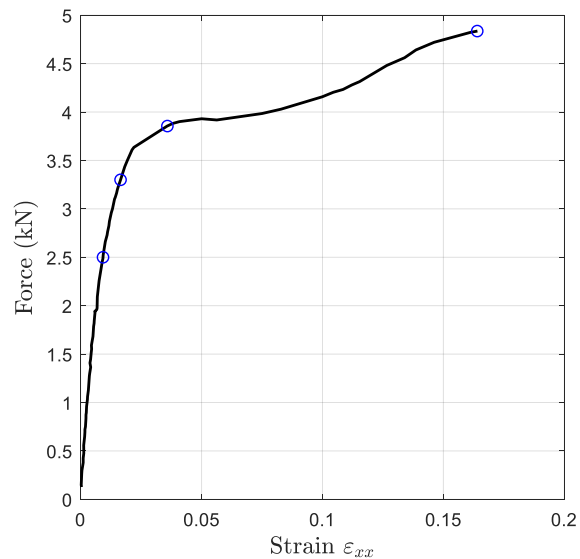
2. Contexto de la caracterización a cortadura

30

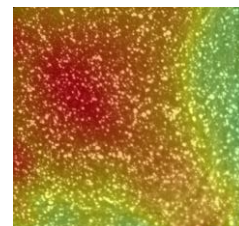


Evolución de la respuesta tracción-compresión

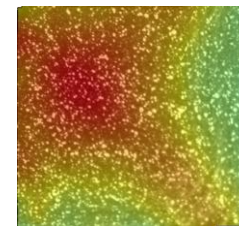
31



52% F_{max}

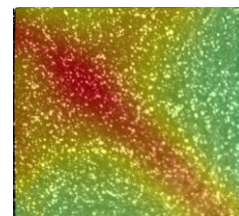


69% F_{max}

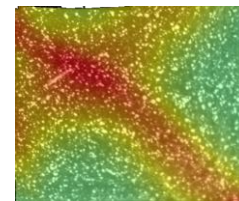


