**Estudio de fabricación aditiva con fibras de carbono recicladas procedentes de material compuesto curado termoestable**

**Andrea Fernández-Gorgojo1,2, Julio Vidal3, Juan Pedro Fernández-Blázquez2, Jon M. Molina-Aldareguia1,2**

1Área de ingeniería de Fabricación, Universidad Politécnica de Madrid, España.

Email: [andrea.fgorgojo@upm.es](mailto:andrea.fgorgojo@upm.es), [jon.molina@upm.es](mailto:jon.molina@upm.es)

2 Instituto IMDEA Materiales, España.

Email: [juanpedro.fernandez@imdea.org](mailto:juanpedro.fernandez@imdea.org), [jon.molina@imdea.org](mailto:jon.molina@imdea.org)

3 AITIIP Centro Tecnológico, España.

Email: [julio.vidal@aitiip.com](mailto:julio.vidal@aitiip.com)

**Resumen**

El crecimiento del uso de los materiales compuestos con fibras de carbono ha aumentado la necesidad de desarrollar rutas de reciclaje y estrategias para su reutilización. Este trabajo persigue la recuperación de fibras de carbono de compuestos curados de matriz termoestable y su implementación en fabricación aditiva. Para el reciclaje se emplea una tecnología térmica de dos etapas, obteniendo fibras con una retención de la resistencia a tracción superior al 94% con respecto al refuerzo virgen. Posteriormente, se evaluó la implementación de las fibras recicladas en matriz termoplástica para su fabricación aditiva por filamentos fundidos (FFF). Las probetas impresas presentaron una mejora del 55% en el módulo elástico y 45% en la resistencia a tracción tras incorporar el refuerzo. Como la porosidad es uno de los principales inconvenientes de la impresión 3D, se efectuó un posprocesado, obteniendo respuestas superiores a probetas con material comercial con fibras de carbono vírgenes.

**Palabras clave:** fabricación aditiva; material compuesto; reciclaje; fibra de carbono.

**Abstract**

The growth in the use of carbon fibre composites has accelerated the need to develop recycling routes and to implement strategies to re-use the recovered carbon fibres in other applications. Within this context, this work pursues the obtention of carbon fibres from cured carbon fibre reinforced epoxy matrix composites and their implementation in additive manufacturing. For the recycling, a two-step thermal technology was implemented. The recovered fibres showed a 94% retention of tensile strength with respect to virgin carbon fibres. Subsequently, the implementation of the recovered fibres in thermoplastic matrix was evaluated by additive manufacturing via fused filament fabrication (FFF). The 3D printed composites offered a 55% and 45% improvement in elastic modulus and tensile strength, respectively, compared to pure polyamide. Since porosity is one of the main drawbacks of 3D printing, a post-processing method was applied, resulting in superior mechanical properties than printed composites reinforced with virgin carbon fibres from commercial filaments.

**Keywords:** additive manufacturing; composite material; recycling; carbon fibre.

# Introducción

La fabricación aditiva, comúnmente llamada impresión 3D, es una tecnología que genera estructuras de materiales mediante la adición de capas [1]. En comparación con técnicas tradicionales, esta metodología permite fabricar geometrías complejas, con un alto grado de personalización, un bajo nivel de residuos de material y un importante ahorro de costes [2, 3].

