

S. Horta Muñoz, M.C. Serna Moreno

^a Universidad de Castilla-La Mancha, Escuela de Ingeniería Industrial y Aeroespacial de Toledo,
Instituto de Investigación Aplicada a la Industria Aeronáutica, 45004 Toledo, España

Estudio de la respuesta no lineal ante diferentes estados de carga multiaxiales en laminados de matriz polimérica reforzados con fibra

RESUMEN

Historia del artículo:

Recibido 8 de Septiembre de 2021

En la versión revisada 30 de Septiembre de 2021

Aceptado 7 de Octubre de 2021

Accesible online 14 de Octubre de 2021

Palabras clave:

Biaxial

Angle-ply

Pseudoductilidad

Tracción/Compresión

Modelado numérico

El presente trabajo recoge un resumen de la tesis doctoral titulada "Complexity of the structural response of fibre reinforced polymer matrix composites". Dicha tesis se centra en analizar la respuesta mecánica no lineal de un conjunto de secuencias de laminados, con principal interés en los laminados angle-ply, para detallar su comportamiento mecánico ante diferentes casos de carga: tracción uniaxial, compresión uniaxial, flexión de tres puntos, ensayos cíclicos de carga-descarga-recarga a tracción, y ensayos ante estados biaxiales planos comprendiendo cargas de tracción y compresión. Se persigue profundizar en los mecanismos de acople y daño, así como en su influencia en el comportamiento mecánico, en algunos casos altamente no lineal, buscando lograr que el material soporte grandes deformaciones, con el consecuente retraso del fallo final y el aumento de su capacidad de absorber energía. Gracias a la caracterización mediante ensayos estándar es posible calibrar modelos de material basados en leyes de daño progresivo, aportando dos enfoques numéricos diferentes que son testados ante los diferentes estados de tensión plana generados experimentalmente. Además, cabe destacar los ensayos biaxiales sobre probetas cruciformes ante diferentes ratios de carga, que aportan datos experimentales más próximos al comportamiento real de estructuras de material compuesto en servicio. Estos ensayos, debido a su mayor complejidad y falta de estandarización, son analizados en detalle aplicando simulaciones numéricas y modelos analíticos que permiten asegurar la validez de los resultados, remarcando las posibles inestabilidades generadas en presencia de cargas de compresión.

On the nonlinear response under several multiaxial loading states in fibre reinforced polymer laminates

ABSTRACT

Keywords:

Biaxial

Angle-ply

Pseudo-ductility

Tension/Compression

Numerical modelling

The present work includes a summary of the doctoral thesis entitled "Complexity of the structural response of fibre reinforced polymer matrix composites". This PhD thesis focused on analyzing the nonlinear mechanical response of a set of stacking sequences, with main interest in angle-ply laminates, to detail the stress-strain behaviour under a range of loading states: uniaxial tension/compression, loading-unloading-reloading tensile tests, three-point bending and plane stress states. The aim is to delve into the mechanisms of coupling and damage and their influence on the mechanical behaviour, in some cases highly nonlinear, aiming to achieve that the material withstands large strains with the consequent delay of the final failure and the increase in energy absorption capacity. Thanks to the characterization through standard testing, it is possible to calibrate material models based on progressive damage, providing two different numerical approaches which are tested against the different experimentally generated states of plane stress. In addition, it is worth mentioning the biaxial tests on cruciform specimens under different loading ratios, which provide experimental data closer to the actual response of composite structures in service. These tests, due to their greater complexity and lack of standardization, are analyzed in detail by applying numerical simulations and analytical models that ensure the validity of the results, highlighting the possible instabilities generated in the presence of compressive loads.

1 Introducción

Los laminados de material compuesto de matriz polimérica reforzada con fibra (FRP) han proporcionado en las últimas décadas una alternativa a tener en cuenta al optimizar diseños estructurales en los que las propiedades mecánicas son exigentes y el peso es un factor de diseño crítico. La combinación de dos materiales de naturaleza muy diferente provoca una compleja respuesta mecánica del material, que se puede plantear desde dos puntos de vista diferentes. En primer lugar, la presencia de fibras con cierta orientación produce una anisotropía inherente a la lámina de material reforzado, dando lugar a una respuesta mecánica dependiente de la dirección. En segundo lugar, la heterogeneidad y gran diferencia en las propiedades de los constituyentes de los materiales compuestos provoca la aparición de diferentes modos de fallo.

