

Bienvenid@s

WEBINAR





#WebinarsAEMAC



Dr. NORBERT BLANCO VILLAVERDE
Grupo AMADE. Universitat de Girona

Caracterización de la tenacidad interlaminar en materiales compuestos fabricados por impresión 3D



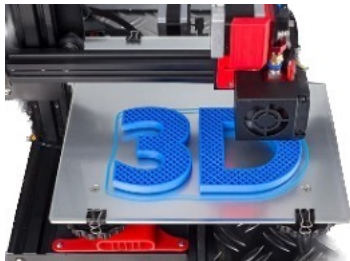
AMADE
ANALYSIS AND ADVANCED MATERIALS
FOR STRUCTURAL DESIGN

Universitat
de Girona

25 de abril 2024, 16 h (CET)



Caracterización de la tenacidad interlaminar en materiales compuestos fabricados por impresión 3D



- 1. INTRODUCCIÓN**
- 2. DISEÑO Y FABRICACIÓN DE PROBETAS**
- 3. CARACTERIZACIÓN EN MODO I Y MODO II**
- 4. CARACTERIZACIÓN MULTIDIRECCIONAL EN MODO I**
- 5. CONCLUSIONES**

1.

INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

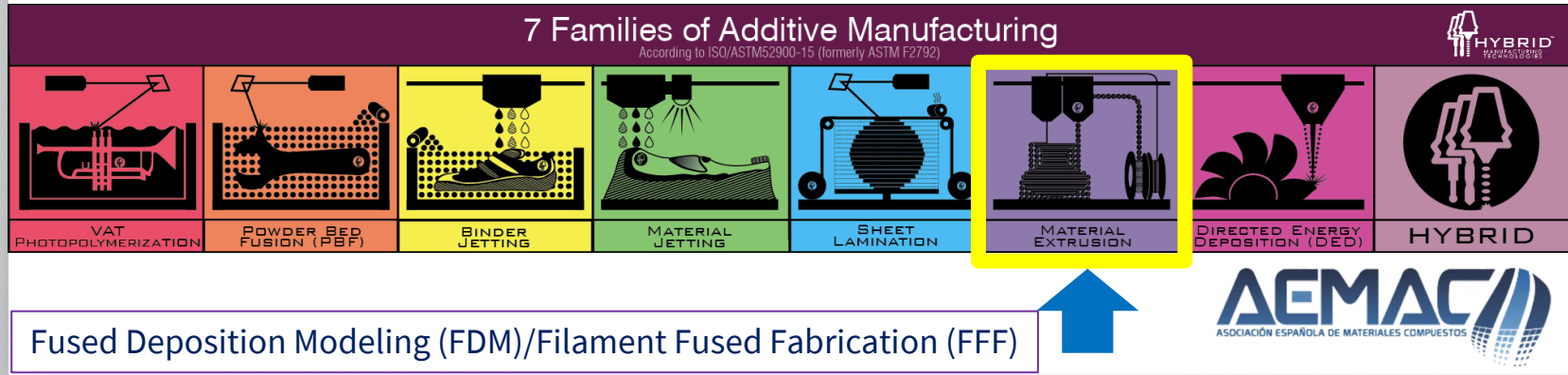
7

- **La Impresión 3D o Fabricación Aditiva es un método de fabricación disruptivo que se basa en añadir (o consolidar) material capa por capa para configurar objetos tridimensionales**
- **Es un método de fabricación muy atractivo en entornos industriales por:**
 - **la flexibilidad de diseño que aporta**
 - **la reducción de los tiempos de ensamblaje**
 - **volúmenes de producción reducidos**
 - **reducción de material de desecho**
 - **mejora de la reciclabilidad**
 - **etc.**

1. INTRODUCCIÓN

8

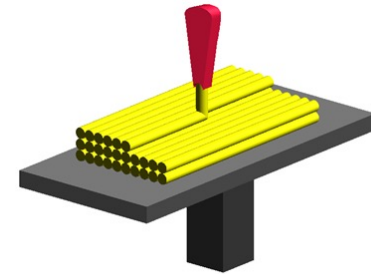
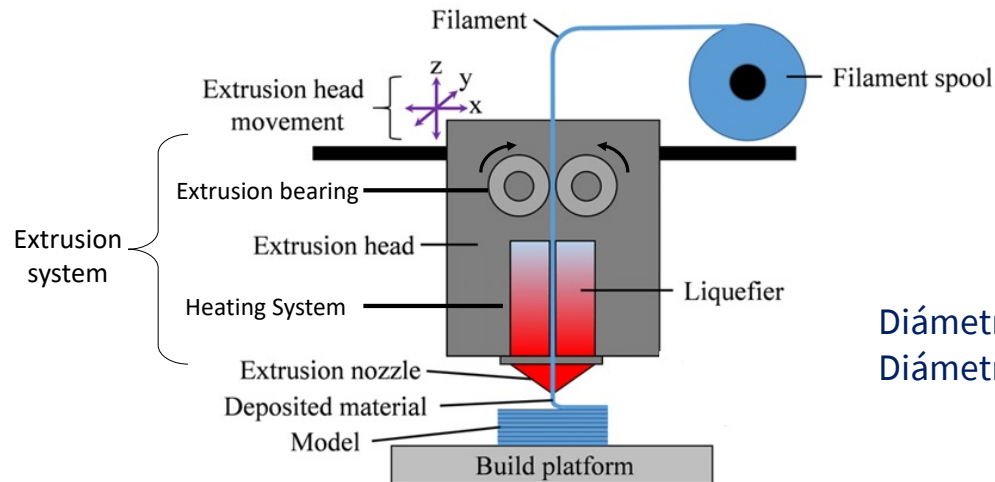
- Según la norma ISO/ASTM 52900:2015, los distintos métodos de fabricación aditiva se pueden clasificar en 7 familias distintas
- Algunos métodos son exclusivos para materiales poliméricos y otros para materiales metálicos



1. INTRODUCCIÓN

9

- **Funcionamiento del sistema FDM/FFF**



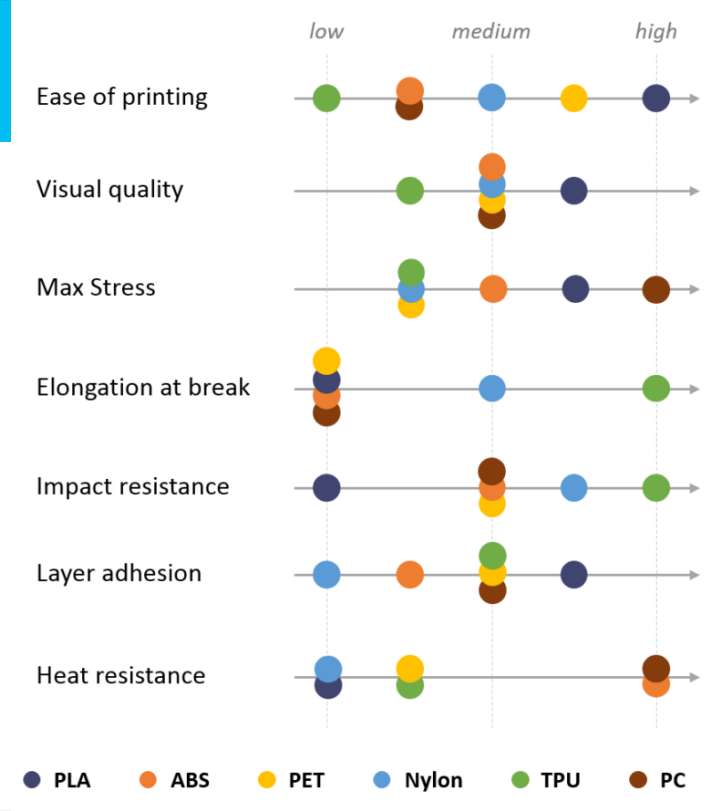
Diámetros típicos de filamento: 1.75 o 2.85 mm

