

EFFECT OF THE FIBER-MATRIX SEPARATION ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF A FIBERGLASS REINFORCED POLYAMIDE FORGED BEAM

U. Olaziregi^{*1}, M. Baskaran², U. Morales¹, A. Esnaola¹, L. Aretxabaleta y J. Aurrekoetxea², Udane Olaziregi³

1 Departamento de Mecánica y Producción Industrial, Mondragon Unibertsitatea, Hernani, 20120, España

2 Departamento de Mecánica y Producción Industrial, Mondragon Unibertsitatea, Mondragón, 20500, España

3 Universidad de Mondragon Mondragon Unibertsitatea

Abstract

In the present work, ribbed beams have been manufactured by forging fiberglass-reinforced polyamide using two different temperatures. The higher processing temperature studied (300 °C) ensures the filling of the mold in the forging/GMT process, but also increases the fiber-matrix separation phenomenon, limiting the length of the rib with fiber (11%). This heterogeneity in the fiber content translates into a loss of stiffness and strength in the area of the rib with respect to the area of the base, of 70 and 60% respectively, for the most severe case (300 °C). The second contribution of the work has been the demonstration of additive manufacturing, more specifically pellet extrusion, as a rapid prototyping technology in structural studies, since the stiffness of the 3D printing component was in intermediate values of the two forged prototypes, but its strength and elongation at break have been even higher.

OPEN ACCESS

Published: 18/07/2022

Accepted: 08/06/2022

DOI: 10.23967/r.matcomp.2022.07.046

Keywords:

Fiber-matrix separation
Forge
Ribbed beam
Bending

EFFECTO DE LA SEPARACIÓN FIBRA-MATRIZ SOBRE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE UNA VIGA FORJADA EN POLIAMIDA REFORZADA CON FIBRA DE VIDRIO

U. Olaziregi*, M. Baskaran, U. Morales, A. Esnaola, L. Aretxabaleta y J. Aurrekoetxea

Departamento de Mecánica y Producción Industrial, Mondragon Unibertsitatea, Hernani, 20120, España
udane.olaziregui@alumni.mondragon.edu

RESUMEN

En el presente trabajo se han fabricado vigas nervadas mediante forja de poliamida reforzada con fibra de vidrio utilizando dos temperaturas diferentes, 270 °C y 300 °C. La mayor temperatura de procesamiento estudiada (300 °C) asegura el llenado del molde en el proceso forja/GMT, pero también aumenta el fenómeno de la separación fibra-matriz, limitándose la longitud del nervio en el que se encuentra fibra al 11%. Esta heterogeneidad en el contenido de fibra se traduce en una pérdida de rigidez y resistencia en la zona del nervio con respecto a la zona de la base, del 70 y 60% respectivamente para el caso más severo (300 °C). La segunda contribución del trabajo ha sido la demostración de la fabricación aditiva, más concretamente de extrusión de granza, como tecnología de prototipado rápido en estudios estructurales, ya que la rigidez del componente de impresión 3D estaba en valores intermedios de los dos prototipos forjados, pero su resistencia y alargamiento a la rotura han sido incluso mayores.

PALABRAS CLAVE: Forja, Separación fibra-matriz, Viga nervada, Flexión

1. Introducción

Existen muchos proyectos de investigación y prototipos que demuestran el potencial de los composites para mejorar la eficiencia energética de los vehículos de transporte por carretera, por lo que en los últimos años han entrado de lleno en las agendas estratégicas de todos los fabricantes de automoción. Sin embargo, el elevado coste de producción, asociado a la baja automatización y a los largos tiempos de ciclo, y la reciclabilidad siguen siendo hoy en día las mayores barreras para su empleo de forma generalizada [1]. Durante años se ha intentado adaptar las tecnologías de fabricación de composites aeronáuticos a las necesidades del sector de la automoción. Si bien este enfoque ha sido válido para vehículos de alta gama, su implementación en series medias-largas no ha sido posible. La producción en masa de automóviles necesita tecnologías altamente automatizadas, sistemas productivos en los que las grandes inversiones se pueden amortizar reduciendo los costes de personal, y con un elevado aprovechamiento de material. Por otra parte, los componentes de automoción son de menores dimensiones, pero de geometrías más complejas que los aeronáuticos.

