

EFECTO DEL ENVEJECIMIENTO EN LA RESPUESTA A IMPACTO DE BAJA VELOCIDAD DE COMPOSITOS DE FIBRA CONTÍNUA IMPRESOS EN 3D

L.M. Ferreira^{1*}, M.T. Aranda¹, M.M. Muñoz-Reja¹, L. Távara¹

¹ Escuela Politécnica Superior, Universidad de Sevilla, C/ Virgen de África 7, 41011 Sevilla-España

* Persona de contacto: lmrques@us.es

RESUMEN

El objetivo de este estudio es analizar el comportamiento frente a impacto a baja velocidad de materiales compuestos reforzados con fibra continua de carbono fabricados mediante impresión 3D, así como evaluar la influencia del envejecimiento en sus propiedades de impacto y en el daño visible asociado. Este análisis resulta relevante para comprender el comportamiento a largo plazo y la durabilidad de estos materiales en aplicaciones donde la resistencia al impacto es un factor crítico. Se realizaron ensayos de impacto a baja velocidad sobre probetas envejecidas durante 1, 7, 15 y 30 días. Las dimensiones y la secuencia apilado se definieron de acuerdo con las recomendaciones de la norma ASTM D7136/D7136M. Los resultados muestran una ligera reducción de la respuesta elástica inicial a medida que avanza el envejecimiento. Además, la severidad del daño visible presenta variaciones significativas con el tiempo de envejecimiento. De forma destacable, las probetas con mayor envejecimiento muestran menor daño visible, pero también una menor capacidad de absorción de energía durante el impacto.

PALABRAS CLAVE: Impresión 3D, Composites, Envejecimiento, Impacto de baja velocidad

ABSTRACT

This research aims to analyse the low-velocity impact performance of 3D printed continuous carbon fibre-reinforced composites manufactured by means of fused deposition modelling. Additionally, the study investigates the effect of ageing on the impact performance of the printed material. This assessment holds significant importance for understanding the long-term behaviour and durability of these materials, facilitating informed design and engineering decisions in applications where impact resistance is crucial. The low-velocity impact tests are carried out on specimens aged for 1, 7, 15, and 30 days, using an instrumented drop-weight testing machine. The dimensions and layup sequence of the composite specimens were meticulously designed in accordance with the recommendations outlined in the ASTM D7136/D7136M standard for unidirectional composite tapes. Results reveal a slightly reduction in the initial elastic part with age.

KEYWORDS: 3D printing, composites, ageing, low-velocity impact

1. INTRODUCCIÓN

Las tecnologías de fabricación aditiva (FA) han experimentado un crecimiento notable tanto en el ámbito científico como industrial debido a su capacidad para producir geometrías complejas a costes relativamente bajos. Entre sus principales ventajas se encuentra la posibilidad de integrar rigidizadores, rebajes o regiones con curvatura variable [1]. Dentro de estas tecnologías, la fabricación capa a capa se ha consolidado como uno de los métodos más utilizados, tanto en prototipado como en la producción de componentes estructurales.

El desarrollo reciente de los materiales compuestos ha ampliado su aplicación en estructuras ligeras con requisitos exigentes de seguridad y fiabilidad. No obstante, aún persisten aspectos que requieren investigación adicional, especialmente en relación con la sostenibilidad y reciclabilidad de los materiales empleados. En este contexto, los filamentos termoplásticos utilizados en FA están adquiriendo relevancia en estrategias de reciclaje. Tian et al. [2] propusieron una técnica de modelado por deposición fundida (FDM) basada en el reciclaje de PLA reforzado con fibra continua de carbono, observando mejoras en la

resistencia a tracción y flexión. Asimismo, existe un interés creciente por refuerzos de origen natural. Ahmad et al. [3] analizaron filamentos de ABS reforzados con fibra de palma aceitera fabricados mediante FDM, reportando incrementos de rigidez y resistencia con el aumento de la fracción en peso de refuerzo.