DIC - ϵ_{xx}

79% F_{max}

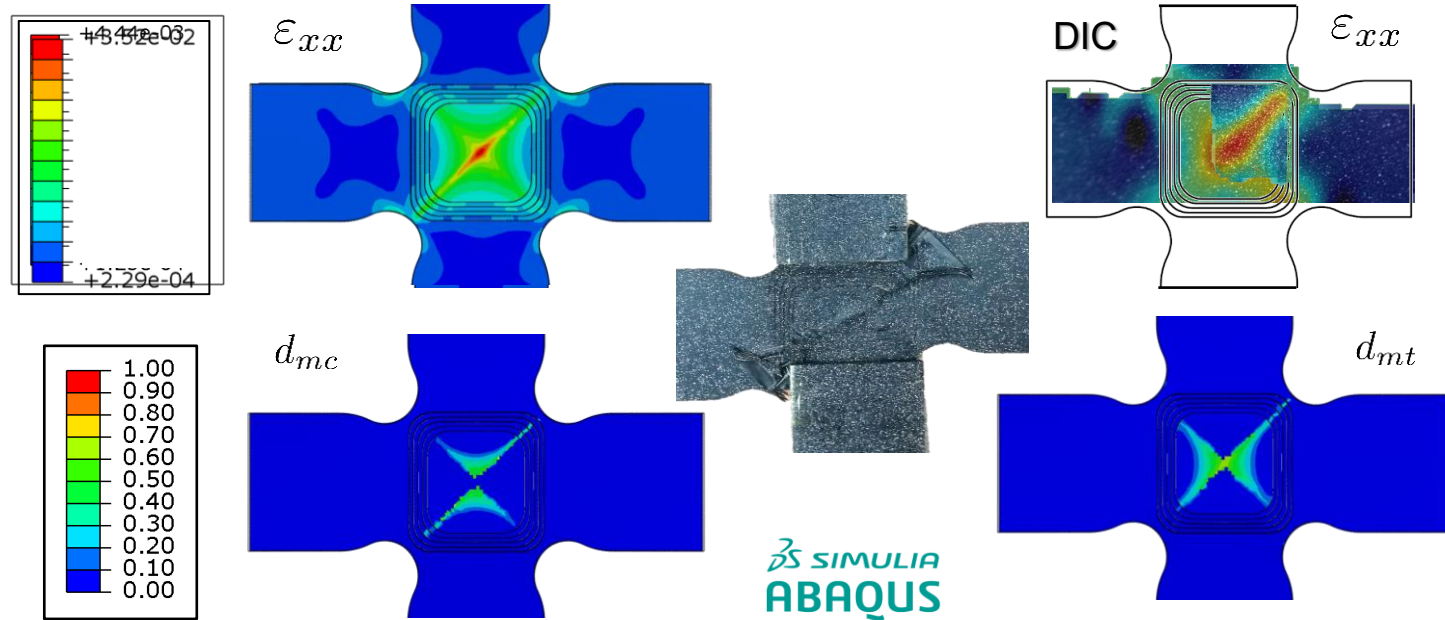


99% F_{max}



Evolución de la respuesta tracción-compresión

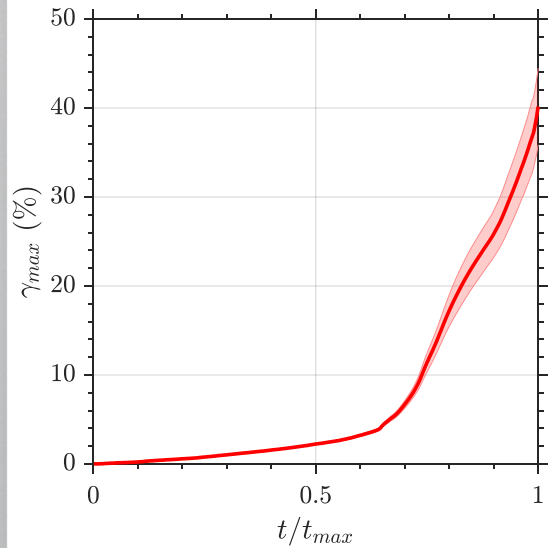
32



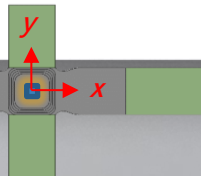
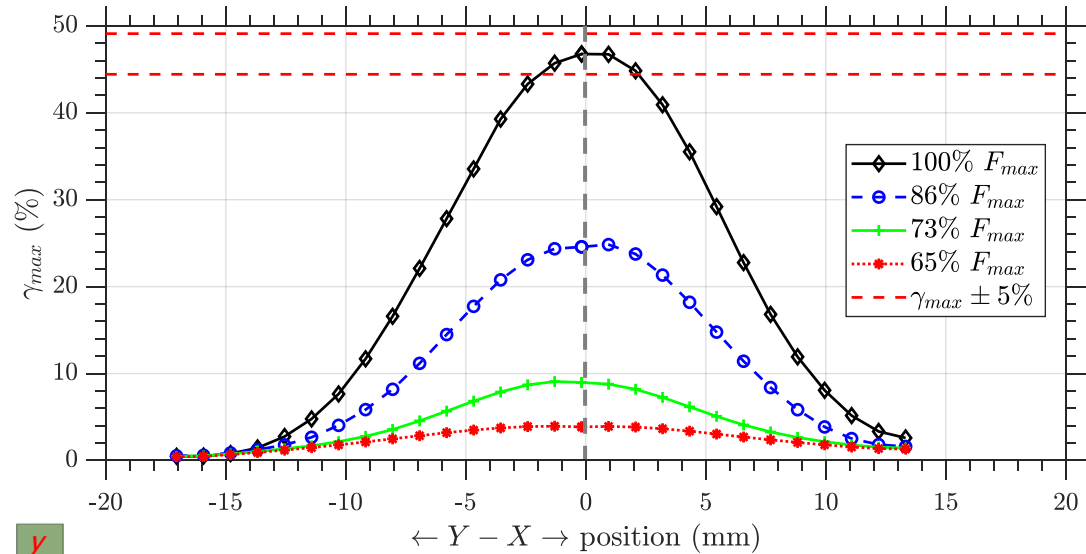
Homogeneidad del campo de deformaciones

