

# Fabricación aditiva FFF de materiales compuestos reforzados con fibra de carbono bioinspirados

Carlos Izquierdo-Martín<sup>1</sup>, Saber Maamri<sup>1</sup>, Leticia Aguado-Ferreira<sup>1</sup>, Jorge Bautista-Pérez<sup>1</sup>, María Elena Hernández-García<sup>1</sup>, Roberto Guzmán de Villoria<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Grupo de investigación LAMCOM, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Salamanca, España.  
Email: [carlos.izquierdo@usal.es](mailto:carlos.izquierdo@usal.es)

## Resumen

En este estudio se utilizó la bioinspiración en la estructura pared de ladrillo del nácar para solucionar la problemática del fallo catastrófico de los materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibra de carbono continua (CFRP). Esta estructura ha sido implementada con éxito en CFRP termoestable a través de procesos manuales y automáticos, confirmando que su fallo catastrófico puede evitarse a través de esta estructura bioinspirada. En CFRP termoplástico es necesario desarrollar otros métodos de fabricación y por ello, esta investigación busca aprovechar dicha estructura en dicho material termoplástico a través de la fabricación aditiva. Para ello, se fabricaron y caracterizaron dos tipos de probetas determinando que existe una relación entre el espesor por capa utilizado y la resistencia a cortadura de la muestra. En cuanto al material bioinspirado, se ha demostrado el potencial de la fabricación aditiva para producir estos materiales.

**Palabras clave:** CFRP; bioinspiración; “pared de ladrillo”; FFF.

## Abstract

In this study, bioinspiration from the “brick and mortar” structure of nacre was used to address the issue of catastrophic failure in continuous carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composite materials. This structure has been successfully implemented in thermoset CFRP through both manual and automated processes, confirming that catastrophic failure can be avoided through this bioinspired design. For thermoplastic CFRP, other manufacturing methods need to be developed. Consequently, this research aims to utilize this structure in thermoplastic material through additive manufacturing. Two types of specimens were fabricated and characterized, demonstrating a relationship between the layer thickness and the shear strength of the samples. Regarding the bioinspired material, the potential of additive manufacturing to produce these materials has been demonstrated.

**Keywords:** CFRP; bioinspiration; “brick and mortar”; FFF.

## 1. Introducción

En los últimos años, los polímeros reforzados con fibra de carbono (CFRP) han experimentado avances notables, especialmente en sectores como el aeroespacial, el automotriz o el deportivo, donde el aumento de las propiedades mecánicas y la reducción de peso son esenciales. Las propiedades mecánicas que hacen que estos materiales sean ampliamente demandados en dichos sectores son su alta resistencia

a la tracción y a la fatiga y su elevada rigidez y tenacidad. Todo ello se une a su baja densidad, dando lugar a un material con una excelente relación resistencia-peso [1], [2].

A pesar de sus excelentes propiedades mecánicas, estos materiales fallan de manera frágil, lo cual conduce al denominado fallo catastrófico. Este inconveniente limita su uso y provoca que deban emplearse altos coeficientes de seguridad, con el aumento de coste que esto supone [1].

En este sentido, la biomimética se presenta como una buena solución a estos problemas mediante diseños relativamente simples que se encuentran en la naturaleza. Destaca la estructura “ladrillo y mortero” del nácar, un material que presenta una gran relación entre tenacidad-resistencia, así como una gran tolerancia al daño a pesar de estar formado por plaquetas frágiles de aragonito. Este comportamiento se debe a la estructura pared de ladrillo consistente en un diseño continuo que aglomera las plaquetas frágiles (ladrillos) que proporcionan la resistencia a través de una matriz continua (mortero) que distribuye la carga entre los distintos ladrillos y disipa parte de la energía [1], [2].

Esta estructura se ha implementado con éxito en CFRP termoestable utilizando procesos manuales y automatizados como la colocación automática de cintas (ATL) [1], [2]. Sin embargo, para desarrollar estas estructuras en CFRP termoplástico, es necesario desarrollar otras técnicas de fabricación. En este caso se utiliza un método novedoso basado en la fabricación aditiva con una impresora FFF (Fabricación por Filamento Fundido) previamente modificada para imprimir con CFRP continuo. El método consiste en la extrusión de un filamento de material compuesto de polímero termoplástico reforzado con fibra de carbono continua al cual se le van realizando cortes a la longitud deseada durante el proceso de impresión.