Las propiedades mecánicas de los polímeros procesados por FA pueden mejorarse mediante refuerzos particulados [4], fibras cortas [5] o fibras continuas [6]. Entre ellos, las fibras continuas se consideran la solución más eficaz para maximizar las prestaciones de la matriz termoplástica, como se evidencia en [7,8]. Tian et al. [9] estudiaron la influencia de la temperatura y la presión en la adhesión entre capas, mientras que el empleo de filamentos con fibra continua permite adaptar la orientación del refuerzo a requisitos de diseño específicos [10]. Iragi et al. [11] investigaron las propiedades de fractura interlaminar e intralaminar de poliamidas reforzadas con fibra continua de carbono. Sin embargo, la complejidad geométrica de las piezas impresas, especialmente en zonas con concentraciones de tensión, puede limitar su aplicación [12]. En estos casos, los polímeros reforzados con fibras cortas constituyen una alternativa intermedia con prestaciones superiores a

las matrices sin refuerzo [13]. Diversos estudios han evaluado su comportamiento a tracción, flexión e impacto [14,15], así como la influencia de parámetros de proceso como la posición de la cama o el porcentaje de relleno [16]. Más recientemente, se ha confirmado el carácter anisótropo de compuestos de poliamida reforzada con fibras cortas de carbono fabricados por FA [17].

Un factor relevante en FA es el envejecimiento asociado al comportamiento higrotérmico de los polímeros. La influencia de la humedad sobre el impacto de compuestos reforzados con fibras naturales se analizó en [18]. Chabaud et al. [19] evaluaron distintos niveles de humedad relativa (9–98%) en compuestos impresos reforzados con fibras continuas de carbono y vidrio, evidenciando efectos significativos. Resultados similares se reportaron en [20–22]. El envejecimiento térmico también ha sido objeto de estudio en estructuras sándwich impresas en 3D [23], así como los mecanismos higrotérmicos asociados a nanofibras de carbono en laminados epoxi reforzados con lino [24].

El daño por impacto en materiales compuestos ha sido ampliamente investigado en sistemas tradicionales y continúa representando un reto relevante [25,26]. Durante su vida en servicio, muchas estructuras compuestas están expuestas a impactos de baja o alta velocidad, como ocurre en aplicaciones aeronáuticas o en palas de aerogeneradores [27,28]. En impactos de baja velocidad, la capacidad de absorción de energía depende de mecanismos internos como la fisuración de la matriz, la delaminación y la rotura de fibras [29,30]. Sin embargo, los estudios centrados específicamente en compuestos impresos en 3D siguen siendo limitados. Papa et al. [31] analizaron el impacto a baja velocidad en probetas que combinaban nylon, Onyx® y refuerzo de fibra de vidrio, aplicando además técnicas de evaluación no destructiva. Por su parte, Caminero et al. [32] evaluaron la resistencia al impacto mediante ensayos Charpy en compuestos termoplásticos reforzados con fibra continua, observando mejor comportamiento para la fibra de vidrio y una respuesta más frágil en el caso de la fibra de carbono.

En este contexto, el presente trabajo evalúa la influencia del envejecimiento en la respuesta a impacto de baja velocidad de compuestos impresos en 3D reforzados con fibra continua de carbono mediante FDM. El estudio se centra en analizar la evolución de las propiedades frente a impacto de las probetas sometidas a distintos tiempos de envejecimiento en condiciones ambientales estándar.

2. DISEÑO Y IMPRESIÓN DE PROBETAS

La figura 1 muestra el esquema de las probetas utilizadas en este estudio. Las probetas se fabricaron mediante FDM conforme a la norma ASTM D7136/D7136M [33], manteniendo las dimensiones globales: longitud (l) = 150 mm, anchura (a) = 100 mm y espesor (e) = 2.11 ± 0.03 mm.