A pesar de sus ventajas, a día de hoy todavía existe cierta incertidumbre en la respuesta mecánica de estos materiales, siendo necesario desarrollar estudios con el fin de optimizar su diseño y aplicación. En el caso de laminados compuestos por láminas con fibras dispuestas unidireccionalmente, estos se emplean mayoritariamente en aplicaciones con elevadas sollicitaciones estructurales, lo que hace necesario un conocimiento detallado de su respuesta mecánica en situaciones de carga complejas. La enorme variedad de disposiciones, configuraciones y métodos de fabricación para laminados de FRP que existen en la actualidad lleva a los diseñadores a considerar un número muy elevado de posibilidades con el fin de aumentar la eficiencia estructural.

Deben tenerse en cuenta aspectos tradicionales como la rigidez y resistencia o criterios como la estabilidad ante diferentes situaciones de carga. La complejidad de estos estudios llevó a iniciar diversas líneas de investigación persiguiendo la caracterización experimental y el desarrollo de teorías que recojan el comportamiento de cualquier laminado, las cuales siguen planteando cuestiones sin resolver a pesar de los esfuerzos de numerosos investigadores, como se puede ejemplificar con los "World-Wide Failure Exercises" [1-3].

Una de las principales incógnitas planteadas en la investigación de materiales compuestos estructurales es la capacidad de estimar el comportamiento de los componentes en servicio, lo cual involucra en numerosos casos estados de carga multiaxiales. La disposición habitual de laminados en estructuras con pequeños espesores puede simplificar su estudio a un caso de tensión plana, siendo aún necesaria la caracterización mecánica ante combinación de las tres componentes de tensión en el plano, por lo que un punto intermedio entre los ensayos estandarizados de propiedades y el diseño de estructuras finales se encuentra en los ensayos antes cargas biaxiales. Entre las diferentes metodologías existentes [4-15], cada una de las cuales plantea una serie de ventajas e inconvenientes, cabe destacar los resultados obtenidos mediante probetas cruciformes, consistentes en introducir cargas en dos direcciones perpendiculares contenidas en un plano, generando en la zona central un estado de tensión biaxial controlado por el ratio de cargas aplicadas y la geometría del espécimen [5-8,10,12-15].

Además, la absorción de energía, el retraso del inicio del daño, la alteración de los mecanismos de fallo o su aparición controlada podría ajustarse mediante la modificación del laminado, buscando por ejemplo evitar la rotura catastrófica. En este sentido, recientes estudios [16-20] persiguieron generar una respuesta denominada pseudo-dúctil, teniendo en cuenta el comportamiento eminentemente frágil de la lámina en las direcciones principales del material ante cargas de tracción o compresión. No obstante, un estado de tensión/deformación tangencial en las direcciones principales de material contenidas en el plano de la lámina puede dar lugar a un comportamiento altamente no lineal, que varía en función de los constituyentes concretos de la lámina, y que conlleva en ocasiones una rigidización aparente del laminado debida la reorientación de las fibras permitida por la gran deformación angular sostenida por la matriz polimérica. Este estado puede ser generado ante cargas uniaxiales en caso de laminados angle-ply, siendo su efecto máximo en el caso de laminados con capas dispuestas a $\pm 45^\circ$ respecto a las direcciones de carga. Este fenómeno pseudo-dúctil ha sido analizado por diferentes autores principalmente ante cargas de tracción uniaxial [16-20] y, en menor medida, ante cargas de compresión [20,21], siendo necesario profundizar en los mecanismos que rodean este fenómeno ante otros estados de carga.