En este estudio, se busca demostrar el potencial de la fabricación aditiva a través del método citado para la fabricación de estructuras bioinspiradas de CFRP termoplástico con el fin de solucionar/disminuir la problemática asociada a estos materiales. Para ello, se han fabricado y caracterizado probetas con geometría para el ensayo *Single Lap Shear* (probetas de SLS) con distintos espesores por capa (0.2, 0.25 y 0.35 mm) para evaluar la influencia de este parámetro en la resistencia

a cortadura, así como muestras bioinspiradas con distintas longitudes de ladrillo (25 y 50 mm).

## 2. Método(s), metodología

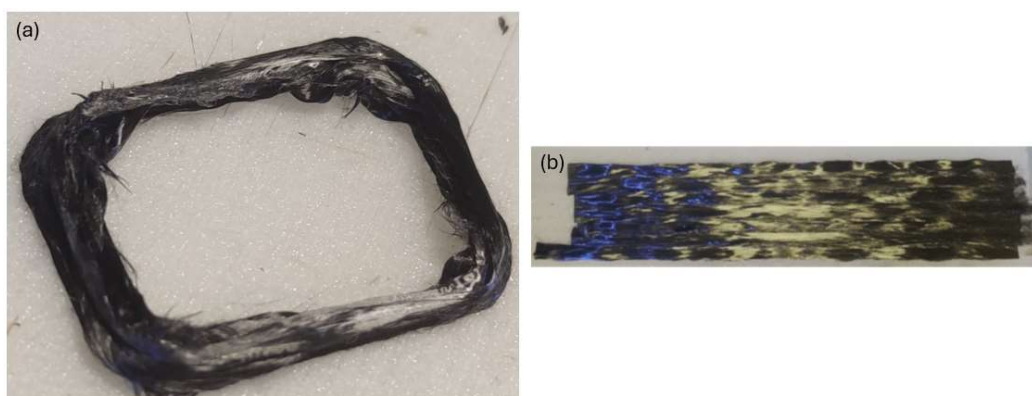
### 2.1. Materiales

El material utilizado en este estudio es un filamento de 1.1 mm de diámetro de material compuesto polimérico termoplástico reforzado con fibra de carbono continua (CF/PA). El contenido de fibra es del 45%.

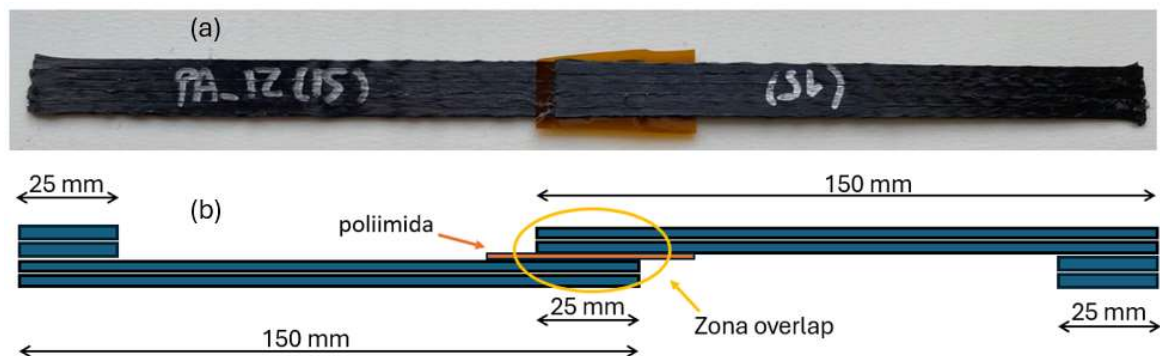
Se trata de un material confidencial y, por ello, no se pueden ofrecer más datos acerca del mismo.

