

Comportamiento a flexión de estructuras sándwich obtenidas mediante impresión 3D con fibra continua



- 1. Introducción**
- 2. Objetivos**
- 3. Desarrollo experimental**
- 4. Análisis de los resultados**
- 5. Conclusiones**
- 6. Aplicación de los núcleos 3D**

1.Introducción

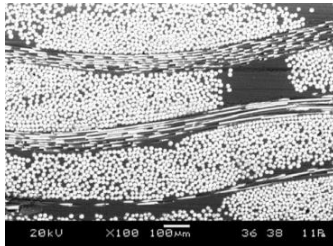
Impresión 3D de materiales compuestos
Propiedades de los materiales compuestos imprimidos
Microestructuras singulares

INTRODUCCIÓN

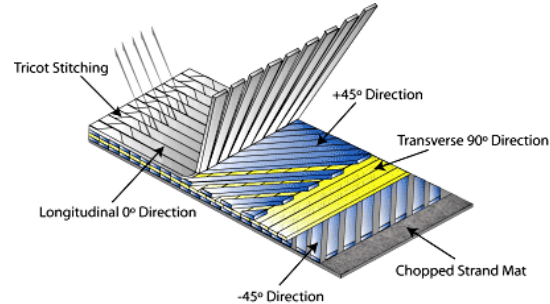
Impresión 3D de materiales compuestos

4

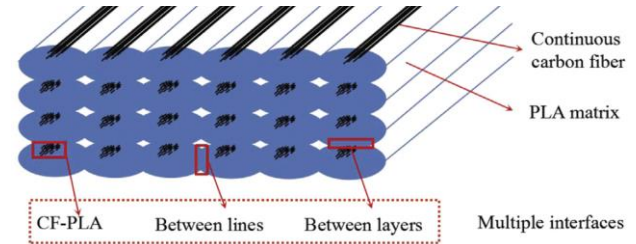
**Matriz (polímero)
+ Refuerzo (fibra) [%]**



**Laminado
(orientaciones)**



**Heterogeneidad
impresión 3D**

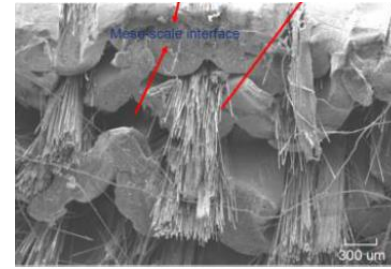
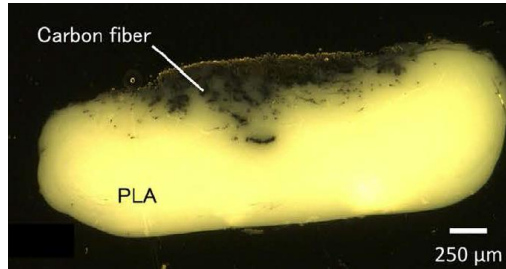
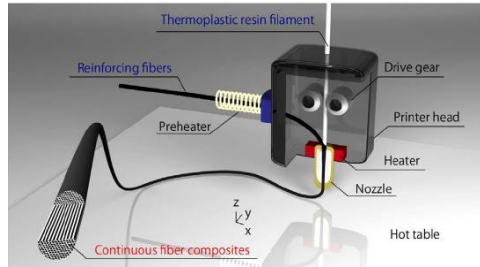


INTRODUCCIÓN

Impresión 3D de materiales compuestos

5

- **Impregnación en boquilla**



Ventaja

- Precio materias primas
- Libertad materias primas
- PLA, ABS, PP...

Desventaja

- % fibra limitado (~15%)
- Mala impregnación
- Mala dispersión

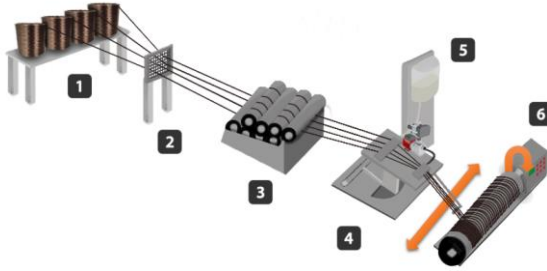
X. Tian *et al.* / Journal of Cleaner Production 142 (2017) 1609-1618
C. Yang *et al.* / Rapid Prototyping Journal 23 (2017) 209-215

INTRODUCCIÓN

Impresión 3D de materiales compuestos

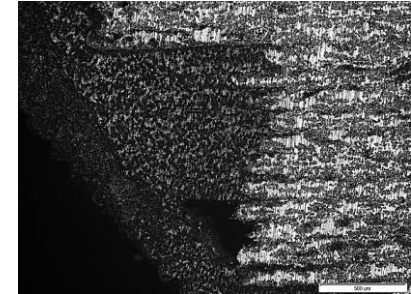
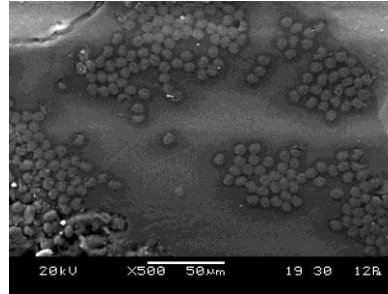
6