La selección de la tecnología más adecuada para la fabricación de piezas en material compuesto depende de muchos factores, como el volumen de producción, la complejidad geométrica del componente y las propiedades mecánicas necesarias [2]. La optimización estructural de componentes de composites termoplásticos se enfrenta a un dilema a la hora de seleccionar el binomio material/proceso de fabricación. Los composites reforzados con fibras continuas son los que mejores

propiedades presentan, pero la libertad de diseño es pequeña y se limita a piezas de tipo cáscara [3]. Por el contrario, los procesos de fabricación de composites con fibra discontinua permiten la obtención de geometrías complejas, pero sus propiedades mecánicas son sustancialmente más bajas [4]. De hecho, son importantes en la actual industria de automoción, Los procesos de fabricación de composites reforzados con fibras discontinuas más importantes son la forja/GMT (*Glass Mat reinforced Thermoplastic*) y el LFT (*Long Fibre reinforced Thermoplastic*) [1].

Los componentes fabricados mediante la forja/GMT para el sector de la automoción se conciben como estructuras nervadas para aumentar la rigidez y la resistencia, pero a su vez son frecuentemente los puntos débiles de la estructura, ya que son las zonas de máxima tensión y son propensas a acumular defectos que reducen las propiedades del material. Entre los defectos más comunes y peligrosos se encuentra la ausencia de fibra, fenómeno denominado separación fibra-matriz (FMS, *Fibre-Matrix Separation*) [5,6]. El origen del FMS se encuentra en la fuerte interacción que se genera en la base del nervio, como consecuencia del cambio de dirección del flujo de material y la reducción de la sección. Los estudios de FSM se han centrado principalmente en determinar la influencia de los parámetros de material (longitud y contenido de fibra, viscosidad de la matriz), los parámetros de procesado (temperatura de molde y carga, velocidad de cierre de molde, posición de carga de material) y de la geometría del nervio sobre la distribución de la fibra. Sin embargo, no se han realizado estudios sobre el efecto del FMS sobre el comportamiento general de la pieza forjada. Por otra parte, toda la literatura sobre FMS se centra en matrices de polipropileno.

La forja/GMT es un proceso altamente productivo para piezas de cierta complejidad geométrica, por lo que el coste de los moldes y el tiempo de puesta a punto del proceso, incluso para la fabricación de prototipos, son elevados. La fabricación aditiva con polímeros comenzó como una tecnología de prototipado rápido para funciones estéticas y dimensionales. Sin embargo, el avance en la tecnología de las impresoras 3D y los materiales permite hoy en día trabajar con los mismos materiales que en los procesos convencionales como la forja/GMT [7]. Para el presente trabajo es de especial relevancia la tecnología de extrusión de granza de plástico, más concretamente de poliamidas reforzadas con fibra discontinua de vidrio, ya que potencialmente puede tener las mismas propiedades, y puede servir como tecnología de prototipado rápido con funcionalidades estructurales durante la fase de diseño.

El presente trabajo viene a completar la falta de conocimiento sobre el efecto del FMS sobre la microestructura y sus consecuencias en el comportamiento global de una viga nervada que trabaja a flexión. Además, la novedad viene dada por el material compuesto para la forja elegido, que es una matriz de poliamida. Por último, se ha evaluado la viabilidad de utilizar la fabricación aditiva, en su variante de extrusión de pellet, como tecnología de prototipado rápido con funcionalidades estructurales.

2. Metodología

2.1 Geometría del prototipo

Los prototipos tienen la geometría de una viga en forma de T con una longitud total de 300 mm, con dos nervios transversales con una separación entre ellas de 147 mm (Figura 1a). Las medidas de la sección transversal se muestran en Figura 1b detallada.