### 2.2. Fabricación

La fabricación se llevó a cabo a través de una impresora 3D comercial de Fabricación por Filamento Fundido (FFF) con dos cabezales, uno de los cuales fue modificado previamente para imprimir con el tipo de material utilizado en este estudio. Este está formado principalmente por una boquilla novedosa, un extrusor y un sistema de corte. Todos los parámetros del proceso involucrados en la impresión con este novedoso cabezal pueden ser controlados directamente a través de la programación en G-code. Actualmente, las muestras lineales pueden ser impresas fácilmente, pero para muestras con curvaturas, se requiere aún una mayor optimización de parámetros (Figura 1). En este estudio, se optimiza el proceso de impresión en términos del espesor por capa, parámetro que afecta a la compresión/planchado del filamento y, por lo tanto, a la calidad de la muestra impresa, a través de la fabricación y caracterización de probetas con geometría para el ensayo *Single Lap Shear* (denominadas de ahora en adelante probetas de SLS) con distintos espesores por capa (0.2, 0.25 y 0.35 mm). Una vez realizada esta optimización, se imprimieron y caracterizaron probetas bioinspiradas con estructura



**Figura 1.** Muestra con curvatura (a) y muestra lineal (b).



**Figura 2.** Probeta de SLS: (a) Muestra real; (b) Diagrama esquemático.

“brick and mortar” con longitudes de ladrillo de 25 y 50 mm, programando la impresora para que realizara los cortes en el filamento en tramos de esa distancia, y se compararon con la correspondiente continua.

### 2.3. Caracterización de las muestras impresas

En este apartado se presentan las distintas técnicas empleadas en la caracterización de las probetas impresas.

#### 2.3.1. Inspección visual

La inspección visual de las muestras impresas se utilizó en este estudio con el objetivo de realizar un primer examen de las muestras impresas y de localizar algunos de los defectos más comunes. Hay que señalar que los defectos se exponen en este caso con el objetivo de analizar la fabricación con la impresora utilizada en esta investigación y que dichas probetas defectuosas fueron desechadas.

#### 2.3.2. Caracterización morfológica

Después de la inspección visual de las probetas, se realizó su caracterización morfológica. Se cortaron fragmentos de las distintas muestras impresas y se introdujeron en un cilindro de resina, el cual fue posteriormente pulido. Tras ello, se examinó la sección transversal de dichas muestras mediante microscopía óptica (Leica DMLP con cámara Leica ICC50W).

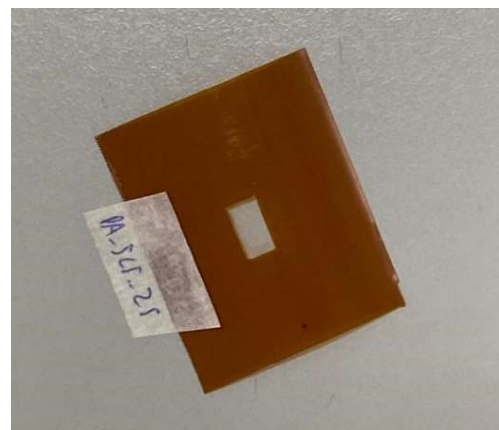
#### 2.3.3. Caracterización física-química

Este tipo de caracterización fue empleada para analizar el grado de cristalinidad de las distintas muestras impresas con el objetivo de observar si el espesor por capa tenía o no influencia. Se realizó a través de calorimetría diferencial de barrido mediante un DSC25 de TA Instruments.