- **Filamento pre-impregnado**



Ventaja

- % fibra (~35%)
- Buena impregnación
- Buena dispersión



Desventaja

- Precio materias primas
- Disponibilidad materiales

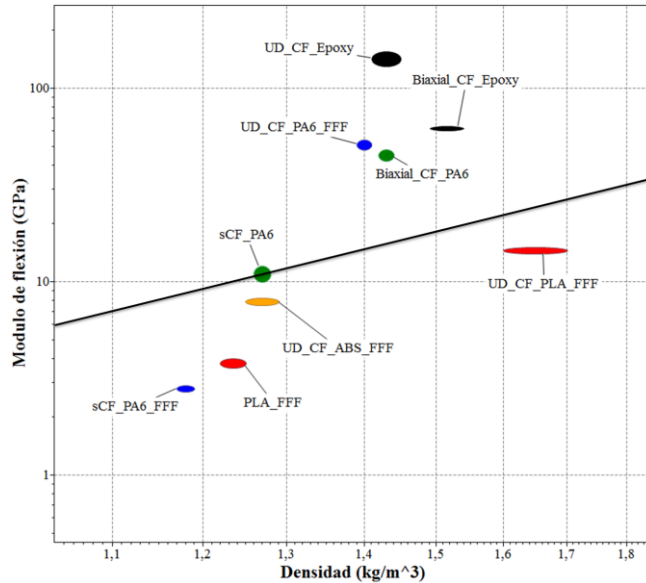
F. van der Klift *et al.* / Open Journal of Composite Materials 6 (2016) 18–27
G.D. Goh *et al.* / Materials and Design 137 (2018) 79–89

INTRODUCCIÓN

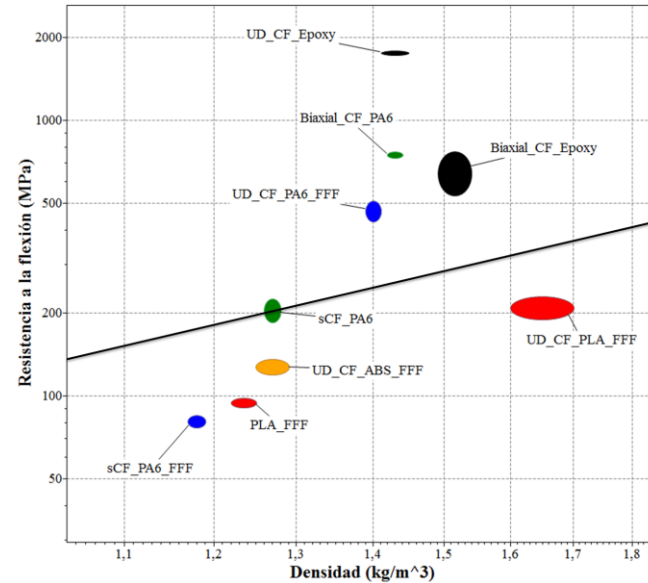
7

Propiedades de los materiales compuestos imprimidos

$$M_1 = E^{1/3} / \rho$$



$$M_2 = R_{max}^{1/2} / \rho$$



Propiedades de los materiales compuestos imprimidos

- **Caracterización mecánica**

- Tracción
- Compresión
- Cortadura en plano
- Cortadura interlaminar (ILSS)

- L.G. Blok, M.L. Longana, H. Yu, B.K.S. Woods, An investigation into 3D printing of fibre reinforced thermoplastic composites, Additive Manufacturing 22 (2018) 176–186, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.04.039>.
- G.D. Goh, V. Dikshit, A.P. Nagalingam, G.L. Goh, S. Agarwala, S.L. Sing, J. Wei, W.Y. Yeong, Characterization of mechanical properties and fracture mode of additively manufactured carbon fiber and glass fiber reinforced thermoplastics, Materials and Design 137 (2018) 79–89, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.10.021>.
- F. Van Der Klift, Y. Koga, A. Todoroki, M. Ueda, Y. Hirano, R. Matsuzaki, 3D printing of continuous carbon fibre reinforced thermo-plastic (CFRTP) tensile test specimens, Open Journal of Composite Materials 06 (2016) 18–27, <https://doi.org/10.4236/ojcm.2016.61003>.
- J. Justo, L. Tavares, L. Garcia-Guzman, F. Paris, Characterization of 3D printed long fibre reinforced composites, Composite Structures 185 (2018) 537–548, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.11.052>.
- T.A. Dutra, R.T.L. Ferreira, H.B. Resende, A. Guimaraes, Mechanical characterization and asymptotic homogenization of 3D-printed continuous carbon fiber-reinforced thermoplastic, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering 41 (2019) 133, <https://doi.org/10.1007/s40430-019-1630-1>.
- M.A. Caminero, J.M. Chacon, J.M. Reverte, Interlaminar bonding performance of 3D printed continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling, Polymer Testing 68 (2018) 415–423, <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.04.038>.

Propiedades de los materiales compuestos imprimidos

- **Caracterización mecánica**

- Se observa que el comportamiento mecánico del material está condicionado por los defectos inducidos por el proceso de fabricación.
- La mayoría de los trabajos publicados caracterizan las propiedades del laminado obtenido directamente de la impresión; los cuales incluyen contornos y capas exteriores sin refuerzo de fibra de carbono.
- No hay caracterización de energías de fractura interlaminar, necesario para poder aplicar criterios de fractura por delaminación y analizar el comportamiento a impacto del material fabricado por impresión 3D.

Propiedades de los materiales compuestos imprimidos

Additive Manufacturing 30 (2019) 100884



ELSEVIER

Contents lists available at [ScienceDirect](#)

Additive Manufacturing

journal homepage: www.elsevier.com/locate/addma



Ply and interlaminar behaviours of 3D printed continuous carbon fibre-reinforced thermoplastic laminates; effects of processing conditions and microstructure



M. Irigien^{a,*}, C. Pascual-González^b, A. Esnaola^a, C.S. Lopes^b, L. Aretxabaleta^a

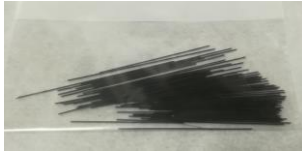
^a Mondragon Unibertsitatea, C/Loramendi 4, 20500 Arrasate-Mondragon, Spain

^b IMDEA Materials Institute, C/Eric Kandel 2, 28906 Getafe, Madrid, Spain

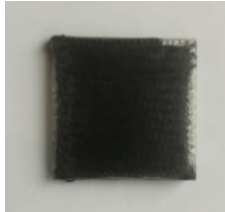
Propiedades de los materiales compuestos imprimidos

- **Caracterización física**

Filamento de fibra de carbono



Muestra imprimida



25,5 mm × 25,5 mm × 2 mm
[0/90]₇

Digestión de matriz: ácido sulfúrico y peróxido de hidrógeno (ASTM D3171).



