

Experimental study of the use of ultra-thin plies in quasi-isotropic laminates under cyclic tension after impact

Carlos Sandino¹, Serafín Sánchez-Carmona¹, Elena Correa Montoto¹, Federico Paris¹

¹ Universidad de Sevilla

Abstract

In this work, the authors propose an experimental study on the possible improvement of the mechanical behaviour produced by ultra-thin plies in laminates subjected to cyclic loading after impact. More specifically, this work introduces the use of these plies in carbon fibre quasi-isotropic laminates, with the aim of studying the evolution of impact damage under tensile cyclic loads. To this aim, the behaviour of quasi-isotropic laminates consisting of conventional thickness plies is compared with laminates with 90° ultra-thin plies, keeping the same stacking sequence. When considering the same loading level, the damage evolution shows a lower progress and a later failure for the laminates containing ultra-thin plies.

OPEN ACCESS

Published: 27/01/2024

Accepted: 05/12/2023

Keywords:

Fatiga
Daño
Impacto
Cuasi-isótropo
Láminas ultradelgadas
Fatigue
Damage
Impact
Ultra-thin plies
Quasi-isotropic

Análisis experimental del uso de láminas ultradelgadas en laminados cuasi-isótropos con impacto previo ante carga cíclica de tracción

Carlos Sandino*, Serafín Sánchez-Carmona, Elena Correa,
Federico París

Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales
Escuela Técnica Superior de Ingeniería – Universidad de Sevilla
Camino de los Descubrimientos s/n, 41092 Sevilla (España)

*csandino@us.es

RESUMEN: En este trabajo, los autores proponen un estudio sobre la posible mejora del comportamiento mecánico producida por el uso de láminas ultradelgadas en laminados sometidos a fatiga. Concretamente, en este trabajo se introduce el uso de este tipo de láminas en laminados cuasi-isótropos de material compuesto de fibra de carbono, con el objetivo de estudiar experimentalmente la evolución del daño producido por un impacto ante cargas cíclicas de tracción. Para ello, se compara el comportamiento de laminados formado por láminas de espesor convencional, con laminados en los que las láminas orientadas a 90° son ultradelgadas. La evolución del daño demuestra un menor avance y una rotura más tardía para los laminados que contienen láminas ultradelgadas, a un nivel de carga similar.

ABSTRACT: In this work, the authors propose an experimental study on the possible improvement of the mechanical behaviour produced by ultra-thin plies in laminates subjected to cyclic loading after impact. More specifically, this work introduces the use of these plies in carbon fibre quasi-isotropic laminates, with the aim of studying the evolution of impact damage under tensile cyclic loads. To this aim, the behaviour of

quasi-isotropic laminates consisting of conventional thickness plies is compared with laminates with 90° ultra-thin plies, keeping the same stacking sequence. When considering the same loading level, the damage evolution shows a lower progress and a later failure for the laminates containing ultra-thin plies.

Keywords: Fatiga, Daño, Impacto, Cuasi-isótropo, Láminas ultradelgadas, Fatigue, Damage, Impact, Quasi-isotropic, Ultra-thin plies.

1. Introducción

En laminados de materiales compuestos que contienen láminas con fibras orientadas a 90° con respecto a la dirección de la carga, se produce un retraso en la aparición del daño al disminuir el espesor de dichas láminas. Este fenómeno, que se denomina “efecto escala”, ha fomentado el estudio del uso de láminas ultradelgadas para la fabricación de laminados de materiales compuestos.

Recientes estudios han sido publicados por los autores de este trabajo con el objetivo de estudiar, ante carga de tracción, los efectos derivados del uso de láminas ultradelgadas en materiales compuestos. Estos trabajos, en los que se ha analizado el comportamiento ante cargas estáticas [1] y cargas cíclicas [2, 3], confirman las diferencias en los mecanismos de fallo en las capas orientadas a 90°, según tengan un espesor convencional o ultradelgado. Con el objetivo de avanzar en el estudio del uso de láminas ultradelgadas, el presente trabajo busca analizar las posibles diferencias en el comportamiento de laminados que ya presentan daños previos en forma de delaminación, como es el caso de laminados cuasi-isótropos con

impacto previo.