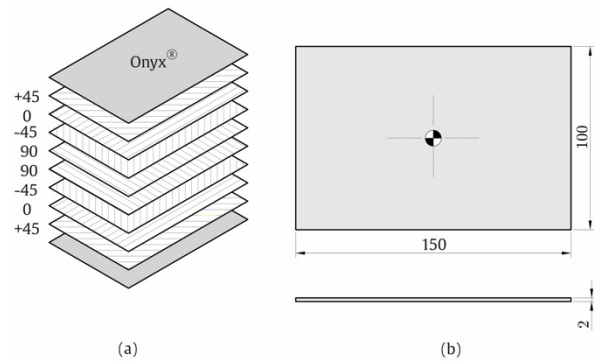


Figura 1. Probetas ensayadas: (a) secuencia de apilamiento; (b) dimensiones.

Se emplearon dos tipos de filamento: nylon reforzado con fibras cortas de carbono (Onyx®) y polímero reforzado con fibra de carbono continua (CFRP), ambos con diámetro de 1.75 mm. La secuencia de apilamiento de las capas reforzadas fue [45/0/-45/90]. Las capas superior e inferior se imprimieron en Onyx® con una secuencia 45/-45/45/-45. Las propiedades mecánicas proporcionadas por Markforged® y [34] para el Onyx® son: módulo elástico $E=2.4$ GPa y coeficiente de Poisson $\nu = 0.34$. Para el material reforzado con fibra de carbono continua se consideraron: $E = 60$ GPa y $\nu = 0.46$.

Los parámetros de impresión se configuraron mediante el software de laminado Eiger®. Cada probeta consta de 8 capas con un espesor de capa de 0.125 mm y patrón de relleno sólido. Se emplearon al menos 4 capas de Onyx® en las superficies superior e inferior para asegurar la calidad superficial. Las temperaturas de boquilla se fijaron en 265 °C para Onyx® y 255 °C para la fibra de carbono. El tiempo de fabricación por probeta fue aproximadamente 5 h.

Se ensayaron 20 probetas, distribuidas en grupos de cinco por condición. Los periodos de envejecimiento considerados fueron 1, 7, 15 y 30 días ± 1 día. Las muestras se envejecieron en condiciones ambientales naturales (aire atmosférico y temperatura ambiente).

3. ENSAYO DE IMPACTO

Los ensayos de impacto a baja velocidad se realizaron con la máquina IMATEK-IM10. La energía de impacto se controló mediante la altura de caída y la masa del impactor hemisférico (diámetro = 10 mm; masa = 2820 g). La fuerza de impacto se registró mediante una célula de carga piezoeléctrica situada detrás del impactor, mientras que la velocidad se determinó con un detector láser/fotodiodo. A partir de estos datos, el software calculó el desplazamiento de la placa mediante la integración de la velocidad $v(t)$. La energía de impacto se obtuvo de la energía cinética del impactor. La configuración empleada proporcionó una energía de 5.2 ± 0.1 J y una velocidad de impacto de 1.92 m/s.

La curva fuerza-tiempo mostrada en la figura 2 representa la respuesta típica a impacto a baja velocidad, donde se observan oscilaciones asociadas a las

vibraciones del sistema. La fuerza aumenta hasta alcanzar el valor máximo F_{max} y posteriormente decrece. El tiempo de contacto (t_c) se definió como el intervalo entre el instante inicial de contacto impactador-probeta (t_i) y el instante final (t_f), obtenido a partir de la curva fuerza-tiempo.

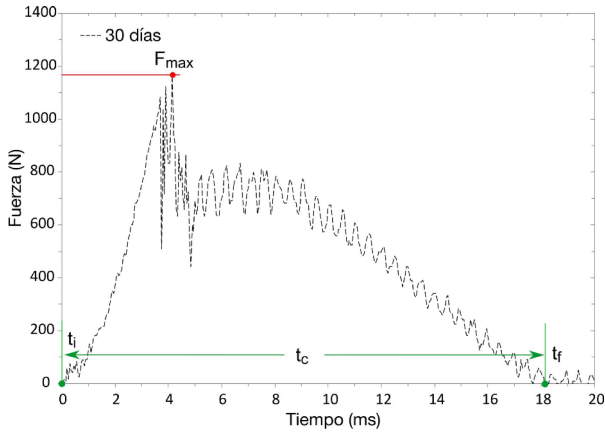


Figura 2. Respuesta fuerza-tiempo representativa para probetas impactadas con un periodo de envejecimiento de 30 días.