33

$\gamma_{\max}$ en ROI (3.5x3.5mm²)

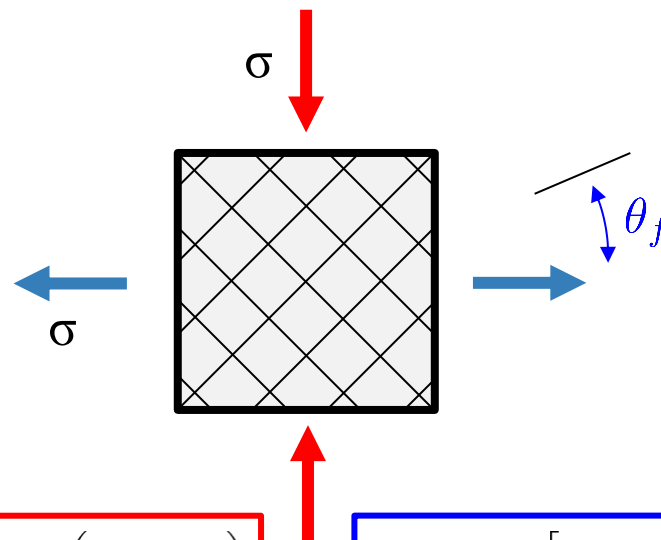
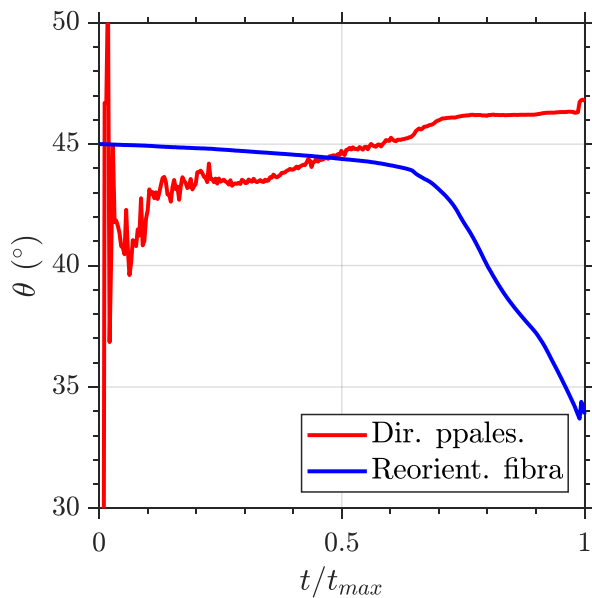


$\gamma_{\max}$ a lo largo de los ejes centrales



Reorientación de fibras

34

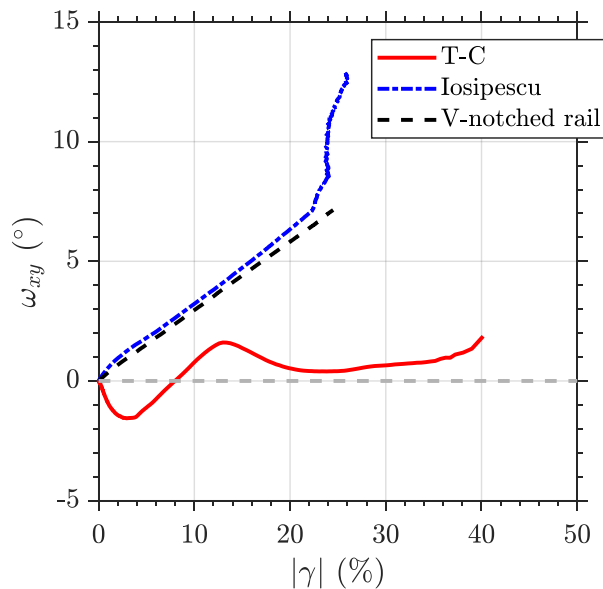


$$\theta_p = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{\gamma_{xy}}{\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy}} \right)$$