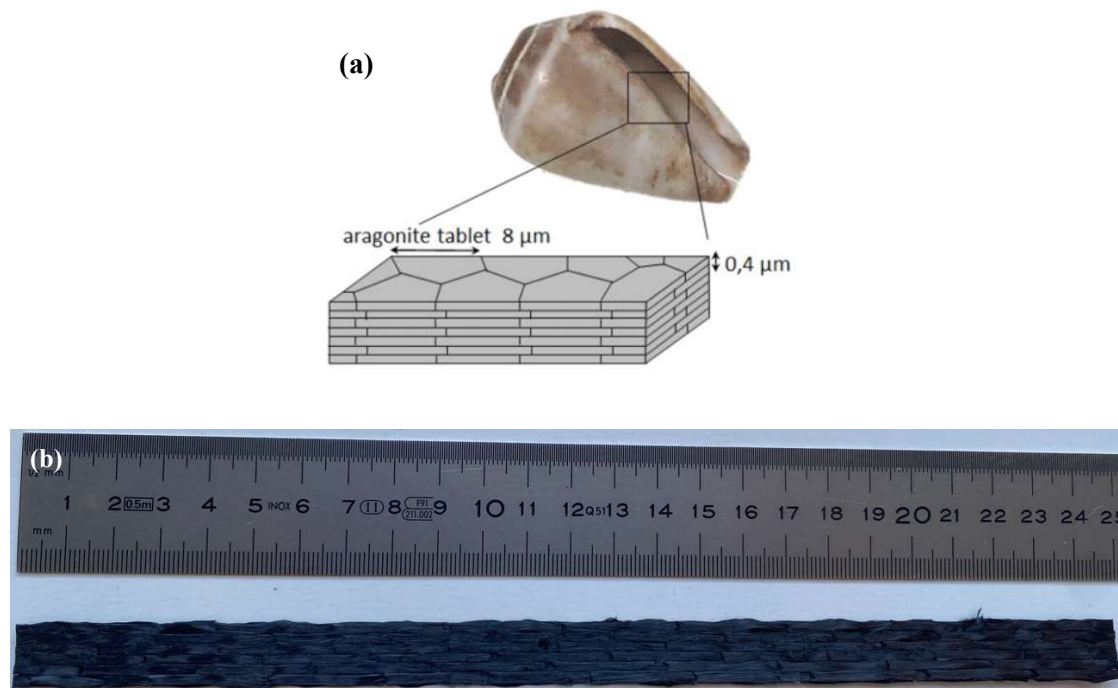
#### 2.3.4. Caracterización mecánica

La caracterización mecánica se realizó mediante el ensayo SLS y mediante el ensayo de tracción en las bioinspiradas. En ambos casos se utilizó la máquina universal de ensayos Ibertest STIB-200W con una célula de carga de 50 kN y a una velocidad de desplazamiento de 2 mm/min.

El ensayo SLS se utilizó para medir la resistencia a cortadura de las probetas. Este método, como se observa en la Figura 2, implica la necesidad de crear una probeta continua con una zona claramente definida en la que poder medir dicha resistencia. Con el objetivo de tener una zona de unión entre las dos partes de la probeta con un área perfectamente conocida, se coloca, en la zona de solapamiento entre ambas partes, una lámina de un material que no se adhiere al filamento impreso con una zona rectangular recortada de área conocida (5 mm x 10 mm), en la que se produce la unión (Figura 3).



**Figura 3.** Lámina colocada en la zona de solapamiento entre las dos partes de la probeta.



**Figura 4.** Probeta bioinspirada: (a) Estructura ladrillo y mortero del nácar [1]; (b) Muestra bioinspirada para el ensayo de tracción.

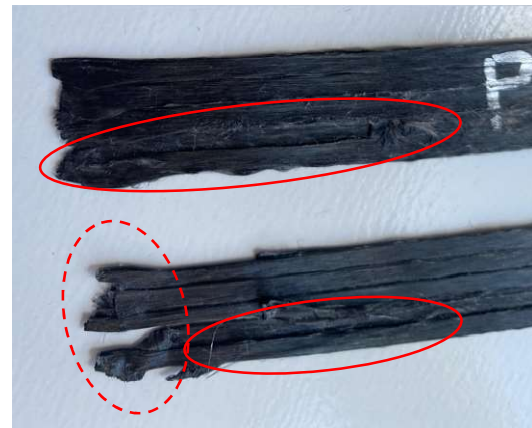
Las principales propiedades mecánicas de las probetas bioinspiradas se obtuvieron a través del ensayo de tracción, realizado de acuerdo a la norma ASTM D3039/D3039M [3]. Un ejemplo de probeta fabricada para este ensayo es la que se muestra en la Figura 4 junto a la correspondiente estructura “ladrillo y mortero” del nácar.

### 3. Resultados

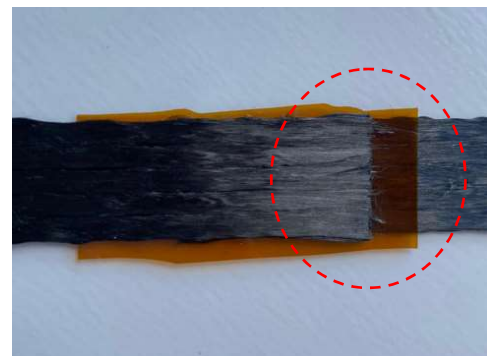
#### 3.1. Defectos detectados mediante inspección visual

En algunas de las probetas impresas existen una serie de defectos recurrentes que pueden observarse a simple vista. En la Figura 5 se puede observar una probeta de SLS en la cual existe una zona vacía en la segunda capa consecuencia directa de la falta de adherencia en la deposición de una tira y del posterior arrastre de esta por parte de la boquilla. Mediante la optimización de los parámetros de fabricación y programación, se consigue el alineamiento de las tiras (Figura 6).