La curva fuerza-desplazamiento permite determinar la rigidez a flexión por impacto (IBS) de las probetas. La IBS se calculó como la pendiente de la rama ascendente de la curva (figura 3) y se empleó como indicador de la resistencia al daño por impacto a baja velocidad [26,35,36]. En dicha figura se aprecia una caída brusca de la fuerza cerca de F_{max} , indicativa de daño significativo.

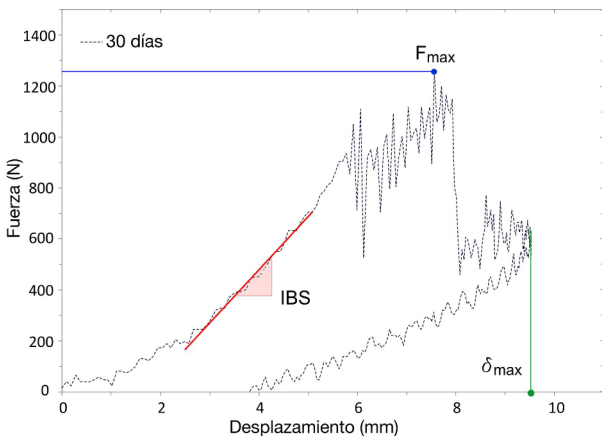


Figura 3. Respuesta fuerza-desplazamiento representativa para probetas impactadas con un periodo de envejecimiento de 30 días.

La figura 4 muestra la respuesta energía-tiempo para una probeta ensayada a 5.2 J tras 30 días de envejecimiento. La energía máxima E_{max} coincide con el instante de fuerza máxima. Posteriormente, la energía disminuye debido a la pérdida de contacto entre impactador y probeta. La energía post-pico E_{abs} representa la energía absorbida por la probeta mediante mecanismos de daño. La diferencia entre E_{max} y E_{abs} corresponde a la energía

elástica E_e asociada al rebote del impactador, cumpliéndose que $E_{max} = E_{abs} + E_e$.

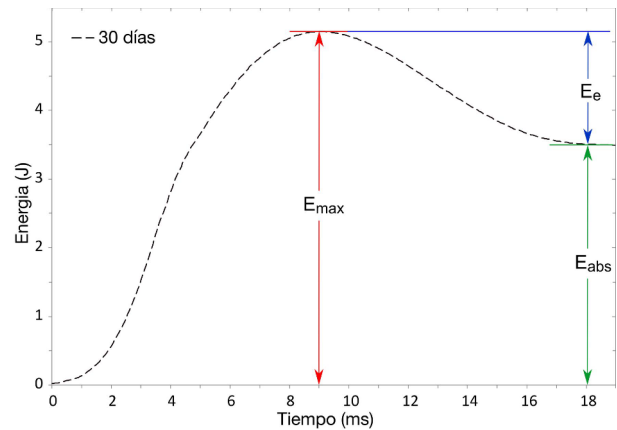


Figura 4. Respuesta energía-tiempo representativa para probetas impactadas con un periodo de envejecimiento de 30 días.

4. RESULTADOS

Las tablas 1 y 2 resumen los valores máximos de fuerza, desplazamiento, tiempo de contacto, energía absorbida e IBS, complementando las representaciones gráficas y facilitando la comparación entre periodos de envejecimiento.

Tabla 1. Valores medios \pm desviación estándar para 1 y 7 días de envejecimiento.

Propiedad	1 día	7 días
F_{max} [N]	1246 \pm 123	1319 \pm 215
δ_{max} [mm]	10.43 \pm 1.22	9.65 \pm 0.33
t_c [ms]	16.80 \pm 0.79	17.79 \pm 1.33
E_{abs} [J]	4.82 \pm 0.27	4.70 \pm 0.12
IBS [N/mm]	161.9 \pm 1.4	160.2 \pm 5.8

Tabla 2. Valores medios \pm desviación estándar para 15 y 30 días de envejecimiento.