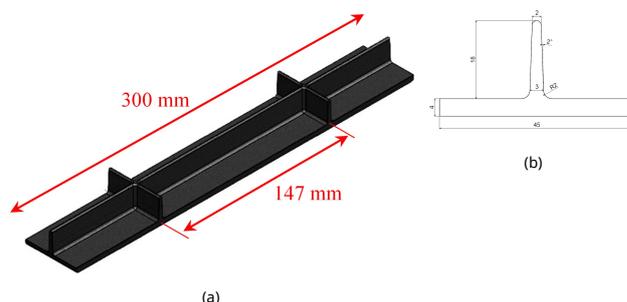


Figura 1. Dimensiones geometría de probetas(a) y dimensiones sección transversal A-A de probetas (b).

2.2 Fabricación mediante forja/GMT

El material empleado para la fabricación de las probetas es poliamida (PA6) reforzada con fibra corta de vidrio orientadas al azar. Es un tipo de GMT (EP589-8 S430A242) proporcionado por *Mitsubishi Chemical Advanced Materials Composites AG* que está especialmente desarrollado para aplicaciones estructurales en un área de alta temperatura. Contiene un 32% de fibra, con un espesor de 4,3 mm y una densidad (moldeada) de 1,374 g/cm³.

Todas las probetas han sido fabricadas mediante el proceso de forja/GMT con una prensa hidráulica de 80 t. Para cada probeta se han utilizado dos placas de GMT de 350 × 70 × 4 mm que han sido precalentadas en una estufa. Se han fabricado dos tipos de prototipos, unas con el material precalentado a 300 °C y otras a 270 °C, en ambos casos, el molde ha sido precalentado a una temperatura de 80 °C. La velocidad de cierre del molde ha sido de 45 mm/s para todos los casos, y el tiempo de enfriamiento de 60 s.

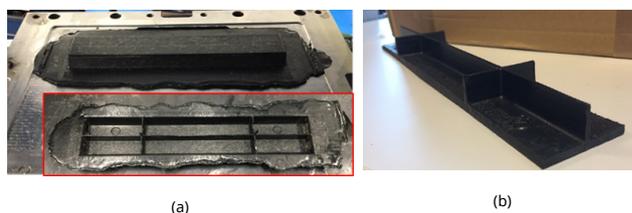


Figura 2. Resultado de fabricación probeta sin desmoldear (a) y resultado final de fabricación (b).

A fin de evaluar la calidad de los componentes forjados se han realizado tres análisis diferentes; 1) a nivel macroscópico se ha verificado el nivel de llenado, 2) a nivel microscópico se han realizado observaciones de la distribución de fibra en la sección transversal, para lo que se han pulido y se han tomado fotografías de las mismas mediante un macroscopio Leica DMS 1000, y 3) se han realizado ensayos de flexión 3 puntos (ASTM D790-15) sobre probetas mecanizadas en la zona de la base y del nervio del componente (Figura 6a). Las probetas de flexión han sido estabilizadas a 23 °C y a una humedad relativa del 55% durante un mínimo de 72 h antes de ser ensayadas. Los ensayos se realizaron en una máquina universal Hoytom HM-D equipada con una célula de carga de 100 kN, el desplazamiento ha sido registrado a partir del movimiento del cabezal y la velocidad de desplazamiento fue de 5 mm/min. Las condiciones de ensayo han sido las mismas que las de estabilización de las probetas.

2.3 Fabricación mediante impresión 3D

Para la fabricación de los prototipos por fabricación aditiva se ha utilizado la máquina Delta WASP 4070 Industrial X equipada

con un extrusor de granza. El material utilizado (Nylstrong, Smartfil®) ha sido una poliamida reforzada con microesferas (8% en peso) y fibras de vidrio (16% en peso), con una densidad de 1,58 g/cm³. Los principales parámetros de impresión 3D han sido; diámetro de boquilla 0,4 mm, temperatura de extrusión 255 °C, temperatura de base 60 °C, velocidad de impresión 60 mm/s y altura de capa 0,2 mm. El tiempo total de impresión es de 5 h.