Otro defecto existente en este tipo de probetas es la presencia de parte de una tira suelta que no ha sido correctamente adherida a la capa anterior y con una cierta curvatura consecuencia directa de las contracciones que ocurren durante su enfriamiento y del efecto de la lámina colocada en la zona de solapamiento (Figura 7). En los casos en los que se ha producido, se han descartado las probetas.



**Figura 5.** Zona vacía en la parte extrema de la segunda capa de una probeta de SLS.



**Figura 6.** Final correcto de cada una de las tiras depositadas, en la zona de solapamiento.





**Figura 7.** Línea de la segunda capa no adherida en su extremo y curvada como consecuencia del enfriamiento sufrido.

Otros defectos existentes, en este caso en probetas bioinspiradas serían la falta de alineamiento de los cortes (Figura 8) y una mala calidad superficial de la muestra en la zona de los cortes (Figura 9).



**Figura 8.** Falta de alineamiento en los cortes de una probeta bioinspirada en la que los cortes de cada capa debían estar alineados.



**Figura 9.** Mala calidad superficial en la zona de los cortes.

### 3.2. Morfología de la sección transversal

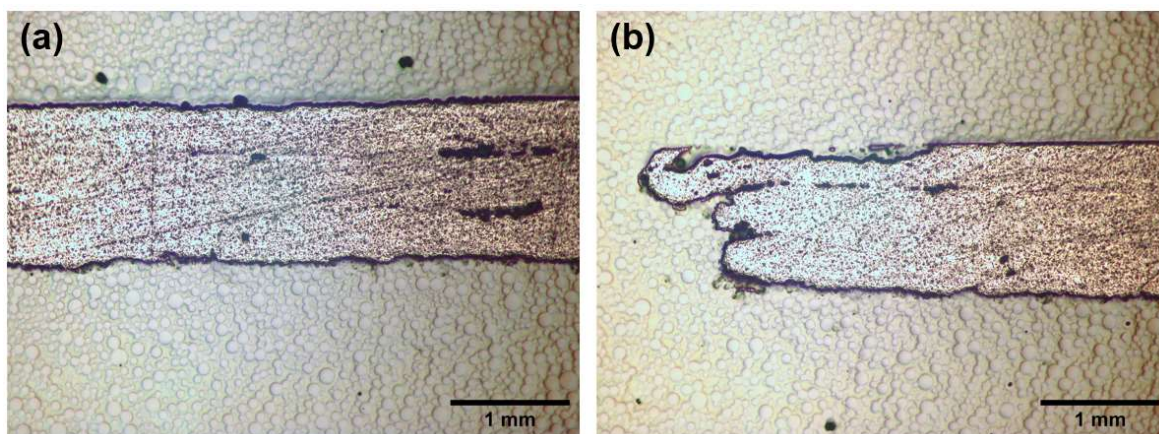
En este apartado se presenta y analiza la sección transversal, tanto de una probeta de SLS formada por dos capas (Figura 10) como de una probeta bioinspirada formada por tres (Figura 11) apreciando de forma común en ambos casos que la porosidad de las muestras es notablemente baja a través del proceso de impresión utilizado. Dicha porosidad se cuantifica en este caso de forma cualitativa, a través del análisis de las imágenes obtenidas.

En el primer caso, es evidente cómo el filamento ha sido comprimido debido a la alta temperatura y presión aplicadas durante el proceso de impresión transformando la sección transversal circular del filamento de 1.1 mm de diámetro en una forma más o menos ovalada con sus zonas superior e inferior planas, de 2 x 0.3 mm aproximadamente. En la Figura 10 se puede apreciar claramente como la cohesión entre las dos capas es muy buena puesto que la zona de unión entre ambas es inapreciable (imágenes a y b) probablemente consecuencia de las altas fuerzas de compresión aplicadas, pero la unión entre filas es peor, sobre todo en la capa superior, donde existe un gran hueco entre las filas impresas. En la Figura 10 (c) se muestra la gran irregularidad que presenta el extremo de la sección transversal.