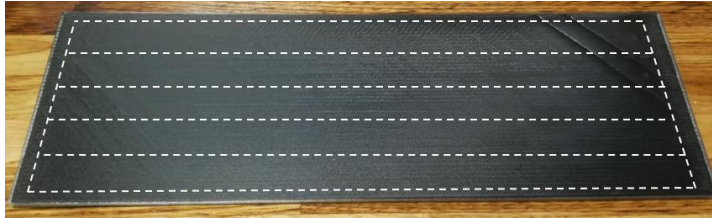
Medición densidad: Principio de Arquímedes.

Propiedad	Filamento	Pieza
Densidad (g/cm ³)	1.348	1.25
Volumen de fibra	34.6%	31.4%
Volumen de poros	< 1%	7.5%

Propiedades de los materiales compuestos imprimidos

- **Caracterización mecánica**

Impresión de la placa de material compuesto.



Corte por chorro de agua.

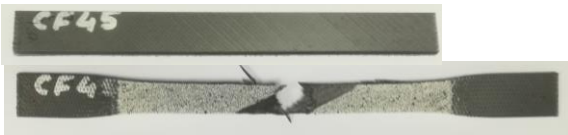
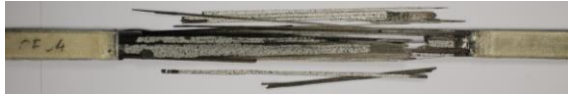


Acondicionado a 23°C y 50% HR.

GOM-ARAMIS DIC.



- Caracterización mecánica



Test	ASTM	Lay-up	Dimensions (mm)
Longitudinal tension	D 3039	[0] ₁₆	2.25 × 15 × 250
Longitudinal compression	D 3410	[0] ₁₆	2.25 × 12.5 × 135
Transversal tension	D 3039	[90] ₁₈	2.5 × 22 × 200
Transversal compression	D 3410	[90] ₂₆	3.5 × 20 × 135
In-plane shear	D 3518	[± 45] _{4s}	2.25 × 22 × 210
Interlaminar shear	D 2344	[0] ₄₆	6 × 12 × 40
Interlaminar fracture Mode I	D 5528	[0] ₂₄	9 × 25 × 180
Interlaminar fracture Mode II	D 7905	[0] ₂₄	9 × 25 × 130



Propiedades de los materiales compuestos imprimidos

- Caracterización mecánica**

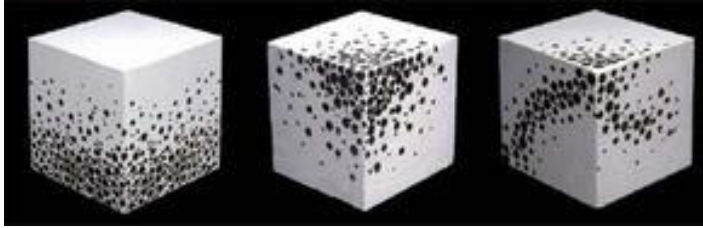
Test	Property	Measurement	Reference
Longitudinal tension	Tensile modulus (GPa)	69.4 (0.2)	72.2 [52]
	Poisson's ratio	0.41 (0.01)	–
	Tensile strength (MPa)	905.3 (4.3)	1047 [52]
	Ultimate tensile strain (%)	1.27 (0.04)	–
Longitudinal compression	Compressive modulus (GPa)	63.9 (1.3)	–
	Compressive strength (MPa)	426.0 (9.7)	–
	Ultimate compression strain (%)	0.69 (0.02)	–
Transversal tension	Tensile modulus (GPa)	3.5 (0.1)	7.4 [52]
	Tensile strength (MPa)	17.9 (1.7)	33.3 [52]
	Ultimate tensile strain (%)	0.58 (0.07)	–
Transversal compression	Compressive modulus (GPa)	3.7 (0.2)	–
	Compressive strength (MPa)	66.0 (6.6)	–
In-plane shear	Shear modulus (GPa)	1.9 (0.1)	–
	Shear strength at 5% (MPa)	43.4 (2.6)	–
	Shear strength at 25% (MPa)	61.5 (2.0)	–
Interlaminar shear	Interlaminar shear strength (MPa)	34.1 (0.1)	46.7 [51]
Interlaminar fracture	Mode I fracture toughness (kJ/m ²)	2.00 (0.17)	2.20 [53]
	Mode II fracture toughness (kJ/m ²)	1.59 (0.33)	2.68 [53]

INTRODUCCIÓN

Microestructuras singulares

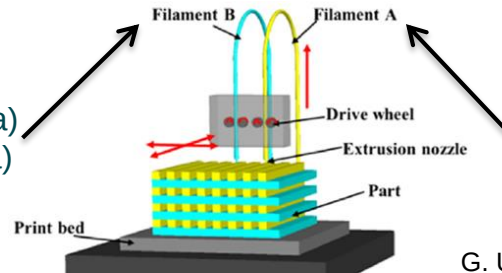
15

- **Functionally graded composites**
 - Variación gradual en la composición y estructura en el volumen



Tough Nylon

- E (0,94 GPa)
- R_m (58 MPa)
- e_b (260%)