Los polímeros termoplásticos, como el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), ácido poliláctico (PLA), polieteretercetona (PEEK) y poliamida (PA) se utilizan habitualmente como materiales en fabricación aditiva [4-6]. En cambio, sus propiedades mecánicas no son suficientes como para alcanzar la resistencia que exigen ciertas aplicaciones estructurales. Para solventar dicho inconveniente, es habitual que estos polímeros se refuercen con fibras, como pueden ser las de carbono [2]. Sin embargo, la producción de estas fibras es altamente contaminante y requiere un gran consumo energético. Además, el gran número de deshechos originados de material compuesto reforzado con fibras de carbono (30-40% del volumen de la producción total) y la gran cantidad de piezas constituidas por este material que alcanzan el final de su vida útil hace que sea necesario buscar una segunda vida a estos refuerzos. Las actuales soluciones para tratar dichos residuos se han basado en enterrarlos, almacenarlos en vertederos o incinerarlos. Es por ello que se acrecienta la necesidad de desarrollar rutas de reciclaje y estrategias para la reutilización de las fibras recuperadas en otras aplicaciones, mejorando así la sostenibilidad e incentivando el uso de la economía circular. En este trabajo se propone la incorporación de fibras recicladas de carbono (rCF) para mejorar las propiedades mecánicas de las piezas finales, reduciendo también costes y, además, contribuyendo a la economía circular. Dado que la implementación de estos refuerzos en PA aún no ha sido estudiada y este polímero es uno de los más usados en la fabricación aditiva, el presente trabajo se centra en la introducción fibras de carbono recicladas en poliamida, y el posterior estudio de las propiedades mecánicas de las muestras impresas por extrusión de filamento fundido.

Esta investigación persigue tres objetivos clave. El primero es la fabricación de un filamento para imprimir en el que las rCFs estén óptimamente integradas en la matriz de poliamida. El segundo es la optimización de las condiciones de impresión basándose en análisis térmicos, estructurales y mecánicos de los materiales compuestos resultantes tras la fabricación. Finalmente, la evaluación de un posprocesado para reducir la porosidad de las probetas impresas, que es uno de los grandes inconvenientes de la impresión 3D [7, 8].

Este trabajo prueba que el uso de rCFs en fabricación aditiva ofrece una alternativa competitiva con respecto a otros materiales compuestos y, a su vez, respetuosa con el medio ambiente. Además, abre la posibilidad de fabricar materiales compuestos más económicos sin comprometer las propiedades mecánicas, completando el ciclo de vida de los compuestos reforzados con fibras de carbono y reduciendo su huella de carbono.

# Materiales y Métodos

## Materiales

Las fibras recicladas provienen de un material compuesto curado formado por un tejido unidireccional con fibras de carbono TENAX E HTA40 E13 6K, con un 2.5% en peso de epoxy a modo de sizing y un 3% en peso de fibra de vidrio como entretejido. Todo ello queda embebido en una matriz epoxy 8558 en forma de film. Tras el proceso de reciclaje, se recuperan las fibras de carbono, que posteriormente se cortan a longitudes comprendidas entre 15 a 500 μm para ser utilizadas como refuerzo en los filamentos creados para la fabricación aditiva.

La matriz utilizada para la impresión 3D es PA6 Promyde B300 P2 HI60, de gran fluidez, alta resistencia al impacto y térmica, y una densidad de 1.10 g·cm-3.

Con el fin de comparar la diferencia en la respuesta mecánica por el uso de rCFs y fibras de carbono vírgenes (vCFs), también se evaluaron dos materiales comerciales de *Markforged®*, uno compuesto por fibras de carbono vírgenes T300 y PA6, comercialmente llamado *Onyx* y otro basado sólo en la matriz PA6, conocido como *Nylon*.

En cuanto a los equipos, para la optimización del tiempo de la etapa de oxidación se analizó la superficie de las fibras individuales mediante el microscopio electrónico de barrido *FEI Helios NanoLab600i FIB FEG-SEM* y también se implementaron ensayos uniaxiales a fibras individuales en el *Favimat+, Textechno*. Para la fabricación de los pellets se utilizó la extrusora de doble husillo *Coperion ZSL 26*. En el estudio de la fluidez de los pellets se empleó el equipo *MFI KINSGEO®*, así como el *DSC Q200 (TA Instruments)* para los ensayos de calorimetría diferencial de barrido (DSC). El posprocesado se basó en la utilización de la prensa de platos calientes de *Fontijne Presses®* y la porosidad de las piezas impresas fue evaluada a través del tomógrafo *Phoenix Nanotom 160NF*. Por último, los ensayos mecánicos de los laminados se realizaron a través del equipo *Instron, modelo 3384*.