En el caso de las bioinspiradas (3 capas), ocurre lo contrario y es que existe cierta porosidad que delata la unión entre las tres capas presentes, pero la unión entre



**Figura 10.** Microscopía óptica de la sección transversal de una muestra de SLS de 2 capas: (a) Parte central de la sección; (b) Imagen detallada de la parte central; (c) Lateral de la sección.



**Figura 11.** Microscopía óptica de la sección transversal de una probeta bioinspirada de 3 capas: (a) Parte central de la sección; (b) Lateral de la sección.

filas es prácticamente inapreciable. Al igual que en el caso de las probetas de SLS, el extremo de la sección transversal es muy irregular (Figura 11).

### 3.3. Cristalinidad de las muestras

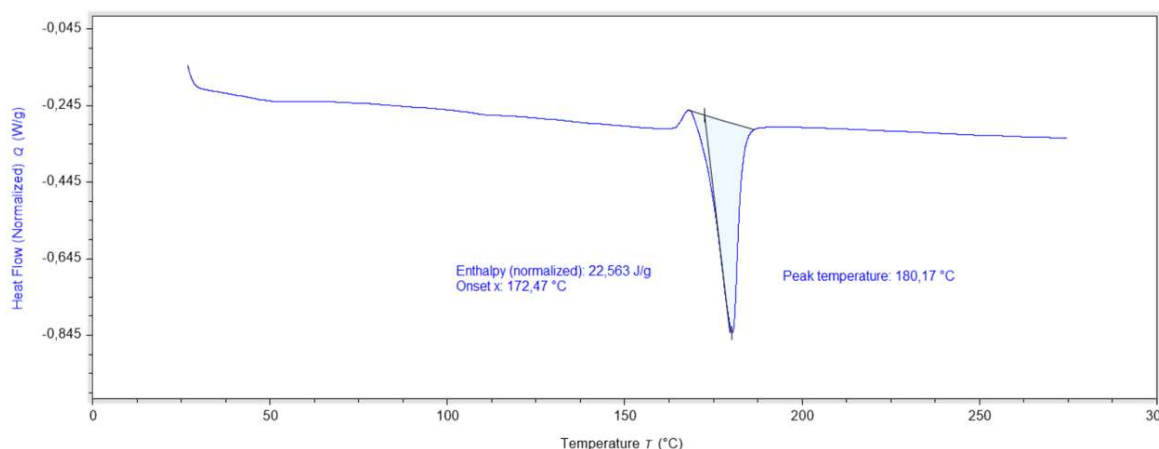
Con el objetivo de calcular el grado de cristalinidad de las muestras y observar si había cambios entre los distintos tipos, se realizaron cinco DSC (en la Figura 12 se muestra la gráfica obtenida para el caso de espesor por capa 0.35 mm, análoga a las obtenidas en los demás casos) mediante los cuales se obtuvo tanto la temperatura de fusión ( $T_m$ ) como la entalpía de fusión ( $\Delta H_m$ ) de cada una de ellas, necesarias para el cálculo del grado de cristalinidad (ecuación (1)). Los demás parámetros necesarios para el cálculo son la entalpía de la PA pura ( $\Delta H_m^0$ ) y la relación en peso de la matriz termoplástica en el filamento de material compuesto ( $\alpha$ ).