Diámetros típicos de boquilla: 0.4, 0.8 o 1.2 mm

1. INTRODUCCIÓN

- Los materiales más típicos y tradicionales utilizados en FDM, como el PLA (ácido poliláctico) y el ABS (acrilonitrilo butadieno estireno), así como los más nuevos, como el PA, TPU, PET, PETG, PC, comparten una desventaja principal:

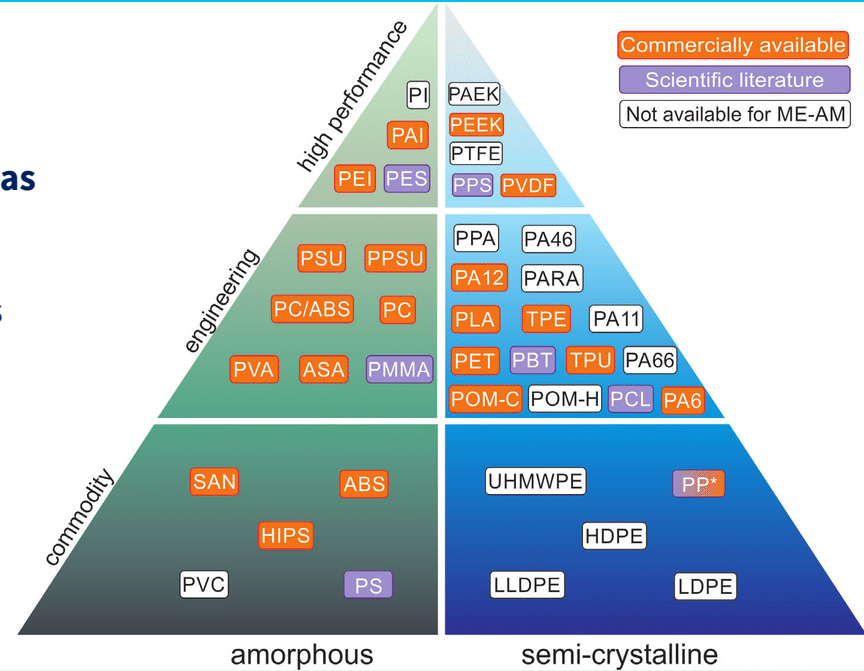
BAJAS PROPIEDADES MECÁNICAS



1. INTRODUCCIÓN

11

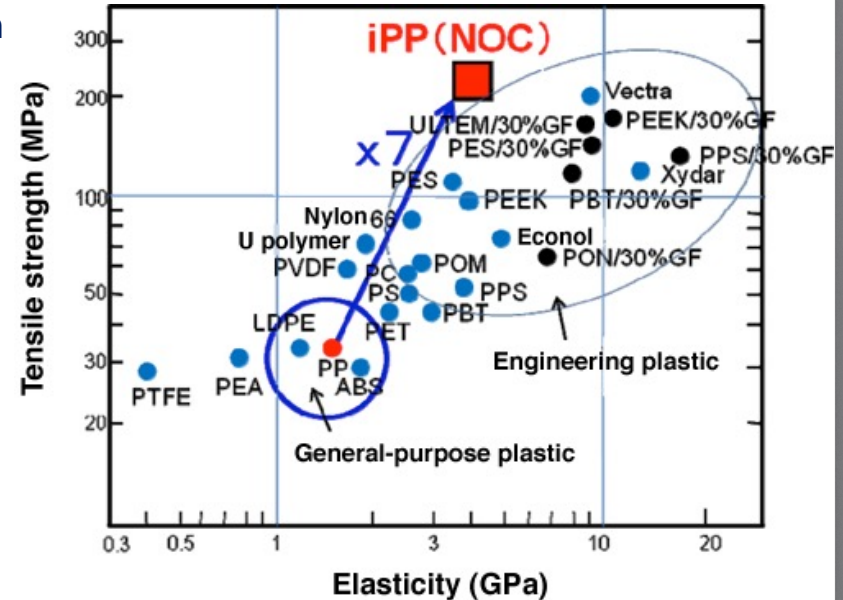
- Recientemente se han desarrollado termoplásticos de altas prestaciones para mejorar las propiedades mecánicas de los materiales FDM
- Son necesarias mayores temperaturas de procesamiento y sistemas de más complejos



1. INTRODUCCIÓN

12

- Las propiedades mecánicas mejoran con los polímeros de altas prestaciones
- La densidad se mantiene baja, con lo que las propiedades mecánicas específicas se incrementan
- La mejora de propiedades es insuficiente para ciertas aplicaciones y el coste y complejidad de fabricación son demasiado elevados

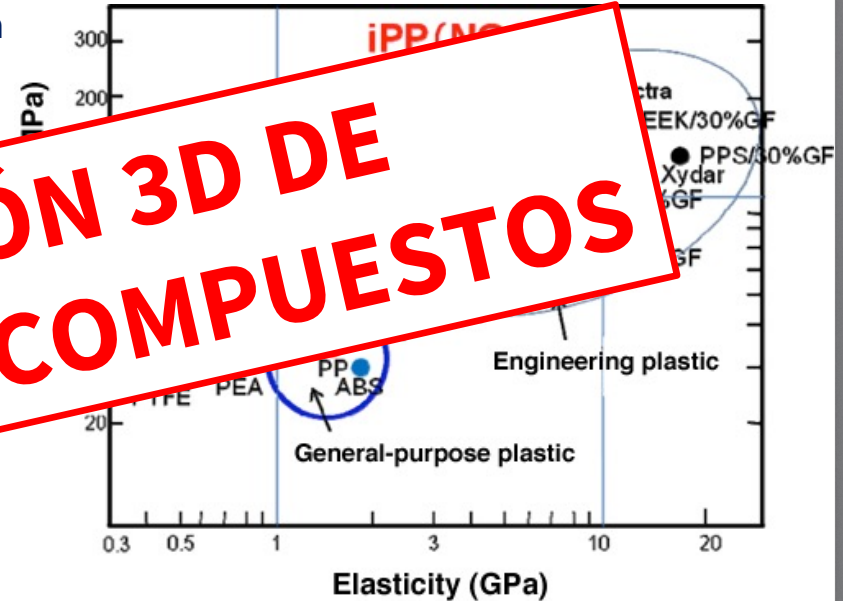


1. INTRODUCCIÓN

13

- Las propiedades mecánicas mejoran con los polímeros de altas prestaciones
- La densidad se mantiene baja, con lo que las propiedades mecánicas específicas mejoran

IMPRESIÓN 3D DE MATERIALES COMPUESTOS



1. INTRODUCCIÓN

14

- El material termoplástico se puede reforzar con fibras cortas o largas
- Las propiedades mecánicas mejoran en la dirección de la fibra, pero no en las direcciones transversales
- El refuerzo con fibras cortas mejora la rigidez del material, un poco la tenacidad, pero no mucho o nada la resistencia
- Los mejores resultados se obtienen cuando se refuerza con fibra continua