## Reciclaje de las fibras de carbono

Existen tres procesos de reciclaje típicos que se emplean en los materiales compuestos: mecánico, térmico y químico [9]. Entre ellos, el elegido para este trabajo es el térmico, concretamente la pirólisis, dado que es la tecnología más empleada y de fácil implantación en la industria. Se basa en la descomposición de la parte orgánica del material compuesto a temperaturas entre 450ºC y 700ºC en atmósfera inerte. Sin embargo, esta etapa genera la presencia de restos de resina sobre la superficie de las fibras, lo que dificulta su posterior reincorporación. Con el fin de limpiar dichos residuos, se ejecuta una segunda etapa de oxidación. Sin embargo, esta fase puede ser la principal causa de la degradación de las propiedades mecánicas del refuerzo debido a la oxidación de las fibras [10].

En este trabajo, el proceso de reciclaje se realizó en colaboración con la spin-off *BCircular*, del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) [11]. Basándose en previos estudios realizados por el grupo de investigación del CSIC, se emplearon dos etapas. Una primera a 500ºC durante 6 horas en atomósfera de nitrógeno para separar la resina de la fibra, seguida de la segunda fase de oxidación a la misma temperatura para limpiar efectivamente la matriz residual depositada en la superficie del refuerzo [12]. Las temperaturas inferiores a 500ºC no eliminan eficientemente la resina y temperaturas superiores causan un excesivo daño a las fibras. Para continuar con el estudio de la oxidación, en este trabajo se realiza una optimización del tiempo de esta segunda fase. La Figura 1 muestra un esquema de la línea de reciclaje empleada.

Diagrama

Descripción generada automáticamente

**Figura 1.** Instalación de pirólisis de materiales compuestos curados donde (1) es el horno, (3-6) son los condensadores, (7) es la torre de enfriamiento de agua para los gases no condensados, (8 y 9) son los filtros para eliminar los gases contaminantes y las partículas sólidas y (10) es el rotámetro de detección de los gases destilados. Fuente: adaptada de [12].

## Fabricación de los filamentos para la impresión

Para obtener las probetas, se realiza inicialmente la fabricación de los filamentos a imprimir mediante FFF. Se fabricaron dos tipos de filamentos, uno de PA6 y otro con el mismo polímero reforzado con las fibras de carbono resultantes del proceso de reciclaje.

Para el material reforzado, primero se realizó un proceso de extrusión para obtener pellets con la mezcla del polímero y las fibras. Para ello, en colaboración con AITIIP Centro Tecnológico, se obtuvieron pellets con una cantidad de refuerzo del 10% en peso. A continuación, se fabricó el filamento con la extrusora 3Devo, que controla el diámetro final a 2.85 mm, elegido según las especificaciones de la impresora a utilizar. La extrusora de filamento cuenta con cuatro zonas de control de temperatura, utilizando valores desde 230ºC en la tolva, hasta 255ºC en la boquilla para la PA6, siendo las temperaturas menores para el material que cuenta con rCFs, de 215ºC hasta 220ºC.

# Resultados

## Optimización del tiempo de oxidación

Con el fin de obtener los mejores resultados mecánicos de las fibras recuperadas, se ha realizado una optimización del mejor tiempo de la etapa de oxidación. Para ello, se han analizado tres tiempos distintos: 30, 60 y 90 minutos.

Inicialmente se empleó una evaluación superficial, en la que se concluyó que independientemente del tiempo de oxidación, se realizó una eficaz eliminación de los residuos de matriz, ya que las fibras estaban mayoritariamente limpias, con pequeñas trazas de resina y no evidenciaban ningún tipo de daño, tal y como se ilustra en la Figura 2.