Propiedad	15 días	30 días
F_{max} [N]	1300 \pm 117	1249 \pm 67
δ_{max} [mm]	9.09 \pm 0.47	9.72 \pm 0.37
t_c [ms]	16.46 \pm 2.02	18.11 \pm 0.45
E_{abs} [J]	3.85 \pm 0.13	3.58 \pm 0.22
IBS [N/mm]	152.9 \pm 4.7	146.1 \pm 0.7

Los valores de desplazamiento máximo y fuerza máxima (figuras 5 y 6) presentan ligeras fluctuaciones sin mostrar tendencias claras asociadas al envejecimiento. La dispersión observada se mantiene dentro del rango experimental habitual para este tipo de ensayos. Las unidades de F_{max} fueron corregidas conforme a [37].

Los valores medios de IBS para 1 y 7 días son comparables. Sin embargo, se observa una disminución

progresiva para 15 y 30 días, con reducciones aproximadas del 5.9% y 9.7%, respectivamente, respecto al estado de 1 día. Aunque la rigidez del laminado está dominada por las fibras de refuerzo, el envejecimiento afecta a la IBS global, especialmente para tiempos superiores a 7 días.

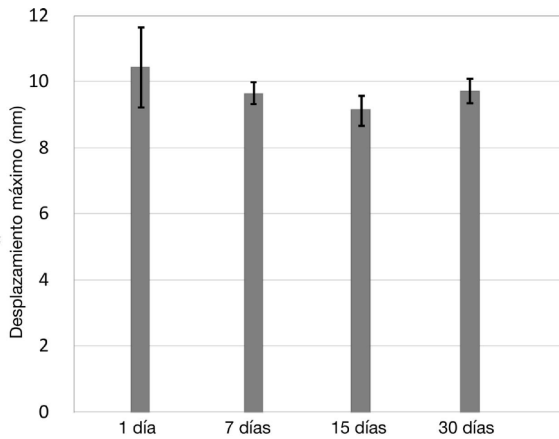


Figura 5. Comparación del efecto del envejecimiento en los historiales de desplazamiento máximo.

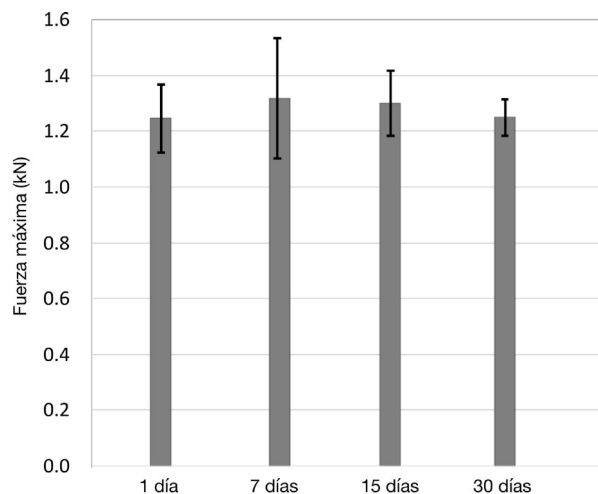


Figura 6. Comparación del efecto del envejecimiento en los historiales de fuerza máxima.

Los historiales de energía máxima (figura 7) y los datos de las Tablas 1 y 2 respaldan esta tendencia. Dado que la severidad del daño aumenta con la energía absorbida [26], el análisis energético indica que las probetas envejecidas 1 y 7 días absorbieron aproximadamente el 93% y 91% de la energía de impacto, respectivamente, mientras que las envejecidas 15 y 30 días absorbieron alrededor del 75% y 69%.

Estos resultados son coherentes con la inspección visual, que muestra una reducción de la severidad del daño al aumentar el tiempo de envejecimiento.

En materiales compuestos, el daño corresponde a procesos irreversibles de disipación de energía asociados a su naturaleza heterogénea y a la presencia de interfaces. Entre los mecanismos típicos se incluyen despegue fibra-

matriz, delaminación, fibra bridging y fisuración de la matriz. La disminución de la energía absorbida con el envejecimiento indica que una menor fracción de la energía de impacto se disipa mediante estos mecanismos.