El presente artículo resume los resultados de la tesis doctoral titulada "Complexity of the structural response of fibre reinforced polymer matrix composites", realizada por S. Horta Muñoz y dirigida por M.C. Serna Moreno [22]. En esta tesis doctoral se profundiza en el estudio analítico, numérico y experimental de secuencias de apilamiento de interés industrial, principalmente laminados angle-ply debido a la aparición de un comportamiento altamente no lineal asociado a diferentes mecanismos de daño, reorientación de las fibras y plasticidad. Como puntos a destacar de esta tesis, se han realizado ensayos uniaxiales y biaxiales sobre probetas cruciformes antes diversos estados de tensión/deformación, combinando diferentes ratios de carga tanto a tracción como a compresión, de forma que se realiza un barrido sobre un rango representativo de un estado genérico de tensión plana. Además, el trabajo también incluye el comportamiento ante cargas de flexión, generando por tanto una distribución de tensiones de tracción y compresión en diferentes puntos de la sección.

2 Metodología

El trabajo realizado a lo largo de esta tesis se centra en la caracterización mecánica de una matriz epoxi reforzada con fibras de carbono unidireccionales de la empresa Hexcel®. Se presenta en forma de rollo de preimpregnado con la designación comercial M21E/34%/UD268/IMA-12K, cedido generosamente por Airbus Group. El material es laminado manualmente siguiendo diferentes secuencias de interés, y seguidamente curado en una prensa de platos calientes.

En lo que respecta a las campañas de ensayos experimentales, para mantener la consistencia de los resultados, todos los ensayos cuasiestáticos realizados en esta tesis se llevan a cabo empleando una máquina triaxial electromecánica MICROTTEST MAEFH (Figura 1). Este equipo singular dispone de seis actuadores sincronizados en un búcle



cerrado, y se encuentran equipados con mordazas de agarre neumáticas. Cada actuador es accionado por un motor eléctrico independiente, permitiendo la aplicación controlada de carga hasta 50 kN por actuador. Se efectúan ensayos de tracción y compresión uniaxial, tanto sobre laminados habituales para caracterización de propiedades en direcciones principales de la lámina (laminados unidireccionales a 0° y 90°), laminados con secuencias de interés (principalmente angle-ply con diferentes ángulos de fibra), así como ensayos a flexión. No obstante, los ensayos más destacables son los biaxiales sobre probetas cruciformes, trabajando con diferentes secuencias cross-ply y angle-ply ante diferentes ratios de carga. Cabe indicar que la notación empleada para estos ensayos se definirá en adelante por el sentido de las cargas aplicadas en las dos direcciones, bien tracción (T) o compresión (C), y el ratio entre las fuerzas aplicadas en estas dos direcciones. Por ejemplo, T-T 2/1 implicaría cargas de tracción en ambos ejes, siendo de doble magnitud en uno de ellos. Estos ensayos carecen de una normativa específica (salvo en el caso particular de metales [23]), por lo que la geometría de probeta y las condiciones de ensayo son tomadas de estudios previos [12-15]. Sin embargo, los ensayos T/T y C/C presentan el inconveniente de la aparición de concentraciones de tensiones fuera de la zona de medición del estado biaxial, induciendo un fallo temprano e invalidando, en ocasiones, el valor de resistencia biaxial obtenido, si bien el trabajo mostrado se centra en el estudio de la respuesta previa al fallo.

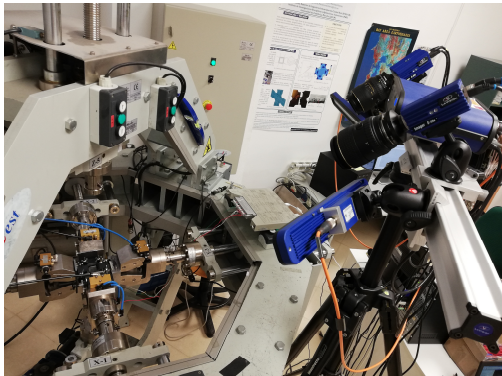


Figura 1. Instalación experimental durante la realización de un ensayo de compresión-compresión biaxial.

Con la intención de obtener una medición precisa del comportamiento mecánico del material en determinados puntos, se aplican diferentes técnicas de medición de deformaciones: galgas extensométricas de película, extensómetro axial y un sistema Correlación Digital de Imagen 3D (DIC).