Otro análisis para determinar las mejores condiciones del proceso se basa en ensayos uniaxiales a fibras individuales. La Tabla 1 resume los resultados obtenidos, donde se aprecia una ligera disminución del diámetro de las fibras, debido a la eliminación del sizing polimérico que recubre las fibras para mejorar su adhesión con la matriz. A mayores tiempos de oxidación, se elimina la capa de carbón amorfo. En cambio, el módulo de Young experimenta un ligero incremento, atribuido a que al retirar la capa de sizing, se está evaluando la fibra neta, la cual presenta mayor rigidez. Para oxidaciones más largas el módulo disminuye, pues se está alterando el refuerzo (corroborado con los valores de diámetro). Finalmente, la resistencia a tracción se reduce con el tiempo de oxidación. Dicho comportamiento se justifica por la mayor probabilidad a la creación de zonas que actúan como iniciadores de grietas conforme aumenta la duración de la oxidación.

Interfaz de usuario gráfica, Sitio web

Descripción generada automáticamente

**Figura 2.** Imágenes de la superficie de las fibras por microscopía electrónica de barrido de las fibras a) vírgenes y recuperadas después de la pirólisis a 500ºC y una oxidación a b) 30 min, c) 60 min y d) 90 min. Fuente: elaboración propia.

Dado que la observación visual de las fibras indicaba que cualquier tiempo de oxidación cumplía el requisito de eliminar los residuos de la superficie de las fibras y que la menor degradación de las propiedades mecánicas se obtiene para la oxidación de 30 minutos, se concluye que éste es el tiempo óptimo para el tratamiento de reciclaje.

**Tabla 1.** Media del diámetro y de las propiedades mecánicas de las fibras en función del tiempo de oxidación.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Tipo de fibra | | Diámetro  [µm] | Módulo elástico  [GPa] | Resistencia a tracción  [GPa] |
| vCF | 7.5±0.2 | | 197±18 | 3.1±0.4 |
| rCF- 30 min | 7.2±0.1 | | 200±4 | 2.9±0.3 |
| rCF- 60 min | 7.1±0.2 | | 189±9 | 2.5±0.3 |
| rCF- 90 min | 6.6±0.6 | | 178±5 | 2.3±0.4 |

Fuente: [13].

## Optimización de la impresión 3D

Una vez cortadas las fibras, se embeben en la matriz polimérica mediante el proceso de extrusión explicado en la sección 2.3.

Para optimizar la temperatura de impresión, se realizan ensayos de fluidez. La Figura 3 recoge los resultados del análisis, en donde se observa que la máxima temperatura posible de evaluar fue 255ºC, dada la gran fluidez del material a valores superiores. La fluidez del material reforzado disminuye tras la adición de fibras debido a que éstas dificultan la movilidad de la cadena polimérica [14].

**Figura 3.** Índice de fluidez de la PA6 sin reforzar y reforzada a distintas temperaturas. Fuente: elaboración propia. Fuente: elaboración propia.

Una vez conocido el rango de temperaturas de fluidez, se ejecutaron impresiones de probetas de flexión siguiendo la norma ISO-178. Para ello, se empleó la impresora *Ultimaker S3* con una boquilla de 0.4 mm para la resina sin refuerzo (PA6) y de 0.8 mm para la que tenía fibra de carbono reciclada (PA6+rCF) y así prevenir el taponamiento de la boquilla. Los demás parámetros de impresión seleccionados son: altura de capa de 0.15 mm, velocidad de impresión de 25 mm/s, flujo del 100%, temperatura de la cama de impresión de 90ºC y patrón lineal con una densidad del 100%. La Figura 4 ilustra las probetas impresas a distintas temperaturas. Las muestras a 235ºC y 245ºC presentan zonas secas donde el flujo de la poliamida no es constante, o la adhesión entre capas y/o filamentos no es correcta, obteniendo trayectorias del filamento fácilmente distinguibles, por lo que dichas temperaturas no se consideran adecuadas para la impresión. Como las probetas de 250ºC y 255ºC presentan un acabado similar, con el fin de buscar la máxima sostenibilidad, lo que implica disminuir los requerimientos energéticos, se concluye realizar la impresión a 250ºC.



**Figura 4.** Evaluación de la temperatura de impresión en probetas de flexión con altura de capa de 0.15 mm, velocidad de impresión de 25 mm·s-1, flujo del 100%, temperatura de la cama de impresión de 90ºC y patrón lineal con una densidad del 100%. Las muestras a 235ºC y 245ºC presentan zonas secas, en las que se distingue la trayectoria del filamento. Fuente: elaboración propia.