Para ello, este trabajo sigue el enfoque presentado en trabajos realizados sobre la respuesta de laminados cuasi-isótropos ante cargas cíclicas de tracción post-impacto [4, 6], especialmente en lo relacionado con el diseño de las probetas y las campañas de ensayos. Resulta de especial interés el trabajo presentado en [7], en el que se estudia el efecto de reducir el espesor de las láminas, reproduciendo el mismo espesor total del laminado y, por lo tanto, aumentando el número de láminas. Sin embargo, esta estrategia presenta un gran impedimento para su implementación a nivel industrial, ya que incrementa considerablemente el tiempo de fabricación del laminado.

En este trabajo, el objetivo es estudiar las diferencias entre un laminado cuasi-isótropo que contiene exclusivamente láminas de espesor convencional y otro similar con láminas ultradelgadas orientadas a 90°, manteniendo el número total de láminas. De esta manera se pretende observar su comportamiento ante cargas cíclicas de tracción post-impacto, basando el análisis en la progresión de las zonas dañadas de las probetas fabricadas.

El trabajo se estructura de la manera siguiente: la Sección 2 está dedicada a la fabricación de los laminados, prestando especial atención al diseño de las probetas; la Sección 3 describe los ensayos de impacto realizados; la Sección 4 trata sobre la realización de ensayos estáticos de tracción post-impacto; la Sección 5 está dedicada a los ensayos cíclicos de tracción post-impacto y la detección del daño mediante ultrasonidos; y la Sección 6 está dedicada a las conclusiones y los trabajos futuros.

2. Fabricación

Para la fabricación de las probetas destinadas a cargas cíclicas de tracción post-impacto, es preciso realizar un diseño óptimo tanto desde el punto de vista del ensayo de impacto como desde el de las cargas de tracción. En ausencia de normas adaptadas a la tracción post-impacto (TAI: tension after impact), se toman como referencia inicial las recomendaciones definidas por las normas para los casos de compresión post-impacto (CAI: compression after impact). La norma [8] describe el procedimiento para la realización de dichos ensayos. A partir de las recomendaciones descritas en dichas normas se ha definido el espesor nominal t , el ancho w , la longitud de la zona libre de tacos L_0 y una secuencia de apilado acorde a los ensayos de impacto. Con respecto a la longitud de las probetas, los requerimientos de los ensayos de tracción implican la necesidad de extender la longitud definida para los ensayos CAI, con el objetivo de definir una zona de tacos para el agarre de las mordazas durante dicho ensayo.

Por último, se determinan los dos laminados cuyo comportamiento se quiere comparar. Primero se define la configuración TAI.A, un laminado cuasi-isótropo en el que todas las láminas tienen un espesor convencional (150 g/m²). Con el objetivo de analizar el uso de láminas ultradelgadas, se define la configuración TAI.B, similar a la configuración TAI.A, pero sustituyendo las láminas orientadas a 90° por láminas de espesor ultradelgado (50 g/m²). Por lo tanto, ambos laminados comparten secuencia de apilado y número de láminas, lo cual implica que el espesor del laminado TAI.B es ligeramente inferior al espesor nominal definido por la norma CAI. Como se explicó en la Introducción, el objetivo es comparar ambos laminados sin introducir más láminas, y por lo tanto, sin aumentar el tiempo de fabricación. El material empleado es el preimpregnado de fibra de carbono y resina epoxi TP 402/T700SC de 50 g/m² y 150 g/m² de North Thin Ply Technology. Un esquema de la geometría propuesta para la

probeta TAI propuesta se muestra en la Figura 1. La Tabla 1 incluye los valores de las dimensiones y el apilado de los dos tipos de laminado.

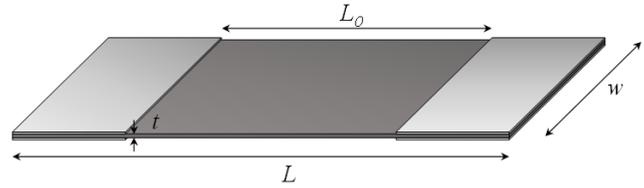


Figura 1. Esquema de la geometría de la probeta TAI.