Adicionalmente, se realizan comprobaciones analíticas basadas en la Teoría Clásica de Placas Laminadas (CLPT), con el fin principal de valorar la adecuación de esta teoría a la estimación de propiedades elásticas de las diferentes secuencias de laminado, así como el desarrollo de nuevas estimaciones del efecto de los términos de acople flexión-torsión en el comportamiento a flexión (tanto en el rango elástico como en efectos no lineales) y en la estabilidad ante cargas de compresión en el plano.

Finalmente, en el aspecto numérico se desarrollan simulaciones basadas en el Método de los Elementos Finitos (FEM) empleando el software comercial Abaqus®, con el fin

de corroborar la aplicación de dos modelos de material basados en daño progresivo (PDM). Concretamente, se analiza el modelo aplicado al daño de FRP incluido en el propio software y basado en el criterio de fallo de Hashin-Rotem [24,25], así como un modelo de material que combina la evolución de deformación permanente y de daño, basado en la teoría desarrollada por Ladevèze y Le Dantec [26], partiendo del trabajo realizado por el grupo "Mechanics of Materials and Structures" de la Ghent University [27]. Ambos modelos son calibrados en base a resultados experimentales sobre ensayos uniaxiales, y aplicados al análisis del ensayo biaxial sobre probetas cruciformes.

3 Resultados

Se resume en esta sección los principales resultados obtenidos en la tesis doctoral. En primer lugar, se realizó una campaña de ensayos uniaxiales con el fin de caracterizar las propiedades elásticas y resistentes de la lámina, así como recoger la respuesta no lineal ante un estado uniaxial sobre laminados angle-ply. En lo que respecta a estos ensayos, los ensayos de tracción se realizan siguiendo la normativa ASTM D3039 y D3518 [28, 29], mientras que, en el caso de ensayos de compresión, tras una revisión de la amplia normativa existente para dichos ensayos de caracterización [30-33], se recurrió al uso de la norma ASTM D695 [33]. Debido a las dificultades de conseguir modos de fallo adecuados, con problemas como el aplastamiento en los extremos o el pandeo de la probeta (Figura 2), se investigaron diferentes posibilidades de espesor de laminados, así como el uso o no de end-tabs con diferentes espesores. Se hizo un detallado estudio de la secuencia $[\pm 45]_{nS}$ por ser la que maximiza el estado tangencial sobre las direcciones principales de la lámina, incluyendo ensayos con ciclos de carga-descarga-recarga, con el fin de detallar los mecanismos de deformación permanente y degradación de rigidez aparente asociados al comportamiento a cortadura del material. Estos resultados se detallan en [34].

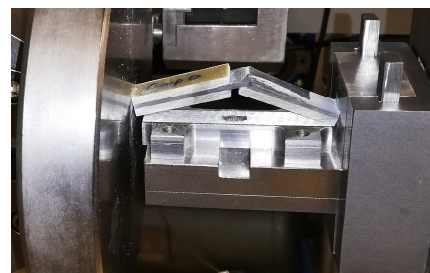


Figura 2. Rotura por pandeo de una probeta con laminado $[0]_s$ comprimida uniaxialmente.

Esta campaña experimental sirvió de base para comprobar la posible aplicación de dos modelos de material mesomecánicos basados en daño progresivo. Por un lado, el modelo basado en el criterio de iniciación de Hashin [24,25] permite recoger las tres etapas de comportamiento diferenciado visualizadas en los ensayos de tracción y compresión uniaxial sobre laminados $[\pm 45]_{nS}$. Por otro lado, una subrutina UMAT basada en el trabajo de Ladevèze y Le Dantec [26] aporta un mayor detalle de los mecanismos de iniciación del daño y deformación permanente, pero resulta inadecuada para modelar el comportamiento del material en



las fases previas al fallo final. Por tanto, el modelo de Hashin es escogido para aportar una mayor comprensión sobre el estado tenso-deformacional de la zona cargada biaxialmente en probetas cruciformes ante diferentes cargas de tracción y compresión. En los trabajos [35-37] se mostró la validez de estos resultados en comparación con los mapas de deformación obtenidos mediante DIC, destacando la presencia de comportamientos con diferentes grados de no linealidad en la relación tensión-deformación en diferentes zonas de la probeta cruciforme.