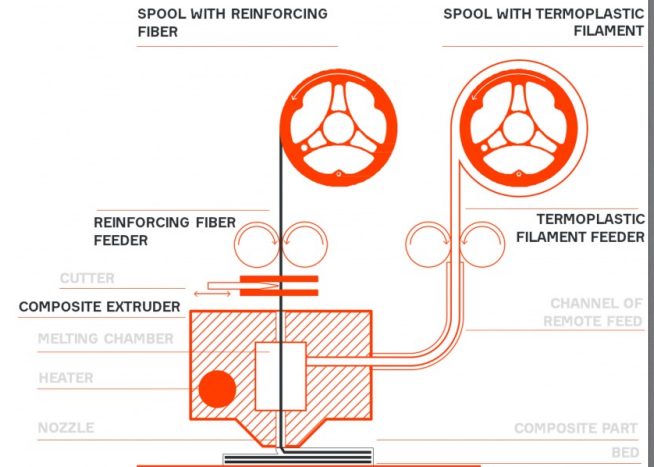
1. INTRODUCCIÓN

- **Impresora Anisoprint Composer A4**
 - **Impresora 3D de doble cabezal para filamento termoestable reforzado con fibra continua**
 - **Filamentos termoplásticos típicos**
 - **La carcasa termoplástica externa puede recubrir los filamentos de refuerzo para un mejor acabado**
 - **Se puede utilizar fibra continua de carbono o basalto**



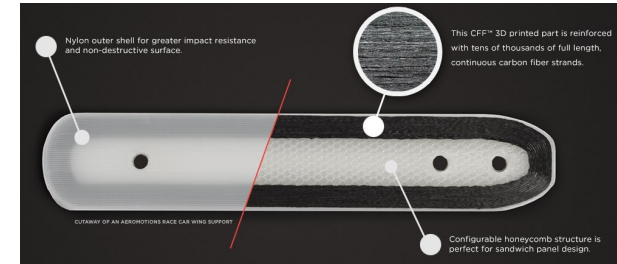
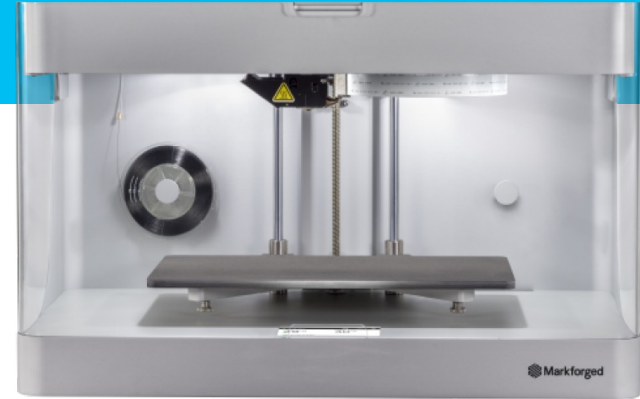
1. INTRODUCCIÓN

- **Impresora Anisoprint Composer A4 (cont.)**
 - **El filamento termoestable reforzado con fibra se combina con un filamento termoplástico en el cabezal de impresión => concepto de bi-material**
 - **El filamento termoestable reforzado con fibra se recubre con termoplástico fundido en el cabezal de impresión**
 - **Solo el filamento reforzado es un material propietario**



1. INTRODUCCIÓN

- **Impresora Markforged Mark Two**
 - Impresora 3D de doble cabezal que procesa filamento PA reforzado con fibra continua
 - La pieza impresa siempre incluye una carcasa externa de PA que puede reforzarse internamente con filamento de PA reforzado con fibra
 - Se pueden utilizar fibras de vidrio, Kevlar o carbono para el filamento de refuerzo



1. INTRODUCCIÓN

- **Impresora Markforged Mark Two (cont.)**
 - Se utilizan dos extrusores y cabezales de impresión: uno para el PA base (u Onyx) y otro para el PA reforzado con fibra
 - El filamento base de PA también puede reforzarse con fibra de carbono corta, (ONYX)
 - Materiales propietarios
 - El filamento de PA debe almacenarse en una caja hermética al agua



1. INTRODUCCIÓN

19

- **La impresión 3D de materiales compuestos con refuerzo de fibra continua se plantea como una tecnología prometedora con propiedades mecánicas mejoradas**
- **Sin embargo, al igual que en los compuestos laminados tradicionales, la delaminación sigue siendo uno de los modos de falla más preocupantes para los compuestos impresos en 3D**
- **Para obtener diseños mejorados y capacidades de simulación, es crucial caracterizar la tenacidad a la fractura interlaminar de los compuestos impresos en 3D reforzados con fibra continua**

1. INTRODUCCIÓN

20

- **Iragi et al. (2019) ya analizaron la tenacidad a la fractura interlaminar del compuesto impreso en 3D de poliamida reforzado con fibra de carbono continua Markforged MarkTwo® en modo I y en modo II**
- **Contrariamente a lo habitual en este tipo de materiales, encontraron una mayor tenacidad a la fractura en modo I que en modo II ($G_{Ic} > G_{IIc}$)**
- **En su trabajo, Iragi et al. utilizaron refuerzos de Dyneema® que encapsulaban el compuesto impreso en 3D, complicando el proceso de fabricación y resultando en espesores de probeta superiores a los recomendados en las normas**

Iragi, M.; Pascual-González, C.; Esnaola, A.; Lopes, C.S.; Aretxabaleta, L. Ply and Interlaminar Behaviours of 3D Printed Continuous Carbon Fibre-Reinforced Thermoplastic Laminates; Effects of Processing Conditions and Microstructure. Addit. Manuf. 2019, 30, 100884, doi:10.1016/j.addma.2019.100884



- **Con posterioridad al trabajo de Iragi et al. se han publicado otras investigaciones sobre la caracterización interlaminar en modo I y modo II para este material con configuraciones y resultados dispares**
- **No obstante, no existen trabajos previos sobre la tenacidad interlaminar en interfases multidireccionales de materiales compuestos impresos en 3D**

OBJETIVOS:

- La caracterización experimental de la tenacidad a la fractura interlaminar en modo I y modo II del compuesto de poliamida reforzado con fibra de carbono continua Markforged MarkTwo® tanto para iniciación como para propagación
- Esta caracterización debe realizarse sin utilizar refuerzos adicionales para la probeta
- Evaluar el efecto del grosor de la muestra en la tenacidad a la fractura en modo I

OBJETIVOS (cont.):

- **Caracterización de la tenacidad interlaminar en modo I en interfaces multidireccionales en un compuesto fabricado por impresión 3D:**
 - **Determinar configuraciones de laminados multidireccionales que aseguren la propagación en modo I**
 - **Evitar la aparición en paralelo de otros mecanismos de daño tales como migración de plano, la ramificación de la grieta o la propagación asimétrica de la grieta**
- **Analizar posibles diferencias en los micromecanismos de daño en la propagación de grieta para distintas orientaciones de las interfaces**

2.