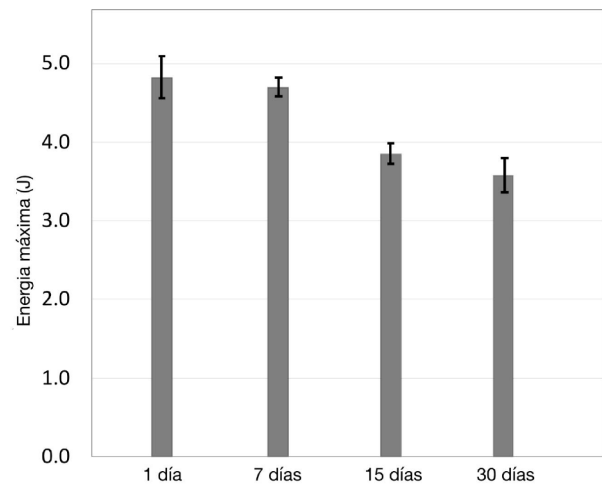


Figura 7. Comparación del efecto del envejecimiento en los historiales de energía máxima.

En consecuencia, las probetas más envejecidas muestran menor deformación inducida por impacto y menor severidad de daño. No obstante, la fuerza máxima, el desplazamiento máximo y el tiempo de contacto permanecen prácticamente invariables, lo que indica que el envejecimiento afecta principalmente a la capacidad de absorción de energía sin modificar de forma significativa la respuesta elástica global.

5. CONCLUSIONES

Se evaluó la influencia del envejecimiento a temperatura ambiente (1, 7, 15 y 30 días) en la respuesta a impacto a baja velocidad de compuestos impresos en 3D reforzados con fibra de carbono continua mediante modelado por deposición fundida, utilizando probetas conforme a ASTM D7136/D7136M.

Los resultados muestran que la respuesta global hasta la fuerza máxima es similar para todos los periodos de envejecimiento. No obstante, se observa una reducción de la rigidez a flexión por impacto (IBS) con el tiempo, más acusada en las probetas envejecidas 15 y 30 días. Asimismo, la energía absorbida disminuye con el envejecimiento, lo que indica una menor disipación de energía asociada a mecanismos de daño durante el impacto.

En conjunto, el envejecimiento influye principalmente en la capacidad de absorción de energía y en la IBS, mientras que la fuerza máxima, el desplazamiento máximo y el tiempo de contacto apenas se ven afectados. Estos resultados son relevantes para la evaluación del comportamiento a impacto y la durabilidad de compuestos impresos en 3D reforzados con fibra de carbono continua.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue parcialmente financiado por la Junta de Andalucía y el Fondo Social Europeo (P20-00595), y por el Ministerio de Ciencia e Innovación y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (PID2020-117001GB-I00, TED2021-131649B-I00, PID2021-123325OB-I00, PID2024-1574710B-I00).