### Posprocesado

Uno de los principales inconvenientes de la fabricación aditiva es la baja unión interlaminar y el alto contenido de poros en comparación con las técnicas de fabricación habituales. Con el fin de solventar este problema, esta investigación utiliza un posprocesado en presa de platos calientes, basado en aplicar una temperatura entre la de transición vítrea y la de fusión del material y una presión de 1 MPa, similar a la de los procesos convencionales de fabricación de material compuesto por autoclave [15, 16]. Como la temperatura de posprocesado debe estar dentro del intervalo entre la transición vítrea y la fusión, se realizaron ensayos de DSC, obteniendo los valores de temperatura recogidos en la Tabla 2. Para la compactación en la prensa se estudiaron dos temperaturas, 185ºC y 195ºC. Como las probetas pospocesadas a ambas temperaturas presentan una porosidad similar, se seleccionó la temperatura menor, 185ºC para garantizar el control de las dimensiones y también exigir los mínimos requerimientos energéticos. Temperaturas por debajo de las analizadas no minimizaban eficazmente la porosidad.

**Tabla 2.** Valores de la temperatura de transición vítrea y la temperatura de la PA6 y la PA6 con rCFs.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Tipo de muestra | Temperatura de transición vítrea  [ºC] | Temperatura de fusión  [ºC] |
| PA6 | 50 | 217 |
| PA6+rCF | 50 | 216 |

Fuente: elaboración propia.

La cantidad de aire retenido en las probetas se calculó mediante análisis de tomografía. Los resultados, indicados en la Tabla 3, denotan que el proceso de compatación reduce el aire atrapado un 70%, lo que se traduce en mejores propiedades mecánicas.

**Tabla 3.** Porosidad de las probetas impresas. PA6+rCF posprocesado denominado como Post-rCF.

|  |  |
| --- | --- |
| Tipo de muestra | Porcentaje de porosidad, % |
| PA6 | 14 |
| PA6+rCF | 10 |
| Post-rCF | 3 |

Fuente: elaboración propia.

### Propiedades mecánicas

Se realizaron dos tipos de ensayos para conocer el comportamiento mecánico de los materiales compuestos: de tracción partiendo de probetas de hueso de alterio bajo la norma ISO-527 y de flexión siguiendo la norma ISO-178.

Respecto a los ensayos a tracción, las probetas impresas mostraron mayor resistencia y rigidez con la adición de las fibras. Esto enfatiza la correcta transferencia de la carga a las fibras. Aunque la cantidad de fibras es baja (10% en peso), la ductilidad sí se ve notablemente modificada, tal y como se recoge en la Figura 5. El posprocesado presenta una notable mejoría de las resistencia y módulo elástico, lo que demuestra la eficiencia de esta etapa.



**Figura 5.** Curvas tensión-deformación de los ensayos a tracción de las probetas impresas. Fuente: elaboración propia.

Los análisis a flexión muestran resultados parecidos (Figura 6), con una clara mejora de la resistencia y el módulo con la introducción de las fibras recicladas.



**Figura 6.** Curvas tensión-deformación de los ensayos a flexión de las probetas impresas. Fuente: elaboración propia.

# Conclusiones

El trabajo demuestra que los residuos de material compuesto pueden someterse a un proceso de pirólisis seguido de una oxidación para recuperar las fibras de carbono, que es la parte del composite con mayor valor económico. Además, las fibras presentan una completa retención del módulo de Young y una degradación de la resistencia a tracción inferior al 6%.

Dado que la sostenibilidad es un aspecto clave en esta investigación, la planta de reciclaje es autosostenible gracias a recirculación de los gases y aceites generados, proporcionando la energía necesaria para la ejecución del proceso.