Probeta	L (m)	L ₀ (m)	w (m)	t (m)	Secuencia de apilado	Nº de láminas	Gramaje láminas 90° (g/m ²)	Gramaje resto de láminas (g/m ²)
TAI.A	270	150	100	4	[45/0/-45/90] _{3s}	24	150	150
TAI.B	270	150	100	3.3	[45/0/-45/90] _{3s}	24	50	150

Tabla 1. Descripción de la geometría y el apilado de las probetas TAI empleadas.

3. Ensayos de Impacto

Para la realización del ensayo se han seguido las recomendaciones de la norma [8] para probetas CAI, adaptando el soporte de fijación a las probetas TAI. Inicialmente se realiza la calibración de los laminados de las probetas TAI.A y TAI.B, obteniendo la relación de la energía de impacto y la indentación provocada. De esta manera, se observa que para energías de impacto $E_i < 16$ J, la indentación provocada en ambos laminados es similar. Es por ello que se selecciona $E_i = 16$ J para los ensayos de este estudio, al ser el mayor valor que genera una indentación similar en ambos laminados. Una vez realizados los impactos para 11 probetas TAI.A y TAI.B (5 para ensayos cuasi-estáticos de tracción post-impacto y 6 para ensayos cíclicos de tracción post-impacto), se determina la extensión del área dañada mediante la inspección por ultrasonidos. El área dañada media para ambos laminados es $A_d^{TAI.A} = 908.33$ mm² y $A_d^{TAI.B} = 681.95$ mm², siendo inferior para las probetas que contienen láminas ultradelgadas.

4. Ensayos ante carga cuasi-estática de tracción

Los ensayos cuasi-estáticos de tracción post-impacto (TAI) se realizan para obtener la resistencia residual ante cargas de tracción, σ_{TUI}^{TAI} . Este valor es fundamental para los posteriores ensayos ante carga cíclica de tracción, puesto que establece el nivel de carga de referencia para dichos ensayos. Para su obtención se han realizado ensayos cuasi-estáticos de tracción a un grupo de 5 probetas de los dos laminados estudiados. Los ensayos han sido realizados en una máquina universal de ensayos Instron 8033, con una célula de carga de 500 kN. La Tabla 2 muestra los resultados obtenidos: σ_{TUI}^{TAI} , su desviación estándar y el coeficiente de variación. Los resultados muestran un mayor valor de σ_{TUI}^{TAI} para las probetas que contienen láminas ultradelgadas orientadas a 90°, TAI.B.

Laminado	σ_{TUI}^{TAI} (MPa)	Desviación estándar (MPa)	CV (%)
TAI.A	105.5	12.5	11.8
TAI.B	115.2	10.8	9.3

TAI.A	712.78	42.95	6.03
TAI.B	811.12	17.31	2.13

Tabla 2. Resultados obtenidos de los ensayos ante carga estática de tracción post-impacto.

5. Ensayos ante carga cíclica de tracción

Para evaluar el comportamiento ante carga cíclica se eligen distintos niveles de carga tracción-tracción ($R=0.1$). Para cada laminado se establece como referencia la resistencia residual post-impacto ante cargas de tracción, σ_{TAI}^{TAI} , y se aplican distintos porcentajes a dicho valor (60%, 70% y 80%). Esto permite obtener las tensiones máximas aplicadas durante el ensayo ante carga cíclica, representadas en la Tabla 3.

A partir de los valores mostrados en la Tabla 3, y la relación $R=0.1$, se calcula la fuerza máxima $F_{X,Max}^{TAI}$, la fuerza mínima $F_{X,min}^{TAI}$ y la fuerza alterna $F_{X,a}^{TAI}$, siendo X el nivel de carga al que se realiza el ensayo. De esta manera, para cada nivel de carga, se realizan ensayos en dos probetas, siendo 6 el número total de probetas ensayadas de cada laminado. Los ensayos se realizan en una máquina universal de ensayos dinámicos Instron 8802, con célula de carga de 250 kN, a una frecuencia $f=3$ Hz. La Tabla 4 representa los valores de carga de cada ensayo realizado.

Tras el cálculo de las cargas, se realizan los ensayos, estableciendo paradas a los 15000, 30000 y 45000 ciclos. Tras cada parada, se inspeccionan las probetas mediante ultrasonidos, con el objetivo de captar la progresión del daño y comparar el comportamiento de los dos laminados estudiados. La Figura 2 representa el área dañada inicial y su progresión tras cada parada, para una probeta de cada laminado, y el nivel de carga definido por $X=0.8$.