CF PA

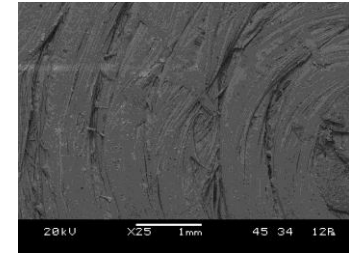
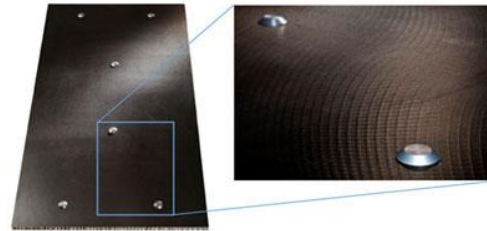
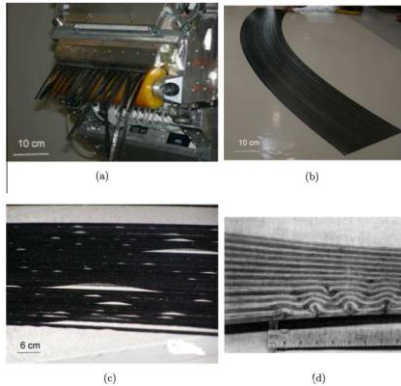
- E (70 GPa)
- R_m (900 MPa)
- e_b (1,5%)

G. Udupa *et al.* / Procedia Materials Science 5 (2014) 1291 – 1299

- **Steered fibres**

- Orientaciones no lineales de las fibras en el plano del laminado

Automatic Fibre Placement (AFP)



FFF

- Radio curvatura mucho menor que en AFP

INTRODUCCIÓN

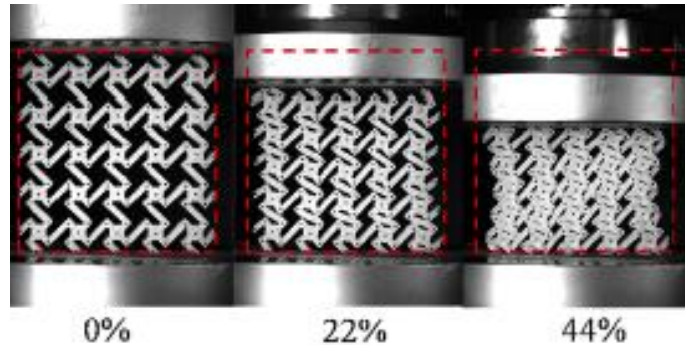
Microestructuras singulares

17

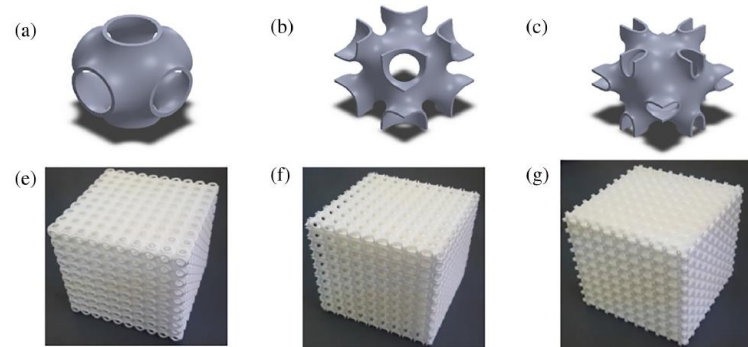
- **Lattice structures**

- Estructuras reticuladas obtenidas por repetición de celdas unitarias

Auxéticos

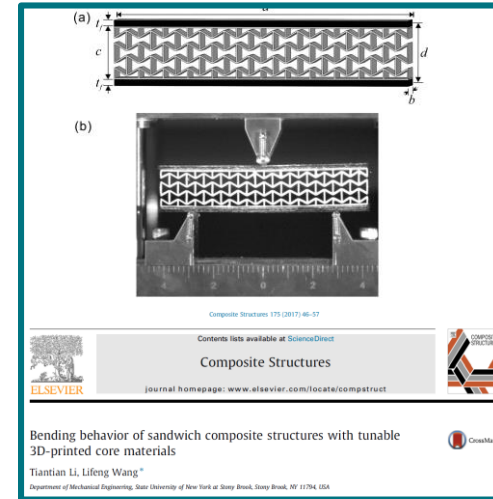
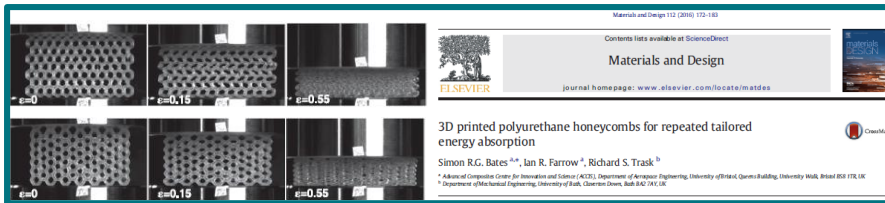
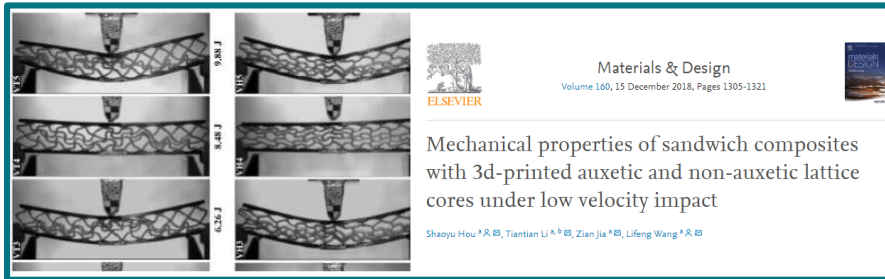