En cuanto a la implementación de las fibras recicladas, los resultados demuestran que estos refuerzos se pueden incorporar eficazmente en materiales compuestos fabricados mediante impresión 3D. La incorporación de las rCFs mejora las propiedades a tracción y flexión, así como reduce costes frente a la utilización de fibras vírgenes. Esta mejora de comportamiento mecánico es aún más reseñable para las probetas que han sido sometidas a posprocesado. Con la finalidad de conocer si el uso de fibras de carbono vírgenes habría mejorado aún más la respuesta mecánica que las recicladas, se ha estudiado un material comercial basado en PA6 y vCFs, denominado Onyx, tal y como se menciona en la sección 2.1.

La Tabla 4 resume la comparativa de las propiedades mecánicas a tracción y flexión, reflejando que los resultados son similares para el módulo de Young y ligeramente inferiores para la resistencia en el caso de utilizar rCFs, pero siempre valores asumibles que pueden compensarse con la considerable reducción de costes que supone la utilización de fibras recuperadas. La bajada en la resistencia para las probetas con rCFs se atribuye a la eliminación del sizing durante el proceso de reciclaje. Por lo tanto, se puede concluir que la metodología seguida en el trabajo confirma la posibilidad de utilizar fibras recicladas de carbono en el sector de la fabricación aditiva.

**Tabla 4.** Comparativa de las propiedades mecánicas de las probetas posprocesadas (con rCF) con el material comercial (con vCF).

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Tipo de muestra | Móludo  [GPa] | | Resistencia  [MPa] | |
|  | Tracción | Flexión | Tracción | Flexión |
| Post-rCF | 3.9±0.3 | 2.8±0.3 | 49.3±0.5 | 85±5 |
| Onyx | 3.6±0.1 | 2.7±0.1 | 62.3±0.5 | 97±3 |

Fuente: elaboración propia.

# Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado gracias a la colaboracion con BCircular, donde se ha realizado el proceso de reciclaje y AITIIP Centro Tecnológico, donde se han embebido las fibras recicladas en matriz de poliamida. Andrea Fernández Gorgojo agradece la financiación del Ministerio de Educación, Cultura y Deportes por la financiación por la beca FPU (ayuda FPU16/02223). Juan Pedro Fernández-Blánquez agradece la financiación del Ministerio de Ciencia e Innovación a través del proyecto ADDICOMP (RTI2018-094435-B-C33). Jon M. Molina-Aldareguia agradece la financiación de la Comunidad de Madrid a través del programa MAT4.0-CM (S2018/NMT-4381).

# Referencias

[1] S. Hwang, E.I. Reyes, K. S. Moon, R. C. Rumpf, N. S Kim. “Thermo-mechanical characterization of metal/polymer composite filaments and printing parameter study for fused deposition modeling in the 3D printing process”. *Rev. Journal of Electronic Materials*, vol. 44, n.° 1, pp. 771–777, 2015. [PDF]. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11664-014-3425-6>

[2] X. Wang, M. Jiang, Z. Zhou, J. Gou, D. Hui. “3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective”. *Rev. Composites Part B: Engineering*, vol 110, pp. 442-458, 2017. [PDF]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359836816321230>

[3] S. H. Huang, P. Liu, A. Mokasdar, L. Hou. “Additive manufacturing and its societal impact: a literature review”. *Rev. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 67, n.° 5, pp. 1191-1203, 2013. [PDF]. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-012-4558-5>

[4] A. Bandyopadhyay, B. Heer. “Additive manufacturing of multi-material structures”. *Rev. Materials Science and Engineering: R: Reports*, vol. 129, pp. 1-16, 2018. [PDF]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927796X18300780?casa_token=_bwMsUmjJGYAAAAA:ZlpVxG8nMbNSLdnLH4mHK2wAzS9MMyfQwERShBulVYRn0IlYGaYiDeuLvBn7jozHL3RgcmGEdg>

[5] A.M. Arefin, N.R. Khatri, N. Kulkarni, P.F. Egan. “Polymer 3D printing review: Materials, process, and design strategies for medical applications”. *Rev. Polymers*, vol. 13, n.° 9, pp. 1499, 2021. [PDF]. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2073-4360/13/9/1499>