Siguiendo con la línea de la caracterización de la respuesta biaxial, laminados $[0,90]_s$, $[\pm 45]_s$, $[\pm 56.3]_s$ y $[\pm 33.6]_s$ son ensayados ante diferentes ratios de carga. La elección de un laminado cross-ply y varios angle-ply es motivada por la significativa diferencia en la respuesta tensión-deformación obtenida incluso ante estados de carga similares. Las dos primeras secuencias de laminado son de frecuente aplicación, mientras que las dos últimas son escogidas con el fin de comprobar la necesidad de adaptación de la geometría de probeta cruciforme a la secuencia de laminado de estudio y al estado de cargas aplicado, siguiendo los resultados obtenidos en estudios previos con materiales con comportamiento cuasi-isótropo [12-13]. De esta campaña de ensayos singulares se extraen conclusiones que permiten profundizar en los mecanismos de daño y elevada deformación existente en estos laminados, a la vez que se extraen recomendaciones sobre la metodología de ensayo biaxial. En esta línea cabe destacar dos logros, por un lado, la comprobación de la validez del ensayo tracción-compresión (T-C) para la caracterización a cortadura del material, al generar un estado tangencial puro en direcciones principales del material, provocando un modo de fallo adecuado (Figura 3), y resultando en una metodología que podría evitar tensiones no deseadas frecuentemente ineludibles en ensayos estandarizados de cortadura [29,38-40]. Por otro lado, basándose en un estudio analítico-numérico sobre la inestabilidad elástica ante cargas de compresión en placas laminadas, descrito en [37,41], se establecieron diferentes recomendaciones para los ensayos biaxiales ante cargas de compresión (T-C y C-C), con el fin de evitar en la medida de lo posible la aparición de pandeo, destacando el diseño y fabricación de un dispositivo anti-pandeo específicamente proyectado para ensayos biaxiales con probetas cruciformes [42].



Figura 3. Detalle de la región central de una probeta cruciforme con laminado $[\pm 45]_s$ tras el ensayo biaxial T-C.

En lo que respecta al comportamiento ante esfuerzos de flexión en laminados angle-ply, los trabajos [43-44] recogen un estudio enfocado en el efecto de los acoples flexión-torsión,

modelando analíticamente la diferencia en el comportamiento a tracción y compresión de la lámina mediante la combinación de la técnica de la sección homogeneizada y la CLPT, validando las estimaciones con los campos de deformación obtenidos en el espesor mediante DIC. Además, se realiza una optimización con el fin de maximizar la respuesta pseudo-dúctil de laminados con capas dispuestas a $\pm 45^\circ$. Estos trabajos son continuados en la tesis doctoral, ampliando el modelado analítico con estimaciones de la rigidez aparente a flexión en función del grado de acople del laminado, y ensayando otras secuencias de interés: las obtenidas de la optimización realizada en [43], así como secuencias también estudiadas ante cargas biaxiales en el plano, esto es, $[\pm 56.3]_{2s}$ y $[\pm 33.6]_{2s}$, mostrando capacidades de supresión del daño y mecanismos de fallo (Figura 4) con diferencias significativas respecto a los obtenidos en ensayos en el plano.



Figura 4. Probeta con laminado $[\pm 33.7]_{2s}$ ensayada a flexión de tres puntos.

A modo de resumen de los resultados principales de la tesis, la Figura 1 recoge una comparación cualitativa de la respuesta, en términos de tensión-deformación aparente del laminado, de laminados simétricos formados por capas orientadas a 45° ante diferentes estados de carga. Se omiten los ejes numéricos de la figura para mejor visualización, si bien todas las curvas se representan a la misma escala.

