

Estudio de la unión por temperatura de piezas impresas en PLA.

**Miguel Fabra-Rodríguez¹, Francisco J. Simón-Portillo², David Abellán-López³,
Oscar Cuadrado-Sempere⁴, Emilio Velasco-Sánchez⁵, Miguel Sánchez-Lozano⁶**

¹Instituto de Investigación en Ingeniería de Elche – I3E, UMH, España. Email: mfabra@umh.es

²Instituto de Investigación en Ingeniería de Elche – I3E, UMH, España. Email: f.simon@umh.es

³Instituto de Investigación en Ingeniería de Elche – I3E, UMH, España. Email: dabellan@umh.es

⁴Instituto de Investigación en Ingeniería de Elche – I3E, UMH, España. Email: ocuadrado@umh.es

⁵Instituto de Investigación en Ingeniería de Elche – I3E, UMH, España. Email: emilio.velasco@umh.es

⁶Instituto de Investigación en Ingeniería de Elche – I3E, UMH, España. Email: msanchez@umh.es

Resumen

El ácido poliláctico (PLA) es uno de los materiales más empleados en el proceso de fabricación aditiva de Modelado por Deposición Fundida (FDM). En la actualidad, han adquirido relevancia los estudios acerca de los tratamientos térmicos a los que pueden ser sometidos las piezas fabricadas en PLA, como el recocido, para la mejora de sus propiedades mecánicas. Este trabajo presenta la posibilidad de utilizar un tratamiento térmico para lograr la adhesión de dos piezas impresas en PLA mediante la utilización de un horno convencional. El objetivo final planteado es poder realizar la unión permanente de diferentes piezas impresas en 3D sin la necesidad de emplear elementos adicionales para su ensamblaje. Para ello, se han elaborado probetas SLJ las cuales han sido expuestas a diferentes temperaturas y tiempos de tratamiento dentro del horno. Tras su enfriamiento, estas probetas han sido ensayadas mediante una máquina de ensayos universal.

Palabras clave: Impresión 3D; Modelado por Deposición Fundida; Extrusión de Material; Tratamiento Térmico; Adhesión; Solape Simple.

Abstract

Polylactic acid (PLA) is one of the most widely used materials in the additive manufacturing process of Fused Deposition Modeling (FDM). Nowadays, studies on the thermal treatments to which PLA parts can be subjected in order to improve their mechanical properties, such as annealing, have gained relevance. This work presents the possibility of using a heat treatment to achieve the adhesion of two parts printed in PLA using a conventional oven. The final objective is to be able to permanent join different 3D printed parts without the need to use additional elements for their assembly. To this end, SLJ test specimens have been prepared and exposed to different temperatures and treatment times inside the oven. After cooling, these specimens were tested using a universal testing machine.

Keywords: 3D Printing; Fused Deposition Modeling; Material Extrusion; Heat Treatment; Adhesion; Single Lap Joint.

1. Introducción

La fabricación aditiva, también conocida como impresión 3D, es un método de producción innovador que se basa en tecnologías de diseño asistido por computador (CAD) y fabricación asistida por computador (CAM). Esta técnica permite la

producción de componentes tridimensionales con geometrías complejas [1]. A pesar de la existencia de numerosos procedimientos que permiten el uso de una amplia gama de materiales y tecnologías, el Modelado por Deposición Fundida (conocido como FDM por sus siglas en inglés, o también como MEX) ha ganado

prominencia como una de las técnicas más utilizadas en la actualidad [2].

El Modelado por Deposición Fundida emplea polímeros termoplásticos como el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), poliuretano termoplástico (TPU) o el ácido poliláctico (PLA), siendo este último el material más comúnmente utilizado [3]. En el proceso FDM, el material termoplástico se suministra en forma de filamento a una boquilla, donde se calienta por encima de su punto de fusión. Posteriormente, se deposita capa por capa hasta generar la pieza deseada.