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE PROBETAS

2. DISEÑO Y FABRICACIÓN DE PROBETAS

25

- Se fabricaron probetas DCB de modo I (ISO-15024) unidireccionales y multidireccionales (MD-DCB) y probetas ENF (ASTM-D7905) para iniciación, y C-ELS para iniciación y propagación (ISO-15114) en modo II utilizando la impresora 3D Markforged MarkTwo®
- Para el estudio se utiliza el filamento CF/PA de Markforged® que combina una matriz polimérica de PolyAmida 6 filamento ($E = 0.94 \text{ MPa}$, $X_y = 34 \text{ MPa}$ y $X_t = 54 \text{ MPa}$) con fibra de carbono continua ($E = 54 \text{ GPa}$ y $X_t = 700 \text{ MPa}$)
- Este filamento contiene una fracción en volumen de fibra entre 27 y 41% y muchas áreas con exceso o falta de resina y alto contenido de vacíos

2. DISEÑO Y FABRICACIÓN DE PROBETAS

26

Propiedad	
Modulo elástico longitudinal, E_{11} (GPa)	66.5 ± 7.1
Modulo elástico transversal, E_{22} (GPa)	6.2 ± 1.1
Coefficiente de Poisson, ν_{12}	0.39 ± 0.03
Modulo cortante en el plano, G_{12} (GPa)	2.1 ± 0.2
Tenacidad a la fractura en modo I, G_{Ic} (J/m ²)	1.7 ± 0.1
Tenacidad a la fractura en modo II, G_{IIc} (J/m ²)	2.3 ± 0.1
Resistencia longitudinal a tensión, X^T (MPa)	752 ± 88.6
Resistencia longitudinal a compresión, X^C (MPa)	$426 \pm 9.7^*$
Resistencia transversal a tensión, Y^T (MPa)	49.3 ± 9.9
Resistencia transversal a compresión, Y^C (MPa)	$66 \pm 6.6^*$
Resistencia a cortante, S^L (MPa)	31 ± 0.1
Espesor de la capa, t (mm)	0.125

Propiedades mecánicas de referencia para el estudio

Santos et al. 2022, doi:10.3390/polym14030506

* Iragi et al. 2019, doi:10.1016/j.addma.2019.100884

2. DISEÑO Y FABRICACIÓN DE PROBETAS

27

- La impresora obliga a incluir 1, 2 o 4 capas de PA en las superficies inferior y superior y al menos incluir 1 filamento lateral de PA que cubra las capas de CF
- El número de filamentos laterales de PA se estableció igual al número de capas de PA superiores e inferiores (que posteriormente se retiraron)
- El grosor nominal de las capas de CF/PA es de 0.125 mm (determinado por la impresora 3D) con un patrón de relleno sólido
- Todas las muestras se fabricaron individualmente para evitar problemas de deformación debido a la alta cantidad de CF

2. DISEÑO Y FABRICACIÓN DE PROBETAS

28

PROBETAS UNIDIRECCIONALES

- Se consideraron dos grosores de probeta DCB distintos, 3 y 5 mm, para evaluar el efecto del grosor en la determinación experimental de la fractura interlaminar

Interlaminar Test	Standard	Lay-Up	Dimensions (mm)	Precrack (mm)
Mode I—DCB-A	ISO-15024	[N ₄ /0 ₁₂ //0 ₁₂ /N ₄]	175 × 22.5 × 3	50
Mode I—DCB-B	ISO-15024	[N ₂ /0 ₂₀ //0 ₂₀ /N ₂]	175 × 22.5 × 5	50
Mode II initiation	ASTM D7905	[N ₁ /0 ₁₁ //0 ₁₁ /N ₁]	200 × 22.5 × 2.75	35
Mode II	ISO-15114	[N ₁ /0 ₁₂ //0 ₁₂ /N ₁]	175 × 20 × 3	65

2. DISEÑO Y FABRICACIÓN DE PROBETAS

29

PROBETAS MULTIDIRECCIONALES

- 7 combinaciones de orientaciones de capa en la interfase: 0, ± 15 , ± 30 y ± 45 (sin repetición)
- La relación de rigidez entre brazos debe ser ≥ 0.9 y comportamiento anticlástico ($D_c < 0.25$) para garantizar apertura simétrica y propagación en modo I
- Una mayor rigidez a flexión dificulta la migración de la grieta pero probetas la caracterización experimental funciona mejor con probetas delgadas

2. DISEÑO Y FABRICACIÓN DE PROBETAS

30

PROBETAS MULTIDIRECCIONALES

- De los posibles de laminados considerados, resultan las siguientes combinaciones de interfase y laminado
- Las dimensiones finales de las probetas son $175 \times 25 \times 5$ mm (longitud, ancho y espesor) y 50 mm (pre-grieta)
- ¿Qué combinaciones evitan la migración de grieta?

Codificación	Secuencia de apilado	Ángulos de la interfase (θ_1/θ_2)
L1_12_12_ θ_1 _ θ_2	$[(\pm\theta_1/0_4)_s // (\pm\theta_2/0_4)_s]$	0/15, -15/15, -30/30
L2_16_16_ θ_1 _ θ_2	$[(\pm\theta_1/0_6)_s // (\pm\theta_2/0_6)_s]$	0/15, -15/15, -30/30, -45/45
L3_15_17_ θ_1 _ θ_2	$[(\pm\theta_1/0_6)_s // (\pm\theta_2/0_7)_s]$	0/30, -15/30, 15/30
L4_15_18_ θ_1 _ θ_2	$[(\pm\theta_1/0_6)_s // (\pm\theta_2/0_7)_s]$	0/45, -15/45, 15/45
L5_16_17_ θ_1 _ θ_2	$[(\pm\theta_1/0_6)_s // (\pm\theta_2/0_7)_s]$	-30/45, 30/45
L6_20_20_ θ_1 _ θ_2	$[(\pm\theta_1/0_8)_s // (\pm\theta_2/0_8)_s]$	0/15, -15/15, -30/30, -45/45
L7_19_21_ θ_1 _ θ_2	$[(\pm\theta_1/0_8)_s // (\pm\theta_2/0_9)_s]$	0/30, -15/30, 15/30
L8_19_22_ θ_1 _ θ_2	$[(\pm\theta_1/0_8)_s // (\pm\theta_2/0_9)_s]$	0/45, -15/45, 15/45
L9_20_21_ θ_1 _ θ_2	$[(\pm\theta_1/0_8)_s // (\pm\theta_2/0_9)_s]$	-30/45, 30/45

2. DISEÑO Y FABRICACIÓN DE PROBETAS

31

ANÁLISIS NUMÉRICO DE LAS PROBETAS MD-DCB

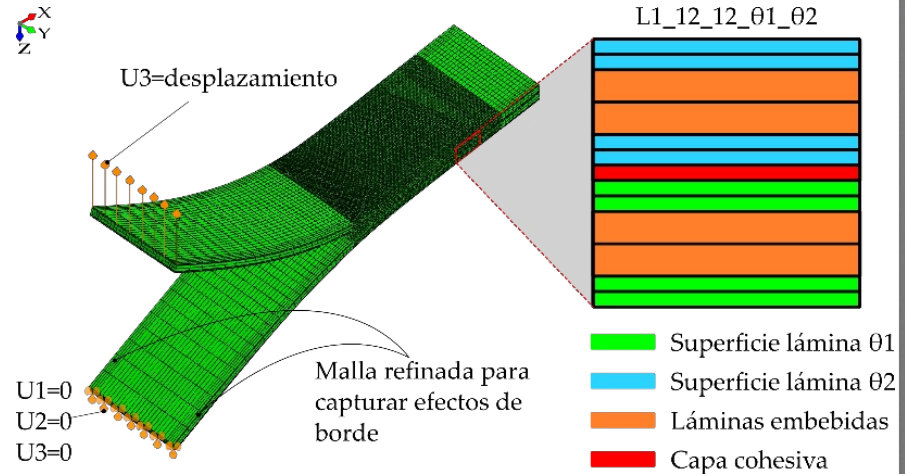
- **Análisis de la simetría del frente de grieta y el agrietamiento de la matriz en las capas de la interfase durante la propagación de la grieta en probetas DCB multidireccionales (MD-DCB) mediante elementos finitos (Abaqus/Standard 6.14)**
- **Mallado en tres zonas: pre-grieta 50 mm, zona de propagación de grieta 40 mm y zona de unión 10 mm**
- **Malla refinada en ambos bordes y en la punta de la grieta**
- **Un elemento C3D8I de 0.125 mm en la dirección del espesor para las láminas $\pm \theta$ y dos bloques de láminas embebidas en la dirección de 0°**