Materiales Bio-inspirados



K.C. Cheung et al. / Science 341 (2013) 1219–1221

- Estructuras sándwich con núcleos por impresión 3D

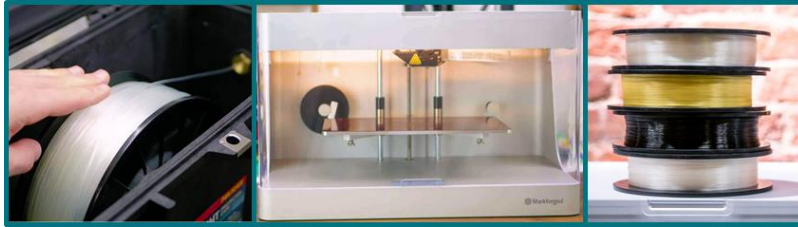


2.Objetivos

- Comparar el comportamiento a flexión de vigas de tipo sándwich fabricadas íntegramente (pieles y núcleos en una sola operación) mediante impresión 3D.
- Analizar el efecto que tiene la estrategia de impresión en las propiedades de la viga sándwich a flexión (anisotropía debido al proceso de fabricación).
- Estudiar el efecto del material del núcleo, comparando el comportamiento de un núcleo de poliamida con el de uno de poliamida reforzado con fibra de carbono continua.

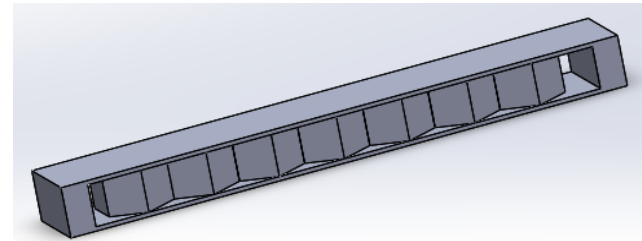
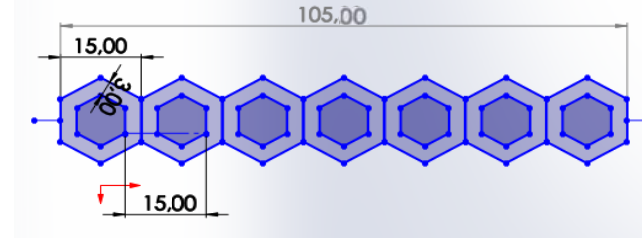
3.Desarrollo experimental

Materiales y geometría
Estrategias de impresión
Ensayos de flexión



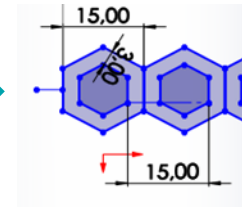
Material (según Markforged®)	Nylon	Nylon/Carbono
Densidad (g/cm ³)	1,1	1,15
Módulo Elasticidad (GPa)	0,94	54
Límite Elástico (MPa)	31	-
Tensión Rotura (MPa)	54	700
Alargamiento Rotura (%)	268	1,25

https://static.markforged.com/markforged_composites_datasheet.pdf. Fecha consulta: 20/04/2019.

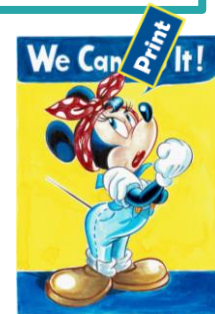
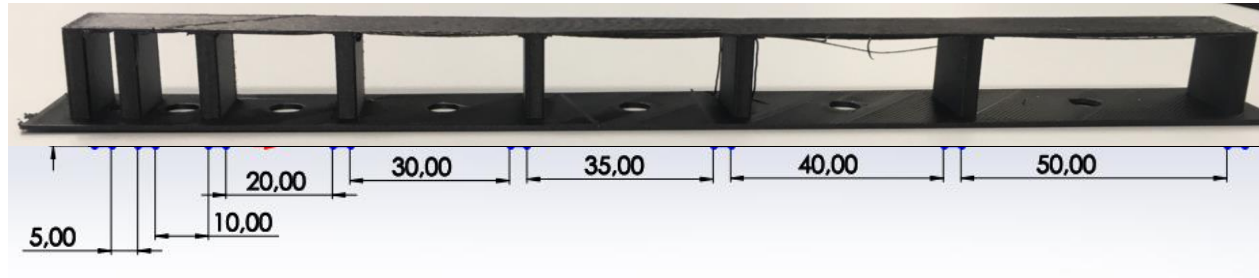


Piel 130 mm x 18 mm x 1 mm
Núcleo 130 mm x 18 mm x 10 mm

- Primera capa de CF de la piel superior: **GAP de 15 mm** →



¿La impresora es capaz de depositar fibra en un GAP de 15 mm correctamente?