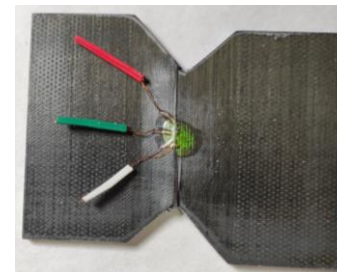
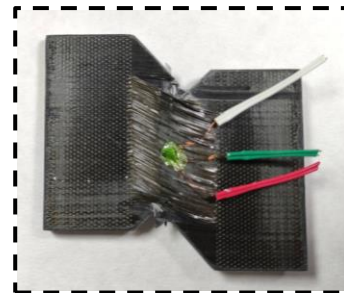
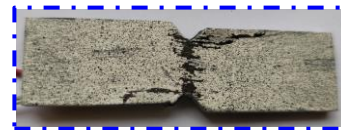
$$\theta_f = \arctan \left[\tan \theta_0 \left(\frac{1 + \varepsilon_{yy}}{1 + \varepsilon_{xx}} \right) \right]$$

Rotación de sólido rígido

35

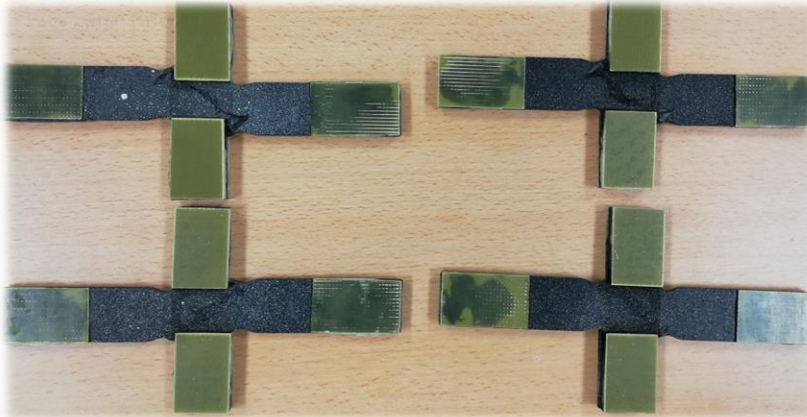


$$\omega_{xy} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \right)$$

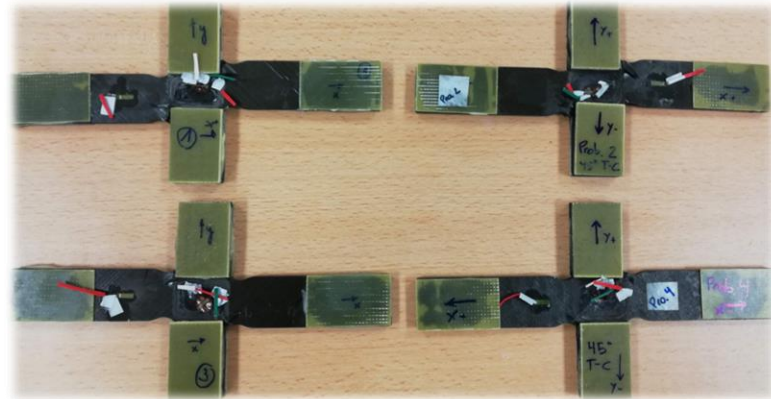


Modo de fallo obtenido

36



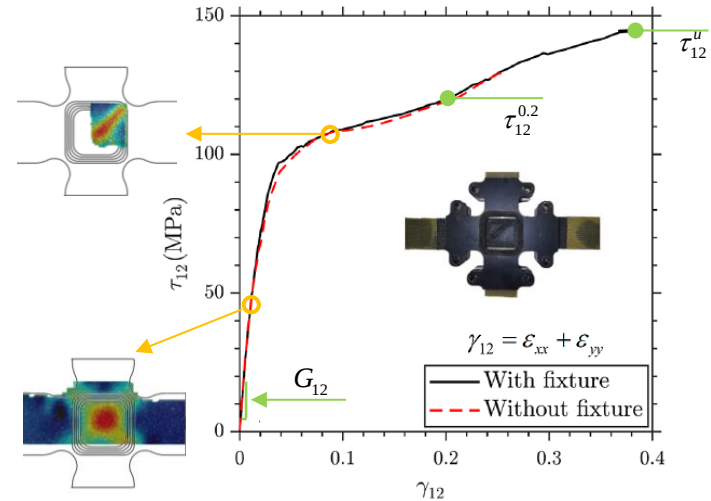
- ✓ Fallo en la diagonal por cortadura
- ✓ No se evidencia inestabilidad en presencia de dispositivo anti-pandeo



Conclusiones