2. DISEÑO Y FABRICACIÓN DE PROBETAS

32

ANÁLISIS NUMÉRICO DE LAS PROBETAS MD-DCB

- Elementos cohesivos ($1\ \mu\text{m}$) para simular la propagación de grieta
- Criterio de fallo de matriz a tensión (FI) LaRC04 para analizar la aparición de grietas en la matriz que puedan facilitar la migración de plano de la grieta interlaminar o la ramificación de grietas

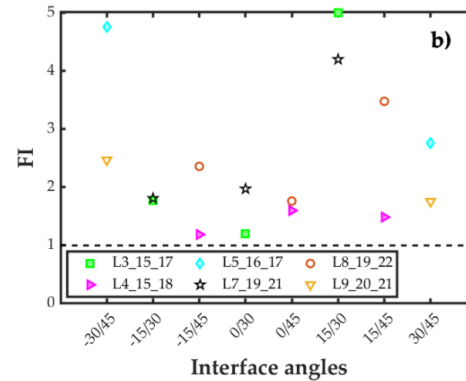
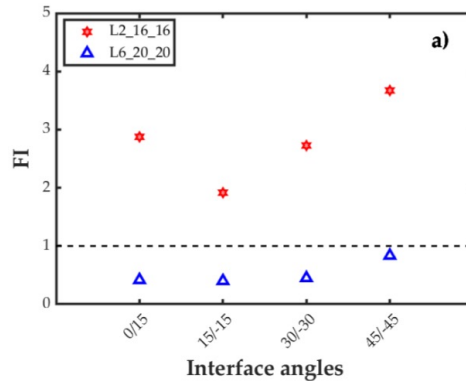


2. DISEÑO Y FABRICACIÓN DE PROBETAS

33

ANÁLISIS NUMÉRICO DE LAS PROBETAS MD-DCB

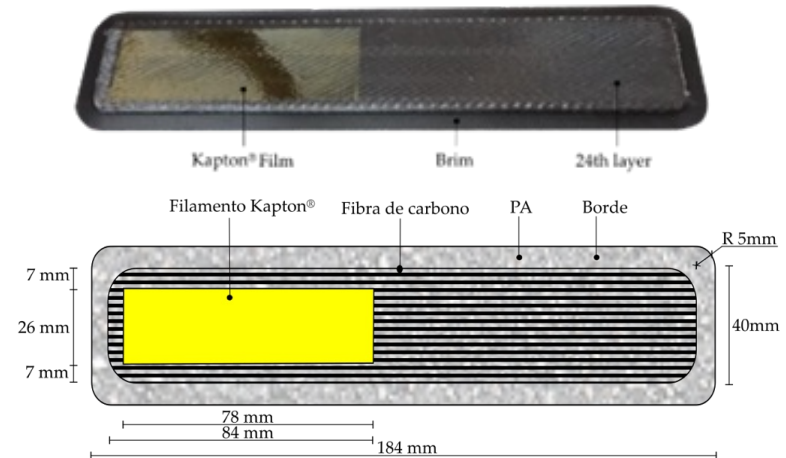
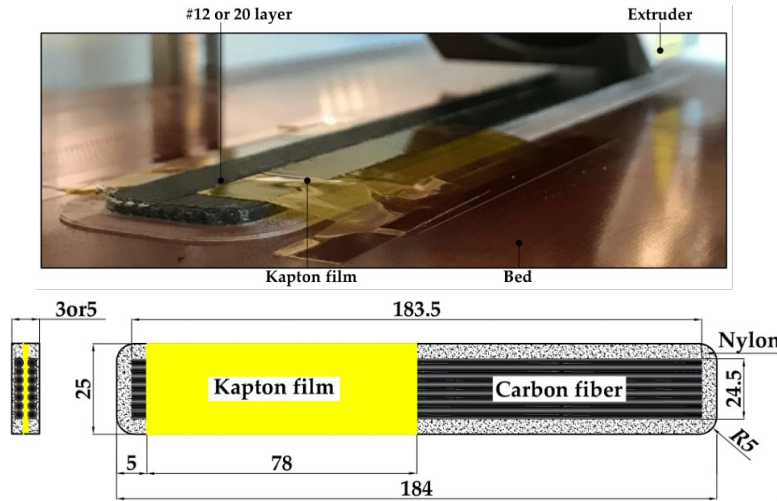
- El índice de fallo (FI) sólo es inferior a 1 para todos los laminados L6 considerados
- Factor de seguridad igual a 2 para garantizar la campaña experimental
- Las probetas MD-DCB adecuadas para ser fabricados son en base al laminado L6 y las interfases 0/15, 15/-15, 30/-30



2. DISEÑO Y FABRICACIÓN DE PROBETAS

34

- Durante la impresión de las probetas se coloca una cinta adhesiva Kapton® en el plano medio de la probeta para generar la pre-grieta



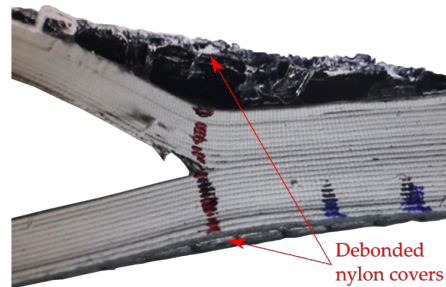
3.

CARACTERIZACIÓN EN MODO I Y MODO II

3. CARACTERIZACIÓN EN MODO I Y MODO II

36

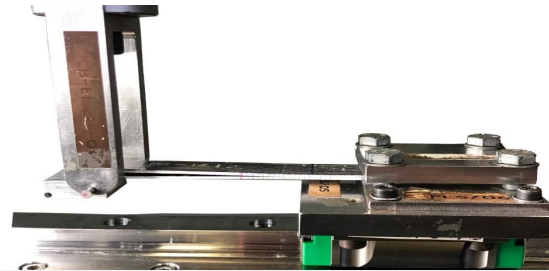
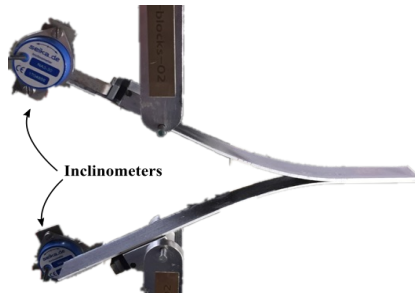
- Las probetas se cortaron a las dimensiones finales con una sierra de diamante y se pintaron los bordes con pintura blanca para seguir la propagación de la grieta
- Se pegaron bloques de carga de aluminio MW2001-6 a las muestras DCB y C-ELS con Loctite® 401. El adhesivo se dejó curar a temperatura ambiente durante 24 horas utilizando prensas manuales
- En pruebas preliminares se observó que se deben retirar las cubiertas de PA en las superficies superior e inferior antes de los ensayos