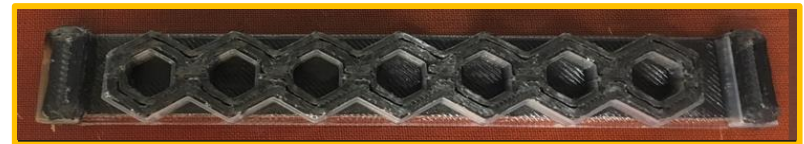


DESARROLLO EXPERIMENTAL

Estrategias de impresión

24

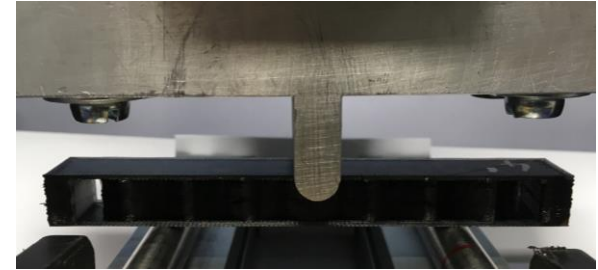
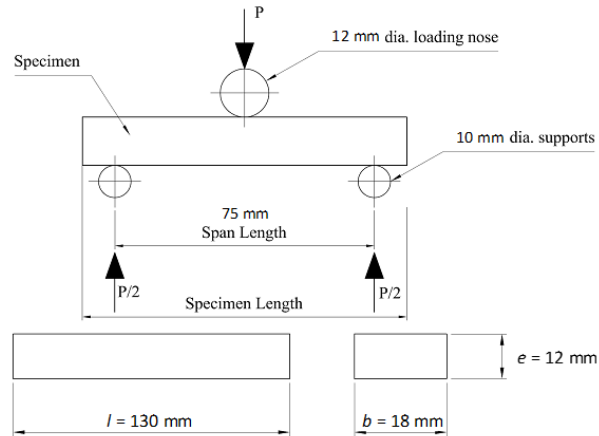
Nomenclatura	Configuración
PVSF	Piel Vertical Sin Fibra
PHSF	Piel Horizontal Sin Fibra
PHRA	Piel Horizontal Refuerzo Anillos
PHRP	Piel Horizontal Refuerzo Perimetral



DESARROLLO EXPERIMENTAL

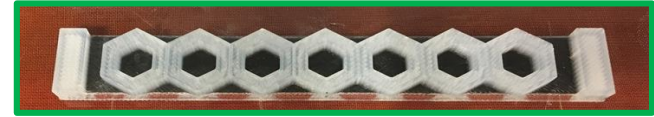
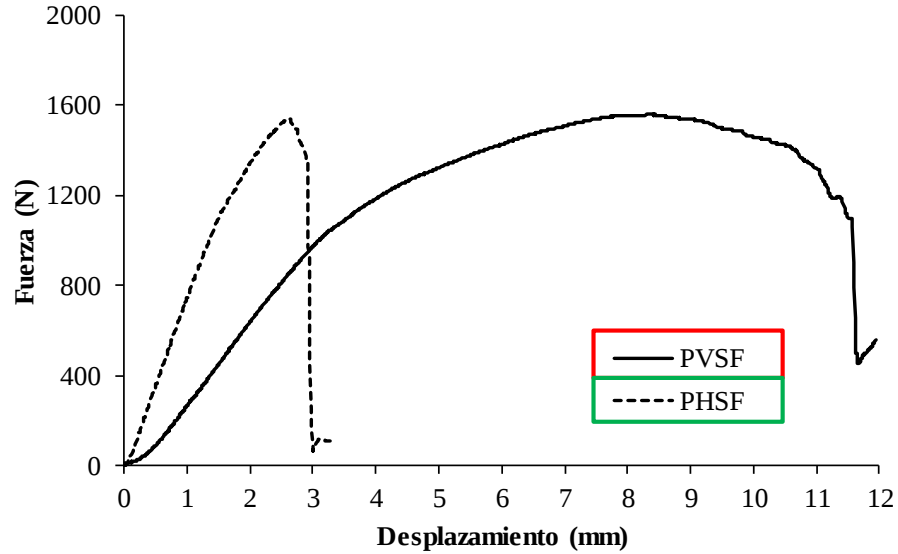
Ensayos de flexión

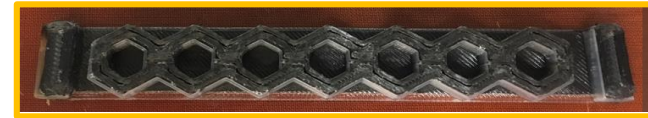
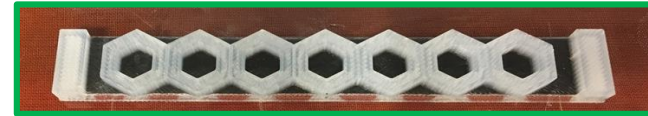
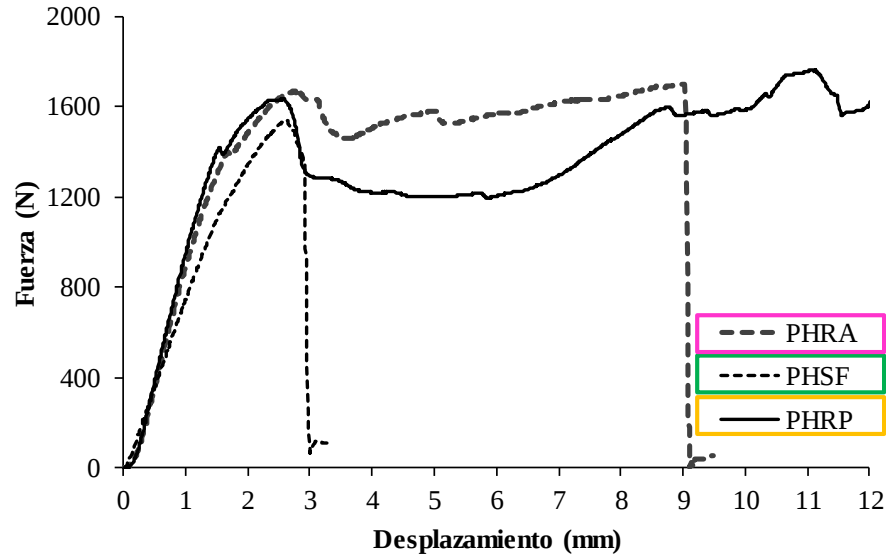
25



$V_{\text{compresión}} = 10 \text{ mm/min}$

4. Análisis de los resultados





5. Conclusiones

- Es posible depositar el filamento de carbono en zonas vacías de material de hasta 50 mm sin necesidad de soportes, aunque a partir de los 30 mm la primera capa sufre un ligero abombamiento.
- La resistencia o fuerza máxima de la viga depende de las propiedades de las pieles.
- La estrategia de impresión tiene gran influencia. Se ha demostrado que las vigas cuyas pieles exteriores se han fabricado perpendicularmente, tienen una rigidez del 50% comparando con aquellas vigas cuyas pieles se han imprimido paralelos a la base.
- Las vigas con núcleos reforzados con fibra continua de carbono son un 25% más rígidos que la misma configuración con el núcleo sin reforzar.
- La configuración PHRP, cuyo núcleo se refuerza perimetralmente, sigue teniendo capacidad de carga con deformaciones superiores a los 12 mm. Por ello, es considerado como la configuración óptima entre las analizadas.