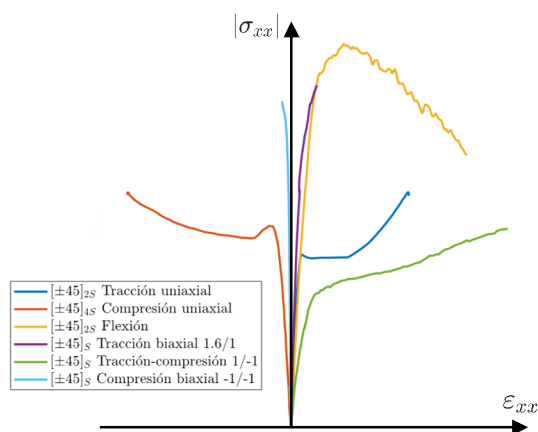


Figura 5. Comparación de curvas tensión-deformación ante diferentes estados de carga. Los estados de carga biaxial se acompañan en la leyenda de los ratios en tensión central entre las direcciones perpendiculares.

Con esta figura se persigue resumir la diferencia significativa en comportamiento mecánico observado ante diferentes estados de carga cuasi-estáticos sobre laminados semejantes, tanto en valores de rigidez, como resistencia o deformación alcanzados, así como la aparición o no de etapas con un comportamiento característico. Cabe señalar que los diferentes números de capas escogidos tienen un fin comparativo con otros ensayos en la tesis, pudiendo afectar en cierta medida a la respuesta no lineal obtenida, como se detalla en [43], si bien el estudio cualitativo entre estados de



carga seguiría arrojando resultados similares a los obtenibles con una única secuencia de laminado. Detallando la figura, se observa por ejemplo como los estados de tracción y compresión biaxial mostrados, con diferentes ratios de carga entre las dos direcciones, muestran un comportamiento predominantemente lineal hasta el fallo, con una elevada rigidez aparente, mientras el resto de ensayos presentan una significativa no linealidad, alcanzando las mayores deformaciones en el caso del ensayo biaxial tracción-compresión, debido al ya mencionado estado de tensiones tangenciales puras en direcciones principales de material a nivel de la lámina.

4 Conclusiones y estudios futuros

A modo de conclusión, cabe enfatizar el amplio abanico de ensayos realizados sobre secuencias similares, que permite subrayar el interés sobre la complejidad de la respuesta de laminados y su elevada dependencia con el estado de cargas, sobre todo en presencia de estados multiaxiales, haciendo especial énfasis en su respuesta ortótropa y dependiente de la tracción y compresión, con un análisis de los numerosos mecanismos de daño y fallo obtenidos. En líneas generales, se ha buscado establecer una base para la caracterización multiaxial, acompañada de herramientas analíticas y numéricas, que asistan en el conocimiento de la respuesta altamente no lineal del material. Esto podría resultar en un mayor aprovechamiento de estos materiales compuestos en aplicaciones donde la monitorización del daño debido a elevadas sollicitaciones estructurales resulta fundamental.

Como estudios futuros a la tesis, se plantean la mejora de los modelos numéricos desarrollados durante la tesis, incluyendo un modelado preciso de las deformaciones permanentes y reorientaciones de fibra, que puede ser logrado siguiendo con un enfoque mesomecánico del material, o bien profundizando en el comportamiento micromecánico, incluyendo así los mecanismos de daño y fallo a nivel de constituyentes. Otra de las líneas de trabajo originadas por esta tesis con el fin de caracterizar la respuesta multiaxial de laminados $\pm 45^\circ$ es la introducción de estados multiaxiales a partir de cargas fuera del plano, que ya se ha recogido en una publicación [45] posterior a la tesis doctoral. En este trabajo, además de inducir un estado multiaxial sobre el laminado de forma cuasi-estática, en este caso a través de cargas de flexión sobre una placa apoyada en un contorno circular, se comparó este resultado con un estado equivalente dinámico mediante un impacto de baja velocidad sobre una probeta con misma geometría y condiciones de contorno, evaluando así el efecto de la velocidad de deformación en el estado multiaxial de tensión/deformación.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad mediante el proyecto de referencia DPI2016-77715-R. S. Horta Muñoz agradece la financiación recibida a través de la ayuda predoctoral SBPLY/16/180501/000263, cofinanciada por la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha y el Fondo Social Europeo, y la ayuda 2020/3771, cofinanciada por la Universidad de Castilla-La Mancha y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional.