3. CARACTERIZACIÓN EN MODO I Y MODO II

37

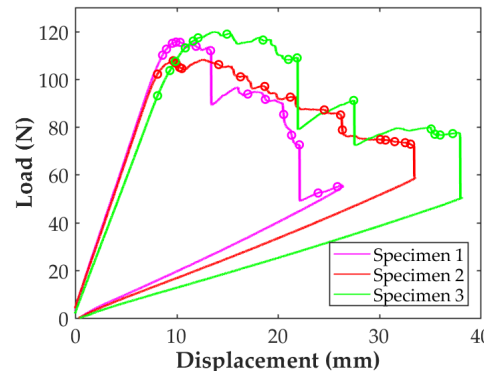
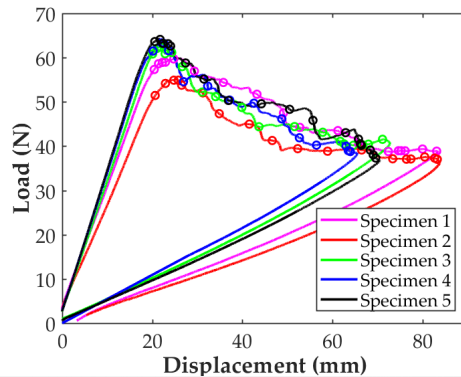
- Los ensayos se realizaron a 23 ± 2 °C y $50 \pm 5\%$ de humedad relativa utilizando una máquina de ensayos MTS Insight equipada con una celda de carga de 5 kN
- La grieta inicial creada con cinta Kapton® se extendió entre 3 y 5 mm en modo I utilizando los ensayos DCB para evitar cualquier posible efecto de la cinta y garantizar la iniciación desde una punta de grieta afilada
- Durante los ensayos, se registraron señales de fuerza y desplazamiento. También se registró la señal de los inclinómetros para las muestras DCB



3. CARACTERIZACIÓN EN MODO I Y MODO II

38

- Las probetas DCB-A (de 3 mm de grosor) mostraron una propagación suave y estable, con una baja variación entre probetas
- Las probetas DCB-B (de 5 mm de grosor) mostraron caídas de carga típicas asociadas a la propagación por *stick-slip* y una gran variación entre probetas



3. CARACTERIZACIÓN EN MODO I Y MODO II

39

- Se detectaron eventos esporádicos de puentes de fibras (*fibre-bridging*) y algunas ramificaciones de grietas (*crack branching*) en las probetas DCB-A
- Los puentes de fibras, las ramificaciones de grietas y la migración de plano fueron comunes para las probetas DCB-B. Se observó una curvatura plástica permanente en los brazos de este tipo de probetas

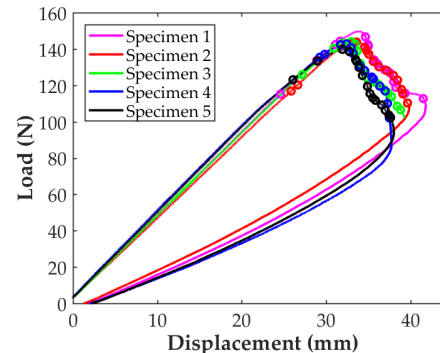
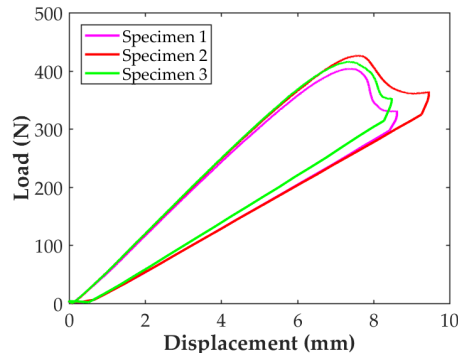


Mejor evitar las probetas gruesas para la determinación de la tenacidad a la fractura interlaminar en modo I del compuesto CF/PA impreso en 3D

3. CARACTERIZACIÓN EN MODO I Y MODO II

40

- Durante los ensayos ENF (iniciación) la grieta propagó de manera rápida e inestable hasta que se localizó debajo del rodillo de carga y se detuvo la prueba
- En los ensayos C-ELS se pudo caracterizar correctamente la iniciación y la propagación de la grieta
- Se observó una buena repetibilidad para todas las probetas de cada tipo



3. CARACTERIZACIÓN EN MODO I Y MODO II

41

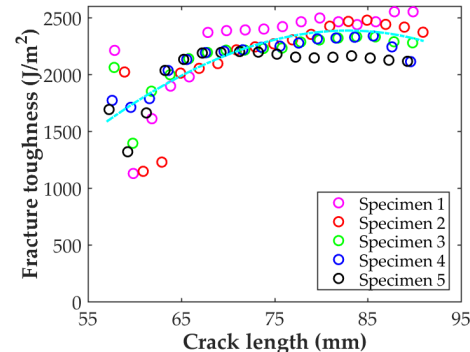
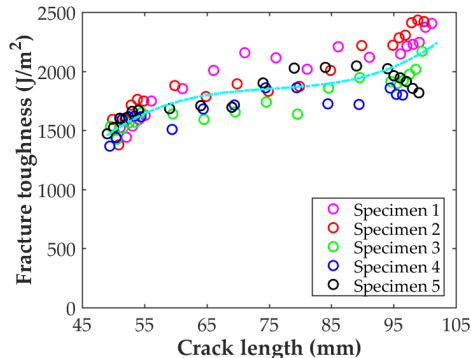
- La tenacidad a la fractura interlaminar en modo II (G_{IIc}) es mayor que en modo I (G_{Ic}) tanto para la iniciación como para la propagación
- Se observa buena concordancia entre ambos valores de iniciación para el modo II
- Tanto los valores de iniciación como de propagación para las muestras DCB-B son inferiores a los de las muestras DCB-A

Specimen	Toughness	Area met.	Data reduction method		
			J-integral	CBTE	CC
DCB-A	G_{Ici} (J/m ²)	---	1497 ± 85	---	---
	G_{Icp} (J/m ²)	1574 ± 129	1720 ± 116	---	---
DCB-B	G_{Ici} (J/m ²)	---	1064 ± 125	---	---
	G_{Icp} (J/m ²)	1452 ± 123	1265 ± 57	---	---
ENF	G_{IIci} (J/m ²)	---	---	---	1991 ± 80
C-ELS	G_{IIci} (J/m ²)	---	---	1950 ± 215	---
	G_{IIcp} (J/m ²)	---	---	2307 ± 117	---

3. CARACTERIZACIÓN EN MODO I Y MODO II

42

- La curva R para el modo I tiende a aumentar para longitudes de grieta cortas y largas, y permanece constante para el rango central de valores, en concordancia con el valor promedio de propagación
- La curva R para el modo II aumenta después de la iniciación y luego disminuye. Se observa una dispersión inicial después de unos pocos milímetros de propagación



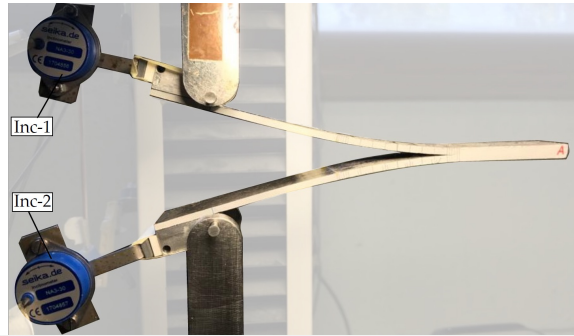
4.