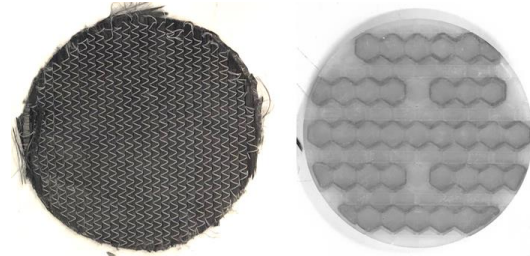
6. Aplicación de los núcleos 3D

Núcleos de impresión 3D en el proceso de RTM y CRTM
Sobre-impresión 3D en organosheet

Núcleos de impresión 3D en el proceso de RTM y CRTM

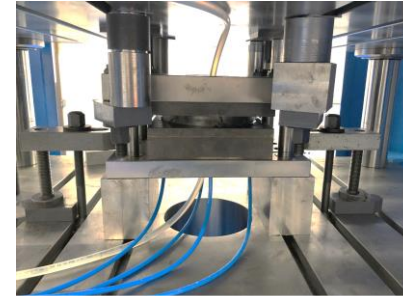
- **Materiales empleados**

- Epoxi de rápido curado **XB 3585** y endurecedor **Aradur® 3475** (100:21)
- Fibra de **carbono**: Tejido biaxial **NCF** (HPT 610 C090)
- Núcleo: **PA + CCF** por impresión 3D



Núcleos de impresión 3D en el proceso de RTM y CRTM

- **Fabricación de la estructura sándwich**



Servo prensa hidráulica 80 tn

Sistema de inyección RADIUS

2100 cm³ - 500 cm³/min – 25 bar

Atemperador de molde

Sistema de vacío

Dispositivo de monitorizado

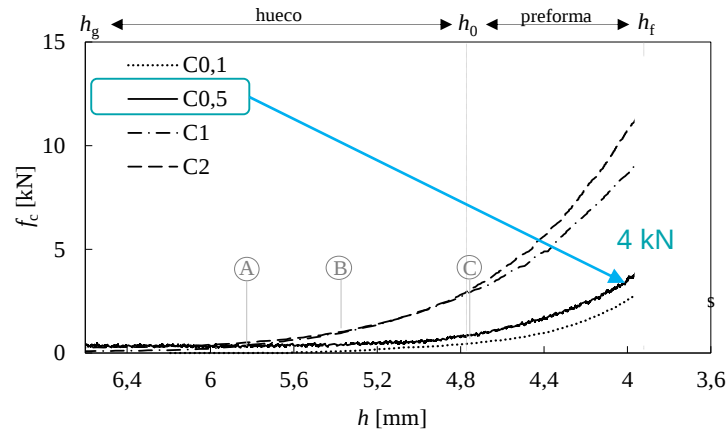
Fuerza, presión interna, temperatura, curado

- **Fabricación de la estructura sándwich: RTM vs CRTM**

Delimita: la fuerza de cierre → 4 kN

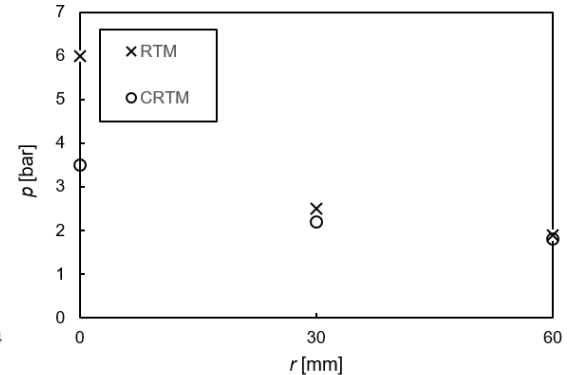
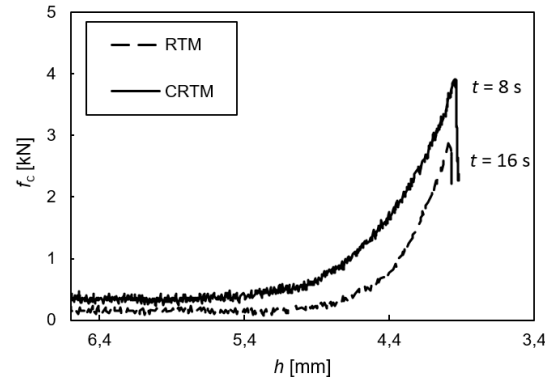
Comparativa en términos de tiempo de ciclo.

- RTM: 3 kN
- CRTM: 4 kN



Núcleos de impresión 3D en el proceso de RTM y CRTM

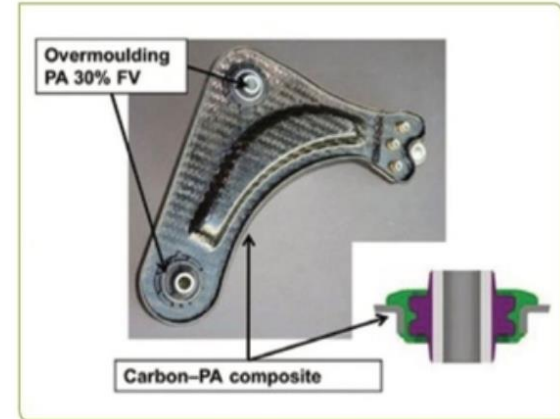
- Resultados de la fabricación de la estructura sándwich



Se demuestra que el **CRTM** necesita **menor tiempo de ciclo** que **RTM** con **presiones similares**, para la **fabricación de estructuras sándwich de núcleo de impresión 3D** y pieles de CFRP.