[6] T.N.A.T. Rahim, A.M. Abdullah, H. Md Akil. “Recent developments in fused deposition modeling-based 3D printing of polymers and their composites”. *Rev. Polymer Reviews*, vol. 59, n.° 4, pp. 589-624, 2019. [PDF]. Disponible en: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15583724.2019.1597883?journalCode=lmsc20>

[7] F. Ning, W. Cong, J. Qiu, J. Wei, S. Wang. “Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling”. *Rev. Composites Part B: Engineering*, vol. 80, pp. 369-378, 2015. [PDF]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359836815003777>

[8] J. Justo, L. Távara, L. García-Guzmán, F. París. “Characterization of 3D printed long fibre reinforced composites”. *Rev. Composite Structures*, vol. 185, pp. 537-548, 2018. [PDF]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822317321529?casa_token=O2ATZT0mCSoAAAAA:khJtPrLLFgSAEPRLJL8zfNGI3ospXNpflKGVc8s0YLPfUGwpRf_RaxSaEJ9W-YaW1VqyXjMcGg>

[9] S. Pimenta, S.T. Pinho. “Recycling carbon fibre reinforced polymers for structural applications: Technology review and market outlook”. *Rev. Waste management*, vol. 31, n.° 2, pp. 378-392, 2011. [PDF]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X10004976?casa_token=49WbBfsQZU8AAAAA:D5HwanObtjJjSKA0C8Y2Ri8LY2YxCjY2YSGDomHqaLa5YjZUH2Nk21T-xggFNi7oepZp4epZHg>

[10] L.O. Meyer, K. Schulte, E. Grove-Nielsen. “CFRP-recycling following a pyrolysis route: process optimization and potentials”. *Rev. Journal of composite materials*, vol. 43, n.° 9, pp. 1121-1132, 2009. [PDF]. Disponible en: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0021998308097737>

[11] BCircular. *Thermal Recycing of Composites* [en línea]. Disponible en: https:// www.bcircular.com/es/. 2016.

[12] F.A. López, M.I. Martín, F.J. Alguacil, J.M. Rincón, T.A. Centeno, M. Romero. “Thermolysis of fibreglass polyester composite and reutilisation of the glass fibre residue to obtain a glass–ceramic material”. *Rev. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 93, pp. 104-112, 2012. [PDF]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165237011001781?casa_token=8vSzsPygd_cAAAAA:mt5AYiAKGudfhrxLAmTEwdpyuEiz2rlzxn90znoXljlrKAesuO5exnI7O-kBXP6NVXO5aju8Lg>

[13] A. Fernández, C.S. Lopes, C. González, F.A. López. “Characterization of carbon fibers recovered by pyrolysis of cured prepregs and their reuse in new composites”. *Open Recent Developments in the Field of Carbon Fibers*, vol. 7, 2018. [PDF]. Disponible en: <https://www.intechopen.com/chapters/59532>

[14] S. Dul, A. Pegoretti, L. Fambri. “Effects of the nanofillers on physical properties of acrylonitrile-butadiene-styrene nanocomposites: Comparison of graphene nanoplatelets and multiwall carbon nanotubes”. *Rev. Nanomaterials*, vol. 8, n.° 9, pp. 674, 2018. [PDF]. Disponible en: https://www.mdpi.com/2079-4991/8/9/674

[15] C. Pascual-González, P. San Martín, I. Lizarralde, A. Fernández, A. León, C.S. Lopes, J.P. Fernández-Blázquez. “Post-processing effects on microstructure, interlaminar and thermal properties of 3D printed continuous carbon fibre composites”. *Rev. Composites Part B: Engineering*, vol. 210, pp. 108652, 2021. [PDF]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359836821000469>

[16] F.Y.C. Boey, S.W. Lye. “Void reduction in autoclave processing of thermoset composites: Part 1: High pressure effects on void reduction·. *Rev. Composites*, vol. 23, n.° 4, pp. 261-265, 1992. [PDF]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/001043619290186X>