Originalmente, la fabricación aditiva fue concebida como un proceso para la fabricación rápida de prototipos, por lo que las piezas producidas se destinaban principalmente a propósitos de demostración. Sin embargo, en la actualidad, la fabricación aditiva se ha consolidado como un método de producción viable con aplicaciones en diversas industrias, incluyendo la automotriz [4], aeroespacial [5], robótica [6] y de salud [7]. Este cambio ha impulsado la investigación de los diferentes parámetros de fabricación [8], como la velocidad de impresión, la altura de las capas, la orientación del relleno y la temperatura de fabricación, y su efecto sobre las propiedades mecánicas de las piezas producidas.

A pesar de sus ventajas, el Modelado por Deposición Fundida presenta ciertas limitaciones, como la restricción del tamaño del volumen a fabricar y la dificultad para imprimir piezas con voladizos muy pronunciados. Una estrategia para superar estos desafíos consiste en dividir la geometría a fabricar en diferentes piezas que luego pueden unirse mediante adhesivos. Para estudiar la resistencia de estas uniones, se realizan ensayos de cizalladura en probetas de solape simple (SLJ), que permiten caracterizar fácilmente las propiedades de la unión [9].

Existen diversos estudios que analizan la resistencia de la unión en probetas SLJ fabricadas con PLA al variar la orientación de las líneas de relleno que forman las piezas fabricadas en FDM. Estos estudios utilizan adhesivos epoxi [10], acrílico [11] e incluso reforzado con partículas [12]. Las conclusiones obtenidas de forma generalizada indican que la orientación de relleno longitudinal en la dirección de los esfuerzos de tracción proporciona la máxima resistencia. Atahan y Apalak [13] realizaron ensayos de cizalladura con probetas SLJ a diferentes velocidades comprendidas entre 1 y 50 mm/min, revelando la poca sensibilidad de los resultados a esta variación del parámetro de estudio. Khosravani *et al.* [14] analizaron los diferentes modos de fallo

producidos en probetas fabricadas en PLA y unidas con adhesivo epoxi aplicado con diferentes espesores. Otros estudios tratan de mejorar la adhesión de probetas fabricadas en PLA a través del diseño de uniones en ángulo [15], uniones con superficies onduladas [16] o dentadas [17].

Existen métodos alternativos para lograr la adhesión de piezas fabricadas en PLA, como utilizar material de aporte de forma manual gracias a un extrusor portátil conocido como bolígrafo 3D [18] o mediante el proceso de soldadura por fricción [19]. Sharma *et al.* [20] analizaron como diferentes geometrías de herramientas de soldadura por fricción afectan a la eficiencia de la unión de piezas de PLA. La herramienta de punta cilíndrica obtuvo mejor resultado en términos de resistencia y calidad de la superficie soldada. Esta herramienta era la que menos incremento de temperatura producía en las piezas, que superaban la temperatura de transición vítrea del PLA (60 °C) pero no alcanzaban la temperatura de fusión.

Los tratamientos térmicos sobre PLA han sido estudiados desde el punto de vista de la mejora de las propiedades mecánicas. Tamasag *et al.* [21] desarrollaron un tratamiento térmico, aplicado durante el propio proceso FDM, donde se incorporaba una pistola de calor que exhala aire a 80 °C de forma continua. Comprobaron la mejora de la resistencia a la tracción del PLA, debida a una mejor adhesión entre las capas durante su fabricación, a través de ensayos sobre probetas tipo halterio. Más habitual es aplicar un tratamiento térmico tipo recocido posterior a la fabricación que reduce las tensiones internas de la pieza [22]: se eleva la temperatura de las muestras en un horno sin alcanzar la temperatura de fusión, se mantiene la temperatura constante durante un tiempo determinado y finalmente se dejan enfriar las muestras a temperatura ambiente. Jayanth *et al.* [23] comprobaron que se producía una reducción de los huecos entre filamentos de las muestras de PLA tras el tratamiento térmico. Shbanah *et al.* [24] realizaron ensayos a 55 °C, 65 °C, 80 °C y 95 °C durante 5 h. Las probetas sometidas a la temperatura de 95 °C fueron desechadas por su acabado final deformado.