Referencias

- [1] M. Hinton, P. Soden, *Composites Science and Technology*, **58**, pág. 1001-1010 (1998).
[https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(98\)00074-8](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(98)00074-8)
- [2] M. Hinton, A.S. Kaddour, P. Soden, *Composites Science and Technology*, **62**, pág. 1481-1488 (2002).
[https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(02\)00094-5](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(02)00094-5)
- [3] P. D. Soden, A.S. Kaddour, M. Hinton, *Composites Science and Technology*, **64**, pág. 589-604 (2004).
[https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(03\)00228-8](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(03)00228-8)
- [4] M. Arcan, Z. Hashin, A. Voloshin, *Experimental Mechanics*, **18**, pág. 141-146 (1978).
<https://doi.org/10.1007/BF02324146>
- [5] A. Makinde, L. Thibodeau, K.W. Neale, *Experimental Mechanics*, **32**, pág. 138-144 (1992).
<https://doi.org/10.1007/BF02324725>
- [6] J. S. Welsh, D. F. Adams, *Experimental Mechanics*, **40**, pág. 312-320 (2000).
<https://doi.org/10.1007/BF02327505>
- [7] A. Smits, D. Van Hemelrijck, T.P. Philippidis, A. Cardon, *Composites Science and Technology*, **66**, pág. 964-975 (2006).
<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2005.08.011>
- [8] E. Lamkanfi, W. Van Paepegem, J. Degrieck, *Polymer Testing*, **41**, pág. 7-16 (2014).
<https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2014.09.016>
- [9] M. Quaresimin, P.A. Carraro, *Composites Part B: Engineering*, **54**, pág. 200-208 (2013).
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.05.014>
- [10] W.J. Vankan, B.H.A.H. Tijs, G.J. de Jong, H.C. de Frel, *Journal of Composite Materials*, **50**, pág. 3477-3500 (2016).
<https://doi.org/10.1177/0021998314555043>
- [11] T. Laux, K.W. Gan, J.M. Dulie-Barton, O.T. Thomsen, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **133**, 105864 (2020).
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.105864>
- [12] M.C. Serna Moreno, J.J. López Cela, *Composites Science and Technology*, **72**, pág. 91-96 (2011).
<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2011.10.005>
- [13] M.C. Serna Moreno, J.L. Martínez Vicente, J.J. López Cela, *Composite Structures*, **103**, pág. 27-33 (2013).
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.03.019>
- [14] M.C. Serna Moreno, J.L. Curiel-Sosa, J. Navarro-Zafra, J.L. Martínez Vicente, J.J. López Cela, *Composite Structures*, **119**, pág. 264-271 (2015).
<http://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.08.030>
- [15] M.C. Serna Moreno, J.L. Martínez Vicente, *Composite Structures*, **122**, pág. 440-444 (2015).
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.12.018>
- [16] C.T. Herakovich, R. Schroedter, A. Gasser, L. Guitard, *Composites Science and Technology*, **60**, pág. 2781-2789 (2000).
[https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(00\)00091-9](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(00)00091-9)
- [17] W. Van Paepegem, I. De Baere, J. Degrieck, *Composites Science and Technology*, **66**, pág. 1455-1464 (2006).
<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2005.04.014>
- [18] J.D. Fuller, M.R. Wisnom, *Composites Part A*, **69**, pág. 64-71 (2015).
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.11.004>