2.4 Validación estructural

La validación estructural de los prototipos se realizó mediante ensayos de flexión 3 puntos en condiciones cuasi-estáticas. Las condiciones de ensayo y máquina de ensayos utilizadas fueron las mismas que en los ensayos de flexión del apartado 2.2. La configuración de estos ensayos se muestra en la Figura 3. Los dos apoyos de 40 mm de diámetro a una distancia de 260 mm contienen ranuras 23 × 6 mm para ajustar el nervio longitudinal de la probeta. Un tercer apoyo de mismo diámetro en la parte superior aplicará la carga en dirección perpendicular al eje principal de los perfiles, tal y como se muestra en detalle en la Figura 3b.

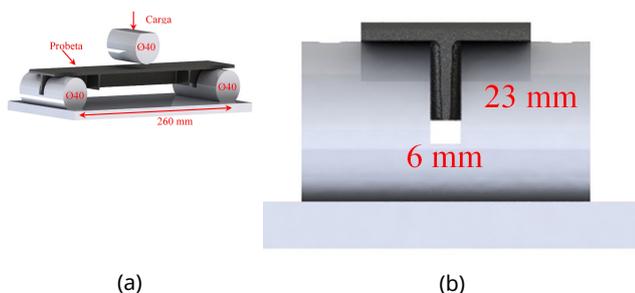


Figura 3. Utillaje de ensayos al completo (a) y detalle de ranura en utillaje (b).

3. Resultados y discusión

3.1 Calidad del componente forjado

Independientemente de la temperatura de precalentado del material, ambas configuraciones han presentado defectos de fabricación; nivel de llenado del molde y FMS en el prototipo.

3.1.1 Nivel de llenado

En los resultados de fabricación se observa a simple vista que la temperatura del material precalentado influye en el resultado final. En la Figura 4a la temperatura del material ha sido de 270 °C, y el material no llega a llenar el molde por completo. Sin embargo, cuando la temperatura alcanza los 300 °C, el material consigue ocupar toda la cavidad del molde y la geometría final es correcta (Figura 4b).

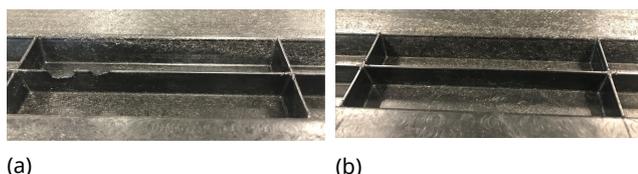


Figura 4. Prototipos fabricados a 270 °C (a) y a 300 °C (b).

3.1.2 Calidad microestructural

En el análisis microestructural del nervio, se ha observado que

el fenómeno separación fibra-matriz (FMS) está presente en ambas configuraciones. Este fenómeno se da por la fuerte interacción de fibras que se genera en la base del nervio, como consecuencia del cambio de dirección del flujo de material y la reducción de la sección. En este caso, se observa como a mayor temperatura del material (300 °C) el efecto de la separación es mayor (Figura 4b) ocupando sólo el 11% de la altura del nervio, y a medida que la temperatura disminuye (270 °C) ese efecto es menor (Figura 4a) y favoreciendo el llenado (hasta un 80%). La justificación de esta diferencia en comportamiento se atribuye a que a 300 °C la viscosidad de la matriz disminuye, lo que facilita su flujo a través de la red de fibras acumuladas en la base del nervio, y esto se traduce en un efecto de separación fibra-matriz más acusado.

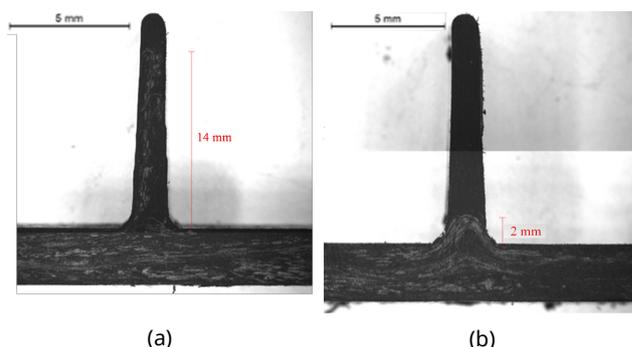


Figura 5. Efecto separación fibra-matriz procesado a 270 °C (a) y a 300 °C (b).