Laminado	$\sigma_{0,6}^{TAI}$ (MPa)	$\sigma_{0,7}^{TAI}$ (MPa)	$\sigma_{0,8}^{TAI}$ (MPa)
TAI.A	427.67	498.95	570.22
TAI.B	486.67	567.78	648.90

Tabla 3. Tensiones máximas aplicadas a los ensayos ante carga cíclica de tracción post-impacto.

Tal y como se observa en la Figura 2, ante la carga cíclica de tracción aplicada, aparecen daños en forma de delaminación en los bordes de la probeta, efecto también observado en [6]. Dado el alto nivel de carga, durante el ensayo se observa que estos daños localizados en los bordes de la probeta aparecen tras los primeros ciclos aplicados, si bien la primera inspección se realiza a los 15000 ciclos. Este daño producido en los bordes progresa al aumentar el número de ciclos, tal y como se observa en la Figura 2. Con respecto al fallo de la probeta, en el caso del laminado TAI.A se produce antes de llegar a los 45000 ciclos, mientras que el laminado TAI.B alcanza los 45000 ciclos sin llegar a la rotura. El fallo final se produce cuando el área dañada que avanza desde los bordes de la probeta alcanza el área dañada debida al impacto. Sin embargo, el fallo se produce sin haber podido detectar un avance del área dañada debida al impacto. Este hecho indica que dicho avance se produciría para un número de ciclos cercano al fallo y sugiere la realización de un estudio con paradas a un menor número de ciclos con el objetivo de obtener una mejor captura de la progresión del daño antes del fallo.

La tendencia observada para los tres niveles de carga definidos es similar, si bien la progresión de la delaminación en los

bordes de la probeta avanza de forma más rápida al aumentar el nivel de carga.

Probeta	X	$F_{X,Max}^{TAI}$ (kN)	$F_{X,min}^{TAI}$ (kN)	$F_{X,a}^{TAI}$ (kN)
TAI.A1	0.6	171.63	17.16	77.23
TAI.A2	0.6	171.56	17.16	77.20
TAI.A3	0.7	198.53	19.85	89.34
TAI.A4	0.7	200.89	20.09	90.40
TAI.A5	0.8	229.37	22.94	103.22
TAI.A6	0.8	231.15	23.12	104.02
TAI.B1	0.6	160.81	16.08	72.36
TAI.B2	0.6	160.21	16.02	72.09
TAI.B3	0.7	187.45	18.75	84.35
TAI.B4	0.7	188.43	18.84	84.80
TAI.B5	0.8	216.72	21.67	97.53
TAI.B6	0.8	215.78	21.58	97.10

Tabla 4. Cargas aplicadas en los ensayos ante carga cíclica de tracción post-impacto.

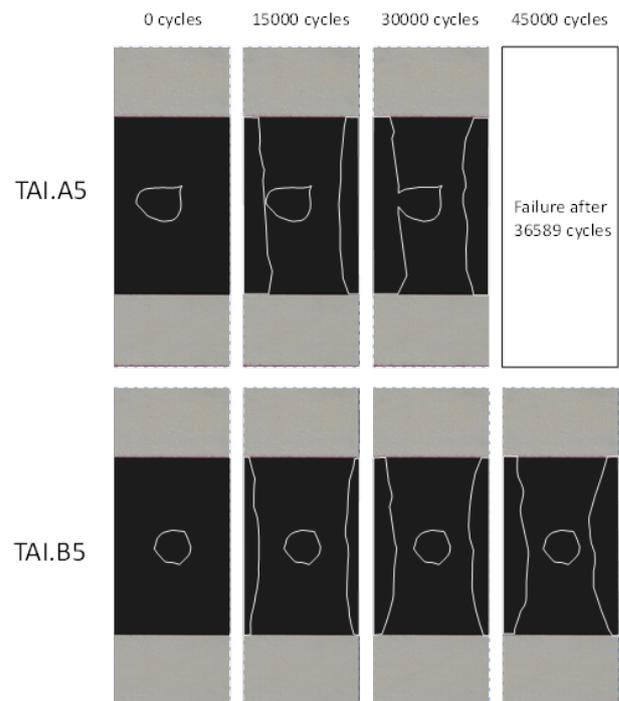


Figura 2. Área dañada tras los ensayos ante carga cíclica de tracción post-impacto ($X=0.8$).