APLICACIÓN DE LOS NÚCLEOS 3D Sobre-impresión 3D en organosheet

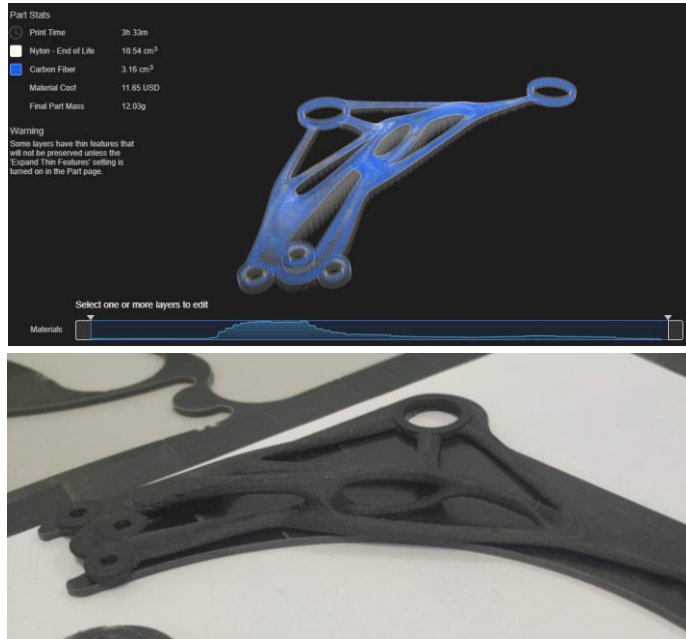
36



Overmolding of pivot joint

APLICACIÓN DE LOS NÚCLEOS 3D Sobre-impresión 3D en organosheet

37



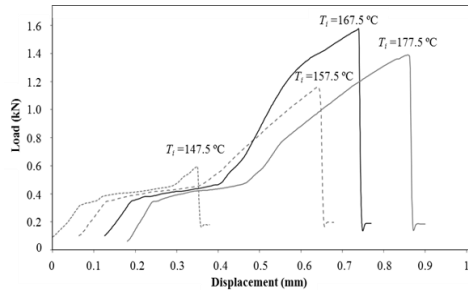
Over-3D printing of pivot joint

Temperatura impresión	T_o (°C)
PA6	275
CF-PA6	252

APLICACIÓN DE LOS NÚCLEOS 3D Sobre-impresión 3D en organosheet

39

Shear force



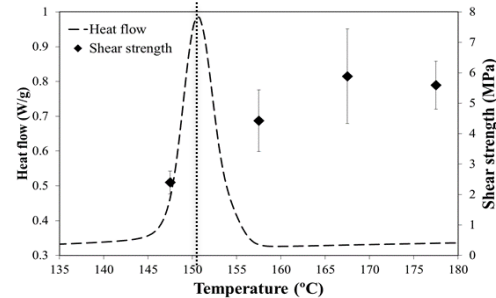
Ensayo de cortadura:

- Velocidad 1 mm/min.
- Temperatura ambiente y 35% HR
- Fuerza max, $F_s = 1.6 \text{ kN}$ ($T_i = 167.5^\circ\text{C}$)

Differential scanning calorimetry (DSC):

- ASTM D-3417-97.
- Rampa calentamiento: $10^\circ\text{C}/\text{min}$
- Temperatura fusión sustrato, $T_m \approx 150^\circ\text{C}$

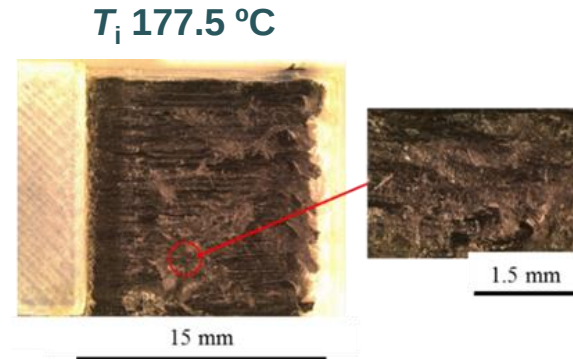
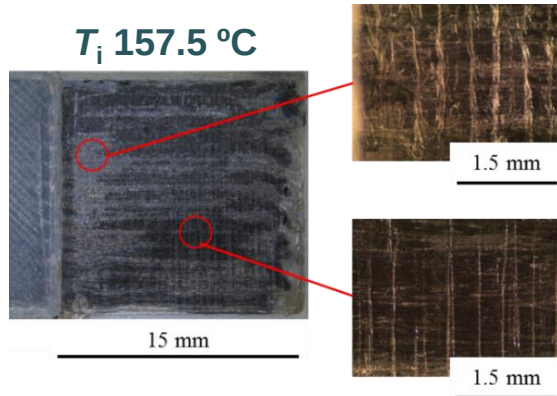
Bonding strength



Cuando T_i está por debajo del pico de temperatura, hay poca fusión del material y la adherencia es baja, con una τ baja (2,4 MPa).

Cuando T_i está por encima del pico de temperatura, la matriz del sustrato se funde correctamente dando lugar a una adherencia mejor (5,7 MPa).

Superficie de fractura:



Mecanismo de fractura:

Delaminación de la intercara entre sustrato y material imprimido cuando $T_i < 167.5$ °C

Rotura a cizalla de la matriz del material compuesto imprimido en la intercara cuando $T_i > 167.5$ °C

Eskerrik asko

شكرا

Obrigado

Bedankt

Danke

спасибо

谢谢

Merci

Gracias

감사

धन्यवाद

Teşekkürler

Thank you

Moltes gràcies

ありがとうございます

Grazie

Dr. Aritz Esnaola Arruti

✉ aesnaola@mondragon.edu