CARACTERIZACIÓN MULTIDIRECCIONAL EN MODO I

4. CARACTERIZACIÓN MULTIDIRECCIONAL EN MODO I

44

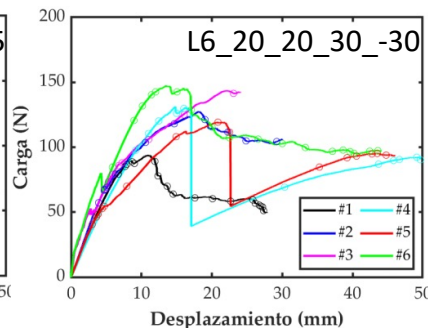
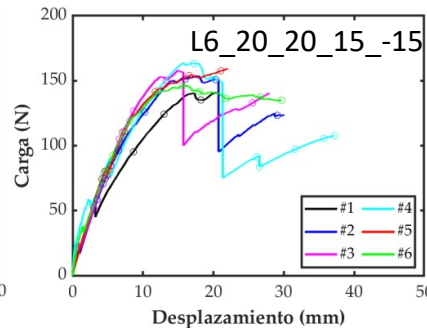
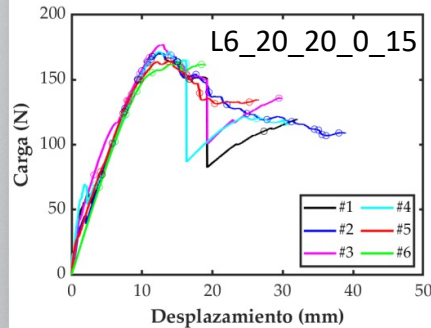
- Todos los ensayos se realizan a $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ y 50 ± 5 HR en una máquina universal MTS Insight equipada con una célula de carga de 5 kN bajo control de desplazamiento con una velocidad de 1.5 mm/min durante la carga y de 25 mm/min en la descarga
- Las probetas se instrumentan con inclinómetros para poder determinar la tenacidad interlaminar de iniciación y propagación mediante el método J-integral
- Se ensayan 6 probetas MD-DCB para cada interfase 0/15, 15/-15 y 30/-30



4. CARACTERIZACIÓN MULTIDIRECCIONAL EN MODO I

45

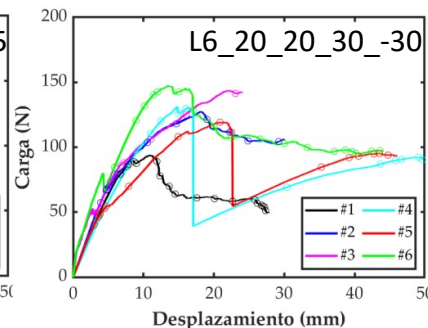
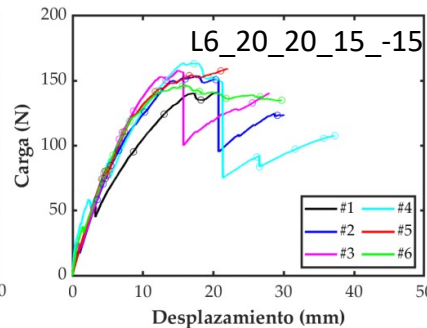
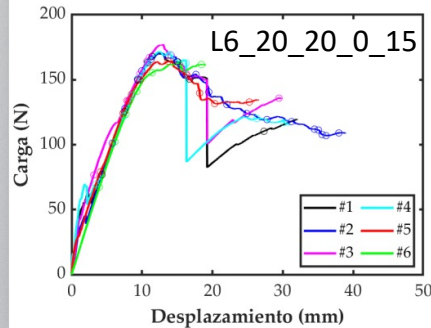
- En la mayoría de probetas se observan caídas de carga por propagación abrupta de la grieta hasta una caída de carga por propagación inestable
- Todas las probetas 0/15 se comportan de forma similar al inicio del ensayo
- Las probetas 15/-15 muestran menor repetitividad que las 0/15. La probeta 15/-15-1 muestra menor rigidez que el resto y presenta un comportamiento distinto después de la caída de carga inicial. Se descarta



4. CARACTERIZACIÓN MULTIDIRECCIONAL EN MODO I

46

- Los resultados para el lote de 30/-30 muestran mucha variabilidad
- Después de la caída de carga a los 5 mm de apertura, la rigidez de la probeta 30/-30-5 es significativamente menor que la del resto del lote. La probeta 30/-30-6 muestra una respuesta de mayor rigidez
- Las probetas 30/-30-1, 30/-30-5 y 30/-30-6 se descartan

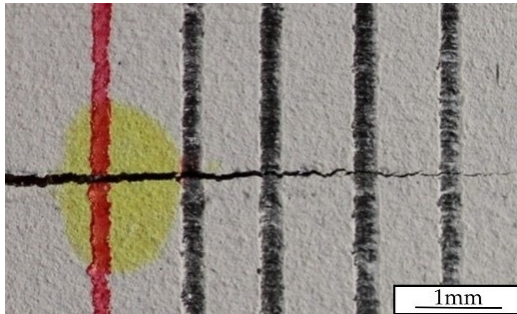


4. CARACTERIZACIÓN MULTIDIRECCIONAL EN MODO I

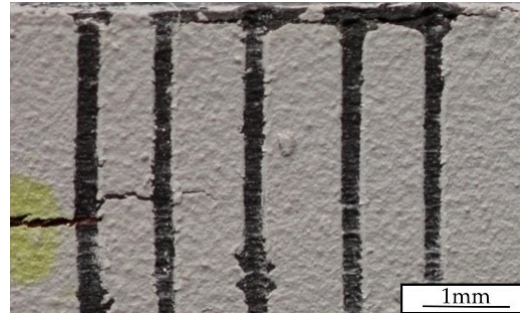
47

- Se observan 3 modos distintos de propagación además de propagación inestable y en la mayoría de casos se van alternando