$$X_c = \frac{\Delta H_m}{\alpha \times \Delta H_m^0} \quad (1)$$

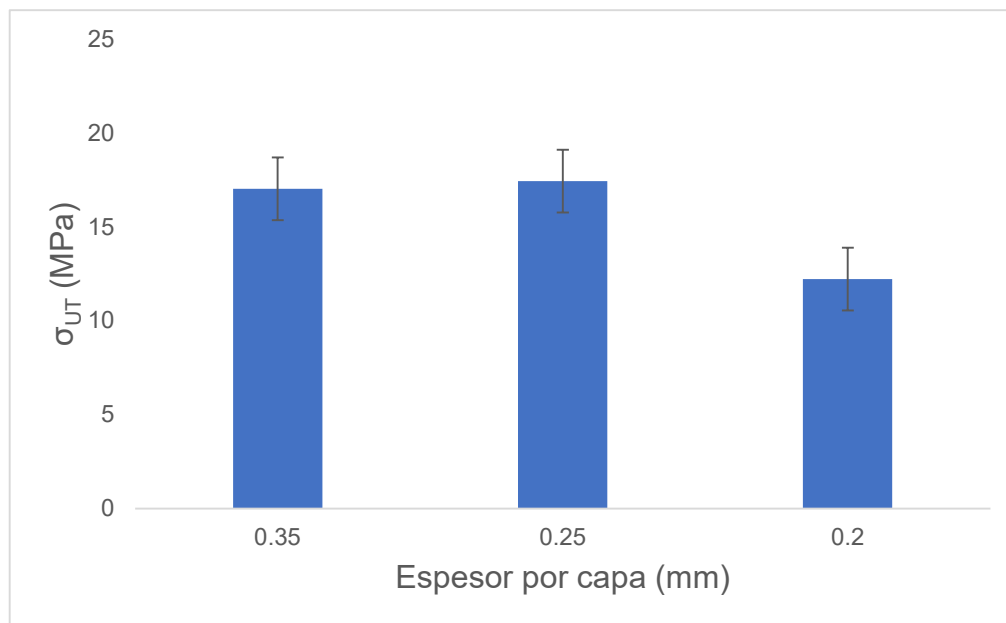
A través de los resultados obtenidos en los DSC realizados se concluye que en el grado de cristalización de la muestra no existe influencia ni del espesor por capa ni de la diferente fabricación entre probetas SLS y bioinspiradas.

### 3.4. Efecto del espesor por capa en la resistencia a cortadura

La Figura 13 muestra la resistencia a cortadura de las muestras fabricadas con espesores por capa de 0.2, 0.25 y 0.35 mm, con un área de cálculo de ( $5 \times 10 \text{ mm}^2$ ). Analizando los resultados obtenidos, se observa que la resistencia para los espesores de 0.25 y 0.35 mm no



**Figura 12.** Gráfica del DSC de una muestra de 0.35 mm de espesor por capa.



**Figura 13.** Gráfico de barras comparativo de las resistencias a cortadura obtenidas para cada espesor por capa [4].

varía significativamente, mientras que la obtenida para el caso de 0.2 mm es notablemente inferior.

### 3.5. Tensión de rotura de las probetas bioinspiradas

La caracterización mecánica de las probetas bioinspiradas de 25 y 50 mm se llevó a cabo a través del ensayo de tracción, obteniendo los valores de tensión de rotura que se exponen en el gráfico de la Figura 14, junto al obtenido para una probeta continua fabricada con los mismos parámetros.

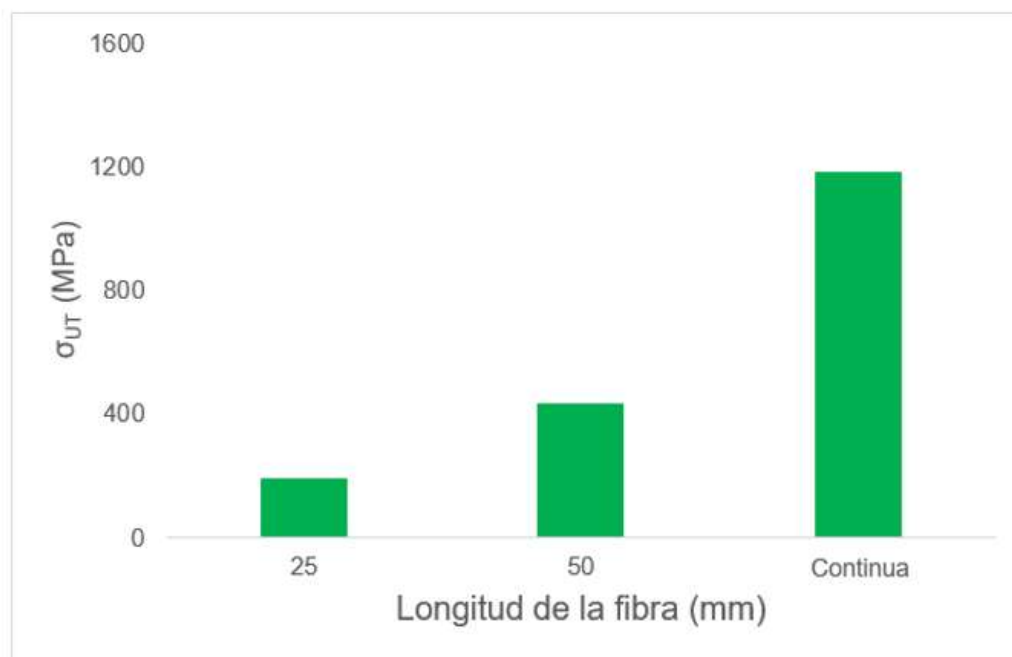
A través de dicha comparativa se determina que respecto a la probeta continua, el hecho de realizar cortes en la fabricación de las probetas resulta en una disminución significativa de la resistencia a tracción, mayor cuanto menor es la longitud del ladrillo escogida. Esta reducción es superior al 65 % para las muestras de 50 mm y al 85 % para las de 25 mm, valores considerablemente superiores a las reducciones de resistencia observadas en materiales fabricados mediante colocación automática de fibra (55 % y 59 % para longitudes de fibra de 50 y 25 mm, respectivamente [1]). Este hecho podría atribuirse a las bajas fuerzas de adhesión obtenidas mediante la fabricación aditiva de materiales termoplásticos continuos en comparación con las obtenidas utilizando preimpregnados termoestables estándar.