6. Conclusiones y Trabajos Futuros

Tras los ensayos realizados se puede afirmar que existe una mayor progresión del daño en los laminados TAI.A que en los laminados TAI.B. Esto implica que, el uso de láminas ultradelgadas orientadas a 90° en un laminado cuasi-isótropo, mejora el comportamiento del laminado ante carga cíclica de tracción post-impacto. El reemplazo de las láminas orientadas a 90° por láminas ultradelgadas reduce el espesor total del laminado y mejora el comportamiento ante cargas cíclicas de tracción, sin incrementar el tiempo de fabricación del laminado. Este hecho valida de forma preliminar la utilización de esta estrategia para su posible implementación a nivel industrial.

Los trabajos futuros están orientados hacia una mejor captura

del comportamiento ante carga cíclica de tracción del área dañada tras el impacto, mediante un análisis más profundo que incluya paradas más cortas para la inspección mediante ultrasonidos. Además, se contempla el uso de otras técnicas de inspección que permitan una mejor localización del daño a lo largo del espesor de la probeta, de manera que pueda determinarse el rol de las láminas ultradelgadas en el avance del daño. Por último, se han definido futuros estudios ante cargas de compresión.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por:

- Consejería de Economía y Conocimiento, Junta de Andalucía: Proyecto P18-FR-3360, I+D+I Programa Operativo FEDER 2014-2020.
- Ministerio de Universidades, Gobierno de España: "Ayudas Margarita Salas para la formación de jóvenes doctores", Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia y fondos Next Generation EU.
- Ministerio de Ciencia e Innovación, Gobierno de España: Proyecto PID2021-126279OB-I00, Plan Estatal 2021-2023 - Proyectos Investigación Orientada.

Bibliografía

- [1] F. París, M. L. Velasco, and E. Correa, "The scale effect in composites: An explanation physically based on the different mechanisms of damage involved in failure," *Compos Struct*, vol. 257, 2021, doi: 10.1016/j.compstruct.2020.113089.
- [2] S. Sánchez-Carmona, E. Correa, A. Barroso, and F. París, "Experimental observations of fatigue damage in cross-ply laminates using carbon/epoxy ultra-thin plies," *Compos Struct*, vol. 306, 2023, doi: 10.1016/j.compstruct.2022.116564.
- [3] S. Sánchez-Carmona, E. Correa, A. Barroso, and F. París, "Fatigue life of unidirectional 90° carbon/epoxy laminates made of conventional and ultra-thin plies varying manufacturing and testing conditions," *Fatigue Fract Eng Mater Struct*, vol. 46, no. 5, pp. 1837–1847, 2023, doi: 10.1111/ffe.13966.
- [4] C. Garnier, M. L. Pastor, B. Lorrain, and O. Pantalé, "Fatigue behavior of impacted composite structures," *Compos Struct*, vol. 100, pp. 443–450, Jun. 2013, doi: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2012.12.025.
- [5] A. Rogani, P. Navarro, S. Marguet, and J. F. Ferrero, "Study of post-impact behaviour of thin carbon/epoxy laminates subject to fatigue tensile loading," *Int J Fatigue*, vol. 148, p. 106134, Jul. 2021, doi: 10.1016/J.IJFATIGUE.2020.106134.
- [6] R. Bogenfeld, P. Schmiedel, N. Kuruvadi, T. Wille, and J. Kreikemeier, "An experimental study of the damage growth in composite laminates under tension-fatigue after impact," *Compos Sci Technol*, vol. 191, p. 108082, May 2020, doi: 10.1016/J.COMPSCITECH.2020.108082.
- [7] B. Kötter, J. Endres, J. Körbelin, F. Bittner, H. J. Endres, and B. Fiedler, "Fatigue and fatigue after impact behaviour of Thin- and Thick-Ply composites observed by computed tomography," *Composites Part C: Open Access*, vol. 5, p. 100139, Jul. 2021, doi: 10.1016/J.JCOMC.2021.100139.
- [8] EN 6038:2015, Aerospace series - Fibre reinforced plastics - Test method - Determination of the compression strength after impact," *BSI Standards Publication*, vol. 44, no. 0, 2015.