3.1.3 Calidad del material: Ensayos a flexión

Los resultados de los ensayos de flexión se muestran en la Figura 6, donde se aprecia el efecto de la separación fibra-matriz. Para ambas temperaturas de procesado, las probetas extraídas del nervio tienen una menor rigidez y resistencia que en la base, pero la pérdida es más significativa en el prototipo fabricado a 300 °C, un 70 y 60% respectivamente, lo que se debe a su menor contenido en fibra (Figura 5). Si se comparan las propiedades en la misma zona, pero a distinta temperatura de procesado, se observa que en la base son muy similares, ya que en esta zona no sucede la separación fibra-matriz. Sin embargo, en la zona del nervio procesado a 300 °C la rigidez es un 40% menor y la resistencia un 34% menor que en el nervio procesado a 270 °C.

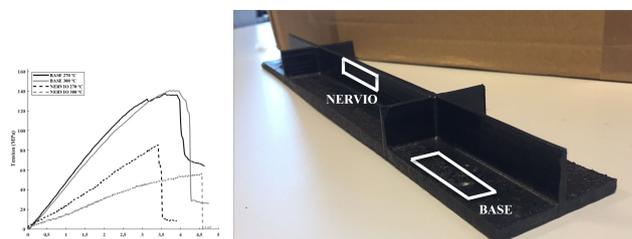


Figura 6. Resultados de las probetas en distintas zonas del prototipo y en función de la temperatura.

3.2 Propiedades mecánicas y rotura de los componentes

De la validación estructural de los prototipos se obtienen las curvas de fuerza-desplazamiento (Figura 7a). En ellas se concluye que los componentes de 270 °C presentan mayor resistencia y rigidez que las de 300 °C, consecuencia del fenómeno FMS. También se ha analizado el tipo de rotura para

cada caso, donde se observa que los componentes de 300 °C sufren una rotura directa (Figura 7c), ya que el nervio está compuesto sólo por poliamida, mientras que la rotura en los de 270 °C está dividida en dos picos, la primera rotura de la poliamida que queda en el nervio, y una segunda rotura de la fibra en el nervio (Figura 7b).

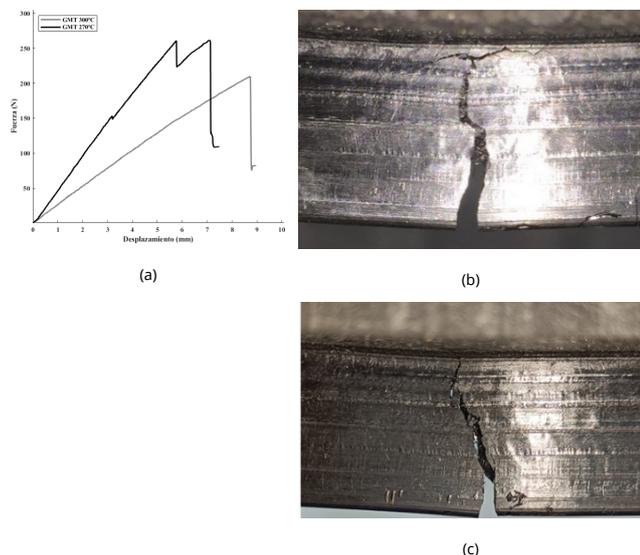


Figura 7. Curva de componentes finales (a), rotura componentes 270 °C (b) y rotura componentes 300 °C (c).

3.3 Forja GMT vs Fabricación Aditiva

Junto a la validación estructural de los prototipos fabricados por forja/GMT se han realizado ensayos de los prototipos por fabricación aditiva, donde se ha observado que estos presentan un aumento de rigidez del 30% respecto a los prototipos procesados a 300 °C. Por otro lado, la resistencia aumenta considerablemente, un 30% mayor que los procesados a 270 °C y un 45% que los procesados a 300 °C. El alargamiento también aumenta hasta 14 mm, un aumento del 50% y 36% respecto a los de 270 °C y 300 °C. Las propiedades se recogen en la Tabla 1. Por otro lado, se observa como la rotura de los prototipos de fabricación aditiva pasa por distintas etapas hasta la rotura final. Estas etapas vienen dadas por la delaminación que sufre el nervio de los prototipos (consecuencia del proceso de fabricación “capa por capa”).