37

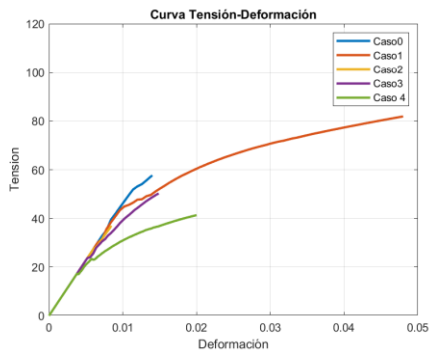
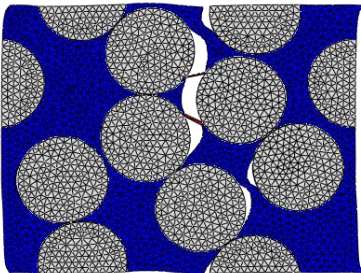
- ✓ Adecuado para determinar tanto rigidez como resistencia a cortadura
- ✓ Alcanza mayores deformaciones angulares que otros ensayos
- ✓ No se evidencia inestabilidad en presencia de dispositivo anti-pandeo
- ✓ En la región de interés:
 - Se obtienen deformaciones homogéneas y medibles
 - No se inducen momentos o componentes no deseadas
- ✗ Necesidad de máquina biaxial o dispositivo
- ✗ Factor de conversión de tensiones



G_{12} (GPa)	$\tau_{12}^{0.2}$ (MPa)	τ_{12}^u (MPa)
5.35 ± 0.14 (2.62%)	115.05 ± 5.44 (4.73%)	130.07 ± 5.25 (4.03%)