REFERENCIAS

- [1] A. Nazir, O. Gokcekaya, K.Md.M. Billah, O. Ertugru, J. Jiang, J. Sun, S. Hussain, Multimaterial additive manufacturing: a systematic review of design, properties, applications, challenges, and 3D printing of materials and cellular metamaterials, *Materials & Design* 226 (2023): 111661.
- [2] X. Tian, T. Liu, Q. Wang, A. Dilmurat, L. Dichen, G. Ziegmann, Recycling and remanufacturing of 3D printed continuous carbon fiber reinforced PLA composites, *Journal of Cleaner Production* 142 (2017): 1609-1618.
- [3] M.N. Ahmad, M.R. Ishak, M.M. Taha, F. Mustapha, Z. Leman, Investigation of ABS–oil palm fiber (*Elaeis guineensis*) composites filament as feedstock for fused deposition modeling, *Rapid Prototyping Journal* 29(5) (2023): 897-909.
- [4] G. Griffini, M. Invernizzi, M. Levi, G. Natale, G. Postiglione, S. Turri, 3D-printable CFR polymer composites with dual-cure sequential IPNs, *Polymer* 91 (2016): 174-179.
- [5] J. Reverte, M. Caminero, J. Chacon, E. García-Plaza, P. Lopez, J.-P. Bécar, Mechanical and geometric performance of PLA-based polymer composites processed by the fused filament fabrication additive manufacturing technique, *Materials* 13(8) (2020): 1924.
- [6] P. Zhuo, S. Li, I.A. Ashcroft, I.A. Jones, Continuous fibre composite 3D printing with pultruded carbon/PA6 commingled fibres: processing and mechanical properties, *Composites Science and Technology* 221 (2022): 109341.
- [7] G.W. Melenka, B.K.O. Cheung, J.S. Schofield, M.R. Dawson, J.P. Carey, Evaluation and prediction of the tensile properties of continuous fibre-reinforced composites, *Composite Structures* 153 (2016): 866-875.
- [8] F. Ning, W. Cong, Y. Hu, H. Wang, Additive manufacturing of carbon fiber-reinforced plastic composites using fused deposition modeling: effects of process parameters on tensile properties, *Journal of Composite Materials* 51(4) (2017): 451-462.
- [9] X. Tian, T. Liu, C. Yang, Q. Wang, D. Li, Interface and performance of 3D printed continuous carbon fiber reinforced PLA composites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 88 (2016): 198-205.
- [10] M.T. Aranda, J. Reinoso, I.G. García, On different 3D printing methods and fracture performance in DCB composite specimens including structured interfaces, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* 122 (2022): 103552.
- [11] M. Iragi, C. Pascual-Gonzalez, A. Esnaola, C.S. Lopes, L. Aretxabaleta, Ply and interlaminar behaviours of 3D printed continuous carbon fibre-reinforced thermoplastic laminates: effects of processing conditions and microstructure, *Additive Manufacturing* 30 (2019): 100884.
- [12] J. Plocher, J. Wioland, A.S. Panesar, Additive manufacturing with fibre reinforcement: design guidelines and investigation into the influence of infill patterns, *Rapid Prototyping Journal* 28(7) (2022): 1241-1259.
- [13] R.T.L. Ferreira, I.C. Amatte, T.A. Dutra, D. Burger, Experimental characterization and micrography of 3D printed PLA and PLA reinforced with short carbon fibers, *Composites Part B: Engineering* 124 (2017): 88-100.
- [14] H. Junaedi, M. Baig, A. Dawood, E. Albahkali, A. Almajid, Mechanical and physical properties of short carbon fiber and nanofiller-reinforced polypropylene hybrid nanocomposites, *Polymers* 12 (2020): 2851.
- [15] T. Isobe, T. Tanaka, T. Nomura, R. Yuasa, Comparison of strength of 3D printing objects using short fiber and continuous long fiber, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 406 (2018): 012042.
- [16] E. Yasa, K. Ersoy, Dimensional accuracy and mechanical properties of chopped carbon reinforced polymers produced by material extrusion additive manufacturing, *Materials (Basel)* 12(23) (2019): 3885.
- [17] L. Tavora, C. Madrigal, M.T. Aranda, J. Justo, Anisotropy and ageing effect on the mechanical behaviour of 3D-printed short carbon-fibre composite parts, *Composite Structures* 321 (2023): 117196.
- [18] I. Zivkovic, C. Fragassa, A. Pavlovic, T. Brugo, Influence of moisture absorption on the impact properties of flax, basalt and hybrid flax/basalt fiber reinforced green composites, *Composites Part B: Engineering* 111 (2017): 148-164.
- [19] G. Chabaud, M. Castro, C. Denoual, A. Le Duigou, Hygromechanical properties of 3D printed continuous carbon and glass fibre reinforced polyamide composite for outdoor structural applications, *Additive Manufacturing* 26 (2019): 94-105.
- [20] B.C. Kikuchi, F.L.S. Bussamra, M.V. Donadon, R.T.L. Ferreira, R.C.M. Sales, Moisture effect on the mechanical properties of additively manufactured continuous carbon fiber reinforced nylon-based thermoplastic, *Polymer Composites* 41 (2020): 5227-5245.