Propagación continua



Migración de plano



Ramificación de grieta

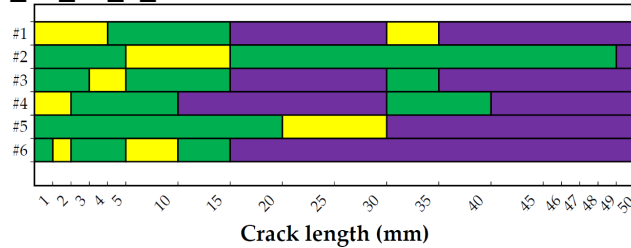


4. CARACTERIZACIÓN MULTIDIRECCIONAL EN MODO I

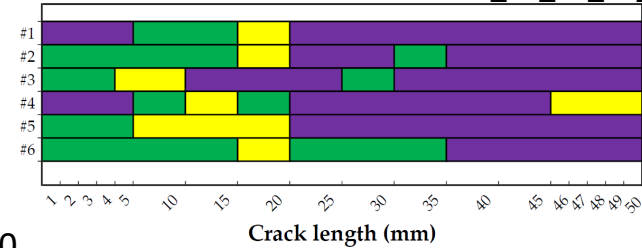
48

- Sólo aparece migración de plano en una única probeta

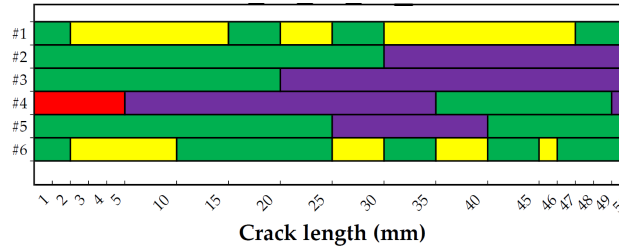
L6_20_20_0_15



L6_20_20_15_-15



L6_20_20_30_-30



4. CARACTERIZACIÓN MULTIDIRECCIONAL EN MODO I

49

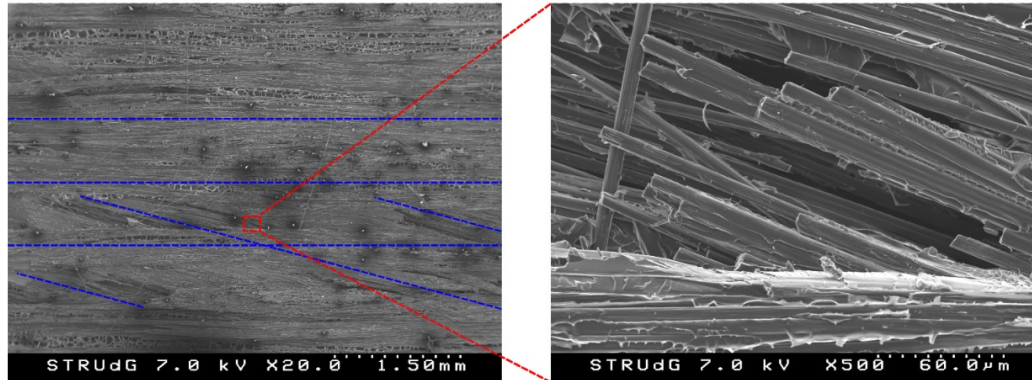
- Los valores de propagación de la tenacidad a la fractura interlaminar en modo I obtenidos con las probetas 15/-15 y 30/-30 son muy similares a los de las probetas unidireccionales

Interfase	Tenacidad fractura (J/m ²)	
	Iniciación	Propagación
0/0*	1497 ± 85	1720 ± 116
0/15	1763 ± 159	2146 ± 100
15/-15	870 ± 71	1720 ± 251
30/-30	960 ± 655	1758 ± 345

4. CARACTERIZACIÓN MULTIDIRECCIONAL EN MODO I

50

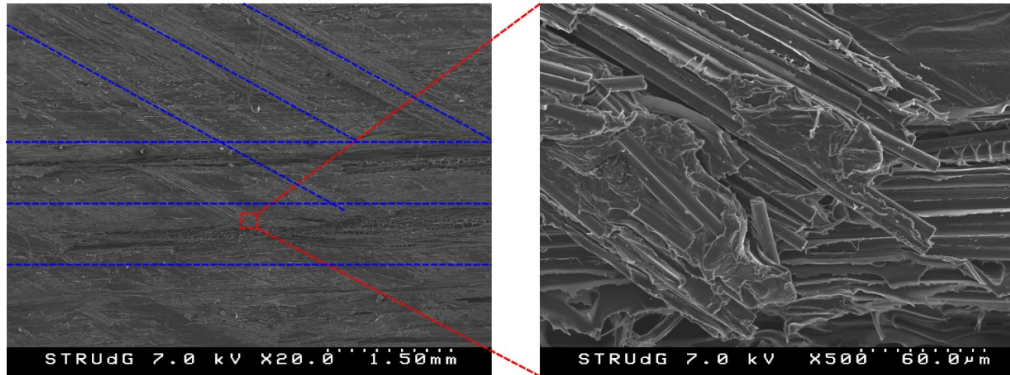
- La superficie de la lámina a 15° de la muestra 0/15 revela surcos entre filamentos depositados, áreas con vacíos (burbujas de aire) y algunas fibras sueltas
- También entrecruzamiento de filamentos y fibras a 15° arrancadas de la resina y rotas durante la delaminación y deformación plástica de la resina



4. CARACTERIZACIÓN MULTIDIRECCIONAL EN MODO I

51

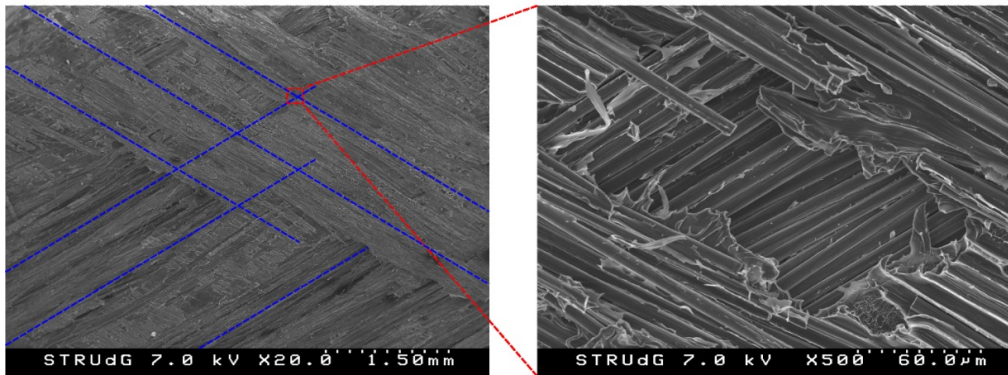
- La superficie de fractura de la lámina de 15° de la probeta 15/-15 muestra menos vacíos y fibras rotas
- También hay entrecruzamiento entre láminas, además de un grupo de fibras a 15° con fragmentación y arrancadas con deformación plástica de la resina adyacente



4. CARACTERIZACIÓN MULTIDIRECCIONAL EN MODO I

52

- La superficie de fractura de la lámina de 30° de la probeta 30/-30 muestra zonas de resina dominante, como también varias fibras rotas
- Entrecruzamiento entre las láminas y un área central de fibras de 30° que se han retirado de la superficie, además de huellas de fibras desprendidas de la resina y varias fibras rotas



5.

CONCLUSIONES

5. CONCLUSIONES

54

- Es posible caracterizar la tenacidad a la fractura interlaminar del compuesto de CF/PA impreso en 3D de Markforged MarkTwo® utilizando probetas monolíticas sin refuerzos adicionales
- El uso de probetas DCB de mayor grosor involucra mecanismos de daño no deseados y puede conducir a caracterizaciones incorrectas de la tenacidad a la fractura interlaminar en modo I
- Los valores medidos de G_{Ic} , tanto para la iniciación como para la propagación, 1497 y 1720 J/m², son menores que los valores medidos para G_{IIc} , 1950 y 2307 J/m²

- Las probetas MD-DCB con brazos de rigidez a flexión similar garantizaron una apertura en modo I puro durante todo el ensayo
- Solo una de las 18 probetas caracterizadas mostró salto de grieta y únicamente al inicio del ensayo
- La diferencia de los ángulos de orientación de las interfases de las probetas afecta al valor de la tenacidad interlaminar del material y a la repetibilidad del ensayo
- El análisis de fractográfico revela que la grieta no se propaga a lo largo de un plano uniforme, la morfología de la propagación es similar a una onda entre los filamentos depositados entre las láminas

Este trabajo de investigación fue financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades (MCIU) de España, la Agencia Española de Investigación (AEI) y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER, UE), con el número de subvención RTI2018-094435-B-C32, y se ha diseminado mediante dos publicaciones científicas:

- Santos, J.D.; Fernández, A.; Ripoll, L.; Blanco, N. Experimental Characterization and Analysis of the In-Plane Elastic Properties and Interlaminar Fracture Toughness of a 3D-Printed Continuous Carbon Fiber-Reinforced Composite. *Polymers* 2022, 14, 506. <https://doi.org/10.3390/polym14030506>
- Santos, J.D.; Guerrero, J.M.; Blanco, N.; Fajardo, J.I.; Paltán, C.A. Numerical and Experimental Analysis of the Mode I Interlaminar Fracture Toughness in Multidirectional 3D-Printed Thermoplastic Composites Reinforced with Continuous Carbon Fiber. *Polymers* 2023, 15, 2403. <https://doi.org/10.3390/polym15102403>

**MUCHAS GRACIAS
POR VUESTRA
ATENCIÓN**



AMADE
ANALYSIS AND ADVANCED MATERIALS
FOR STRUCTURAL DESIGN

**Universitat
de Girona**