S. Horta, M.C. Serna, Composites Part B 261 (2023) 110792

4. Estado actual y futuros pasos



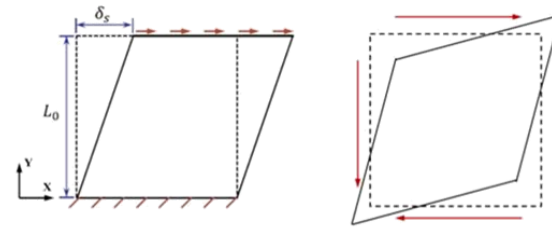
UNE
Normalización Española

ISO | International
Organization for
Standardization

Comparativa entre diferentes metodologías

39

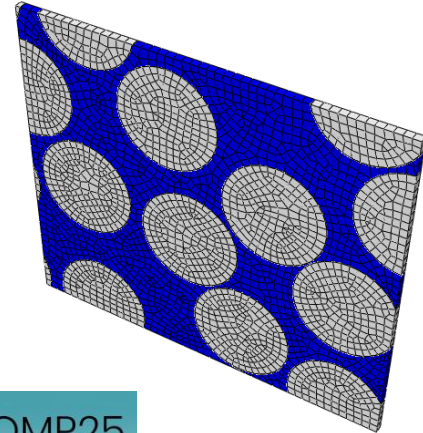
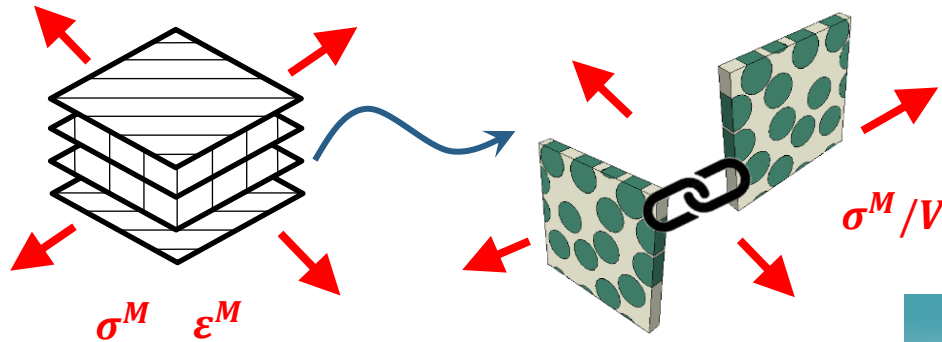
- Todas determinan de manera similar el módulo de cortadura G_{12}
- Los valores de tensión tangencial y deformación angular máxima difieren significativamente
- Diferencia en estado:
cortadura pura vs simple
- Analizar la rotación de sólido rígido y reorientación de fibras



Modelado multi-escala

40

Aproximación microescala (RVEs) pero con enfoque mesoescala al reproducir interacción entre capas con diferente orientación.



Composites Part B 261 (2023) 110792



Contents lists available at [ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com)

Composites Part B

journal homepage: www.elsevier.com/locate/composites



Tension–compression biaxial test with $\pm 45^\circ$ symmetric angle-ply laminates for determining the pure shear response in principal material directions of a lamina

S. Horta Muñoz*, M.C. Serna Moreno

Universidad de Castilla-La Mancha, Escuela de Ingeniería Industrial y Aeroespacial de Toledo, Instituto de Investigación Aplicada a la Industria Aeronáutica, Av. Carlos III, Campus Fábrica de Armas, Toledo, 45004, Spain



Más detalles...

Agradecimientos



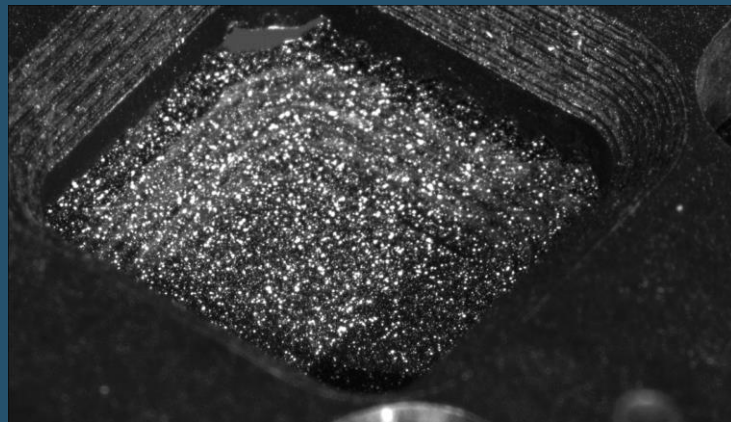
42



Castilla-La Mancha

- ✓ Programa Estatal Retos: Estructuras de materiales COMPuestos reforzados con fibra ante cargas MULTiaxiales(COMMUL) - DPI2016-77715-R
- ✓ Programa Prueba de Concepto: Hacia la normalización del ensayo biaxial tracción-compresión para determinar propiedades mecánicas ante estados de cortadura pura en el plano (BISHEAR) – PDC2021-121154-I00.
- Programa Generación de Conocimiento: REspuesta NO-lineal gobernada por la cortadura en materiales compuestos considerando cargas biaxiales y el efecto de radiación ionizante (RENO) – PID2022-137387OB-I00
- Ayuda Regional JCCM: Profundización en la respuesta a CORTadurA de materiales compuestos estructurales (CORA) - SBPLY/23/180225/000114

Sergio Horta Muñoz
Profesor Titular de Universidad
Sergio.Horta@uclm.es



**MUCHAS
GRACIAS**