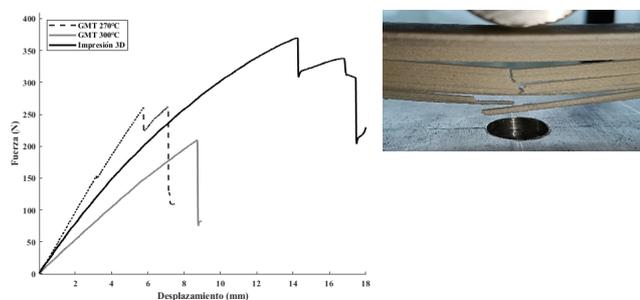


Figura 8. Curvas fuerza-desplazamiento GMT vs Impresión 3D.

Tabla 1. Propiedades de los prototipos fabricados por forja/GMT y FA.

Probeta	Peso (g)	% masa fibra	F _{max} (N)
GMT 300 °C	105,3	32	210
GMT 270 °C	104,7	32	260

Impresión 3D	83,7	25	370
--------------	------	----	-----

4. Conclusiones

Se ha observado que para obtener un llenado total de la cavidad del molde de forja/GMT la temperatura óptima es de 300 °C, ya que con 270 °C no se consigue llenar el molde. Analizando la microestructura de los prototipos procesados a 270 °C y 300 °C se concluye que a mayor temperatura la separación de fibra-matriz es mayor debido a la disminución de la viscosidad. Para prototipos a 270 °C la fibra ocupa un 80% del nervio, mientras que a 300 °C un 11%.

A causa de esa separación fibra-matriz, las propiedades del material en un mismo componente varían dependiendo de la zona. En el nervio las propiedades disminuyen hasta un 62% comparando con la base, y esto hace que la rotura sea prematura. También se ha podido observar que la rotura de los prototipos varía dependiendo de la temperatura de procesado, para los de 270 °C hay dos picos de rotura (rotura de poliamida y rotura de poliamida con fibra) y para los de 300 °C hay una única rotura (de poliamida).

Los prototipos fabricados mediante fabricación aditiva presentan un aumento del 30% en la resistencia y del 40% en el alargamiento independientemente de la temperatura de procesado. También aumenta la rigidez cuando se compara con prototipos fabricados a 300 °C en un 30%. Sin embargo es un 20% menor que los prototipos procesados a 270 °C. Por lo tanto, es válida como tecnología de prototipado rápido para estudios de optimización estructural.

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer a la Unión Europea la financiación recibida (FOF-07-2017, N° 768710) para realizar este trabajo.

Referencias

- [1] Henning F, Kärger L, Dörr D, Schirmaier FJ, Seuffert J, Bernath A. Fast processing and continuous simulation of automotive structural composite components. *Compos Technol* 2019;171.
- [2] Bannister M. Challenges for composites into the next millennium - A reinforcement perspective. *Compos - Part A Appl Sci Manuf* 2001;32.
- [3] Trudel-boucher D, Champagne MF. Stamping of high-performance thermoplastic composite intrusion beams. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 418, 2018.
- [4] Nishikawa M, Fukuzo A, Matsuda N, Hojo M. Evaluation of elastic-plastic response of discontinuous carbon fiber-reinforced thermoplastics: experiments and considerations based on load-transfer-based micromechanical simulation. *Composites Science and Technology* 155 (2018) 117-125.
- [5] Kuhn C, Walter I, Taeger O, Osswald TA. Experimental and numerical analysis of fiber matrix separation during compression molding of long fiber reinforced thermoplastics. *J. Compos. Sci.* 2017, 1, 2.
- [6] Kuhn C, Wehler S. A force-balanced fiber retardation model to predict fiber-matrix-separation during polymer processing, *Journal of Composite Science* 4 (2020) 165; doi:10.3390/jcs4040165.
- [7] Pappas JM, Thakur AR, Leu MC, Dongx A comparative study

of pellet-based extrusion deposition of short, long, and continuous carbon fiber-reinforced polymer composites for large-scale additive manufacturing, *J Manuf Sci Eng* 143 (2021) 1–32.