- [19] J.D. Fuller, M.R. Wisnom, *Composites Part A*, **107**, pág. 31-38 (2018).
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.12.020>
- [20] H. Cui, D. Thomson, A. Pellegrino, J. Wiegand, N. Petrinic, *Composites Science and Technology*, **135**, pág. 106-115 (2016).
<http://doi.org/10.1016/j.compscitech.2016.09.016>
- [21] X. Wu, J.D. Fuller, M. R. Wisnom, *Composites Science and Technology*, **199**, 108377 (2020).
<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2020.108377>
- [22] S. Horta Muñoz, Complexity of the structural response of fibre reinforced polymer matrix composites, Tesis Doctoral, Universidad de Castilla-La Mancha, (2020).
<http://hdl.handle.net/10578/28223>
- [23] ISO 16842:2014. Metallic materials - Sheet and strip - Biaxial tensile testing method using a cruciform test piece (2014).
- [24] Z. Hashin, A. Rotem, *Journal of Composite Materials*, **7**, pág. 448-464 (1973).
<https://doi.org/10.1177/002199837300700404>
- [25] I. Lapczyk, J.A. Hurtado, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **38**, pág. 2333-2341 (2007).
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2007.01.017>
- [26] P. Ladevèze, E. Le Dantec, *Composites Science and Technology*, **43**, pág. 257-267 (1992).
[https://doi.org/10.1016/0266-3538\(92\)90097-M](https://doi.org/10.1016/0266-3538(92)90097-M)
- [27] D. Garoz, F.A. Gilabert, R.D.B. Sevenois, S.W. Spronk, W. Van Paeppegem, *Composite Structures*, **181**, pág. 391-404 (2017).
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.08.099>
- [28] ASTM D3039/D3039-17. Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials (2017).
- [29] ASTM D3518/D3518M-13. *Test Method for In-Plane Shear Response of Polymer Matrix Composite Materials by Tensile Test of $\pm 45^\circ$ Laminate* (2013).
- [30] ASTM D6641/D6641M-16e1. Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials Using a Combined Loading Compression (CLC) Test Fixture" (2016).
- [31] ISO 14126:1999. Fibre-reinforced plastic composites - Determination of compressive properties in the in-plane direction (1999).
- [32] ASTM D3410/D3410M-16. Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials with Unsupported Gage Section by Shear Loading (2016).
- [33] ASTM D695-15, Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics (2015).
- [34] M.C. Serna Moreno, S. Horta Muñoz, Pseudo-ductile effects in $\pm 45^\circ$ angle-ply CFRP laminates under uniaxial loading: compression and cyclic tensile test, artículo en revisión.
- [35] S. Horta Muñoz, M.C. Serna Moreno, J.L. Martínez Vicente, *Experimental and numerical study of $\pm 45^\circ$ angle-ply CFRP laminates under tensile-tensile biaxial loads*. ICCS20, París (2017).
- [36] S. Horta Muñoz, M.C. Serna Moreno, *Numerical modelling of the pseudo-ductility effect in $\pm 45^\circ$ angle-ply laminates under biaxial loading*, ECCM18, Atenas (2018).
- [37] S. Horta Muñoz, M.C. Serna Moreno, *Materiales Compuestos*, **4**, pág. 77-83 (2020).
<https://revista.aemac.org/materiales-compuestos/article/view/245>
- [38] ASTM D5379/D5379M-12. *Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method* (2012).
- [39] ASTM D4255/D4255M-15. *Test Method for In-Plane Shear Properties of Polymer Matrix Composite Materials by the Rail Shear Method* (2015).
- [40] ASTM D7078/D7078M-12. *Test Method for Shear Properties of Composite Materials by V-Notched Rail Shear Method* (2012).
- [41] M.C. Serna Moreno, S. Horta Muñoz, *Composite Structures*, **234**, 111697 (2020).
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111697>
- [42] M.C. Serna Moreno, S. Horta Muñoz, *Dispositivo para evitar pandeo en ensayos biaxiales de probetas cruciformes*, Solicitud de patente, P 2018/109819 (2018).
- [43] M.C. Serna Moreno, S. Horta Muñoz, A. Romero Gutiérrez, C. Rappold, J.L. Martínez Vicente, P.A. Morales-Rodríguez, J.J. López Cela, *Composites Science and Technology*, **156**, pág. 8-18 (2018).
<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2017.12.015>
- [44] M.C. Serna Moreno, A. Romero Gutiérrez, J.L. Martínez Vicente, S. Horta Muñoz, P.A. Morales-Rodríguez, C. Rappold, *Materiales Compuestos*, **2**, pág. 1-4 (2018).
<https://revista.aemac.org/materiales-compuestos/article/view/245>
- [45] M.C. Serna Moreno, S. Horta Muñoz, *Composites Science and Technology*, **194**, 108145 (2020).
<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2020.108145>