- [21] M. Pizzorni, M. Prato, Effects of hygrothermal aging on the tensile and bonding performance of consolidated 3D printed polyamide-6 composites reinforced with short and multidirectional continuous carbon fibers, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 165 (2022): 107334.
- [22] K. Wang, Y. Chen, H. Long, M. Baghani, Y. Rao, Y. Peng, Hygrothermal aging effects on the mechanical properties of 3D printed composites with different stacking sequence of continuous glass fiber layers, *Polymer Testing* 100 (2021): 107242.
- [23] M.R. Khosravani, A. Zolfagharian, M. Jennings, T. Reinicke, Structural performance of 3D printed composites under various loads and environmental conditions, *Polymer Testing* 91 (2020): 106770.
- [24] Y. Wang, W. Zhu, B. Wan, Z. Meng, B. Han, Hygrothermal ageing behavior and mechanism of carbon nanofibers modified flax fiber-reinforced epoxy laminates, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 140 (2021): 106142.
- [25] L.M. Ferreira, C. Coelho, P.N.B. Reis, Numerical simulations of the low-velocity impact response of semicylindrical woven composite shells, *Materials* 16 (2023): 3442.
- [26] P.N.B. Reis, P. Sousa, L.M. Ferreira, C.A.C.P. Coelho, Multi-impact response of semicylindrical composite laminated shells with different thicknesses, *Composite Structures* 310 (2023): 116771.
- [27] Y.-T. Kao, A.R. Amin, N. Payne, J. Wang, B.L. Tai, Low-velocity impact response of 3D printed lattice structure with foam reinforcement, *Composite Structures* 192 (2018): 93-100.
- [28] F.A. Santos, H. Rebelo, M. Coutinho, L.S. Sutherland, C. Cismasiu, I. Farina, F. Fraternali, Low velocity impact response of 3D printed structures formed by cellular metamaterials and stiffening plates: PLA vs. PETG, *Composite Structures* 256 (2021): 113128.
- [29] M.O.W. Richardson, M.J. Wisheart, Review of low-velocity impact properties of composite materials, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 27(12) (1996): 1123-1131.
- [30] R. Olsson, Analytical prediction of damage due to large mass impact on thin ply composites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 72 (2015): 184-191.
- [31] I. Papa, E. Manco, G. Epasto, V. Lopresto, A. Squillace, Impact behaviour and nondestructive evaluation of 3D printed reinforced composites, *Composite Structures* 281 (2022): 115112.
- [32] M.A. Caminero, J.M. Chacon, I. García-Moreno, G.P. Rodríguez, Impact damage resistance of 3D printed continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling, *Composites Part B: Engineering* 148 (2018): 93-103.
- [33] American Society for Testing and Materials, Standard test method for measuring the damage resistance of a fiber reinforced polymer matrix composite to a drop weight impact event, ASTM D7136/D7136M-05 (2005).
- [34] M. Mudarra, Puesta a punto y caracterización de probetas de material compuesto fabricadas con un sistema de impresión 3D, Trabajo Fin de Grado, Universidad de Sevilla (2021).
- [35] L.M. Ferreira, C.A. Coelho, P.N.B. Reis, Effect of thickness-to-radius ratio on the impact response of fabric-reinforced composite shells, *Thin-Walled Structures* 213 (2025): 113279.
- [36] L.M. Ferreira, C.A. Coelho, P.N.B. Reis, Characterization of low-velocity impact damage in asymmetric composite shells, *Journal of Applied and Computational Mechanics* 11(1) (2025): 98-109.
- [37] L.M. Ferreira, M.T. Aranda, M. Munoz-Reja, C.A.C.P. Coelho, L. Távara, Ageing effect on the low-velocity impact response of 3D printed continuous fibre reinforced composites, *Composites Part B: Engineering* 267 (2023): 111031.