## 4. Conclusiones

En este estudio se investigó la influencia del espesor por capa en la fabricación aditiva con CF/PA para diferentes valores de este parámetro a través de la fabricación y caracterización de probetas con geometría para el ensayo *Single Lap Shear*. Los resultados experimentales demuestran que existe una relación entre el espesor de la capa y la resistencia a cortadura de las muestras.

Además, se fabricaron mediante el mismo método y con el mismo material, probetas bioinspiradas con distintas longitudes de ladrillo. Como era de esperar, el hecho de producir cortes en el filamento, y en consecuencia en la fibra, reduce la resistencia a tracción de las muestras, pero mejora su comportamiento frente al fallo. Esta disminución en la tensión de rotura es mayor cuanto menor es la longitud del ladrillo escogida.

Estos experimentos han dado lugar a resultados muy prometedores respecto a las características del material CF/PA cuando se imprime en 3D, ofreciendo un gran potencial en el campo de la fabricación aditiva. La investigación futura se centrará en un análisis más exhaustivo de los resultados obtenidos, así como en la producción y caracterización de nuevas muestras que permitan explorar más a fondo todo ello.



**Figura 14.** Gráfico de barras comparativo entre las tensiones de rotura obtenidas en probetas bioinspiradas con distintas longitudes de ladrillo frente a la correspondiente continua [4].

## 5. Agradecimientos

Los autores de este artículo desean agradecer a J. Concepción-Viñas y J. Sánchez-García por su asistencia en el taller. Este trabajo fue parcialmente apoyado por la UE Next Generation y Castilla y León, Planes complementarios de investigación y desarrollo con las regiones autónomas en acciones de I+D, Componente 17, Inversión 1 (C17.I1) del plan de recuperación, transformación y resiliencia, y el Ministerio de Economía y Competitividad de España (Proyecto BIOINSP-CFRP, PID2020-119003 GB-I00 y Proyecto USC-CFRTP, PID2023-150637OB-I00). Los autores desean agradecer al programa INFRARED, Consejería de Educación de la Junta de Castilla y León, Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER), "Europa impulsa nuestro crecimiento". R. Guzmán de Villoria fue apoyado financieramente a través del "Programa de Consolidación Investigadora" (CNS2022-136070) otorgado por el Ministerio de Ciencia e Innovación. Los autores desean agradecer al Programa Investigo, apoyado por la UE Next Generation.

## 6. Referencias

[1] V. Rodríguez-García and R. Guzman de Villoria, "Automated manufacturing of bio-inspired carbon-

fibre reinforced polymers," *Compos B Eng*, vol. 215, 2021, doi:10.1016/j.compositesb.2021.108795.

[2] V. Rodríguez-García, M. Herráez, V. Maronez, and R. Guzman de Villoria, "Interlaminar and translaminar fracture toughness of Automated Manufactured Bio-inspired CFRP laminates," *Compos Sci Technol*, vol. 219, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.compscitech.2021.109236.

[3] ASTM D3039/D3039M-17. Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. Available online: <https://www.ast.org/Standards/D3039>.

[4] J. Bautista, C. Izquierdo, S. Maamri, L. Aguado and R. Guzmán de Villoria, R. Guzman de Villoria, Fused Filament Manufacturing of Bioinspired Carbon Fiber Reinforced Polymers, 21<sup>st</sup> European Conference on Composites Materials (ECCM21), 2024, Nantes, France, June 2-5.