Por otro lado, la propuesta de este trabajo consiste en lograr la adhesión de dos piezas de PLA fabricadas por el Método Por deposición Fundida a través de un tratamiento térmico. De esta forma no se emplearía un adhesivo, lo que facilitaría lograr uniones cuya aplicación práctica limite el uso de estos materiales, como ocurre en el ámbito médico. También permitiría desarrollar una metodología de unión sencilla y asequible para usuarios particulares que desean fabricar piezas de geometrías complejas o de gran tamaño.

2. Metodología

En este trabajo se analiza como un tratamiento térmico similar a un recocido, pero con menores tiempos de exposición, puede producir la unión de piezas fabricadas en PLA. Para ello se dispone de un horno convencional con el cual se realiza el tratamiento térmico sobre probetas SLJ a diferentes combinaciones de temperatura y tiempo. Las probetas son sometidas a un posterior ensayo de cizalladura

específica el método de ensayo de adhesión para plásticos reforzados con fibra, pero ha sido empleada en la bibliografía como método de ensayo para probetas fabricadas en PLA [10, 12, 13]. La Figura 1 muestra un boceto con las dimensiones de la probeta.

El material empleado es PLA de la marca *Smartfil* en color negro *True Black* en formato de 2,85 mm de diámetro. El proceso de Modelado por Deposición Fundida se ha llevado a cabo en una *UltiMaker S3*

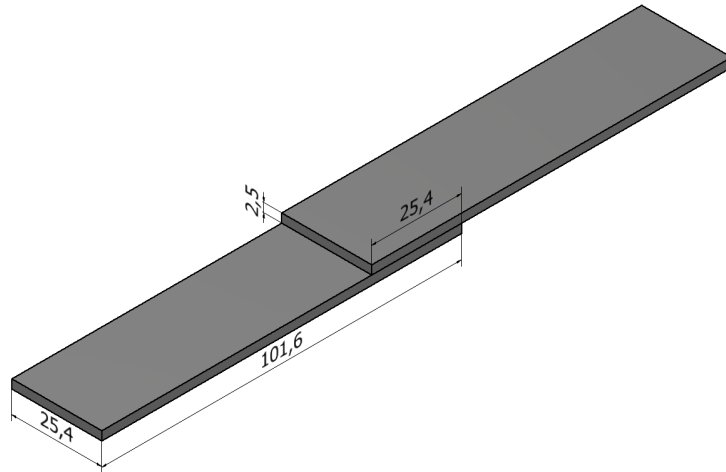


Figura 1. Dimensiones de la probeta SLJ según norma. Unidades en *mm*. Fuente: elaboración propia.

mediante una máquina de ensayos universal que permite cuantificar la viabilidad de la unión.

La metodología seguida se divide por tanto en tres procesos consecutivos: La fabricación de las probetas tipo SLJ en PLA, el tratamiento térmico que produce la unión y el ensayo de cizalladura.

2.1. Fabricación de las probetas SLJ

Las dimensiones de las probetas SLJ quedan definidas por la norma *ASTM D586 – 01 (2023)*. Esta norma

empleando un extrusor con boquilla de 0,4 mm de diámetro. La impresión se ha realizado con la orientación de relleno en la dirección longitudinal de las piezas con el fin de obtener la máxima resistencia a la tracción. El software de *slicing* CAM empleado ha sido *UltiMaker Cura*. Este software permite una previsualización del proceso configurado, como se muestra en la Figura 2 junto con un esquema de la orientación del relleno. La Tabla 1 recoge los principales parámetros de configuración del proceso de impresión 3D.

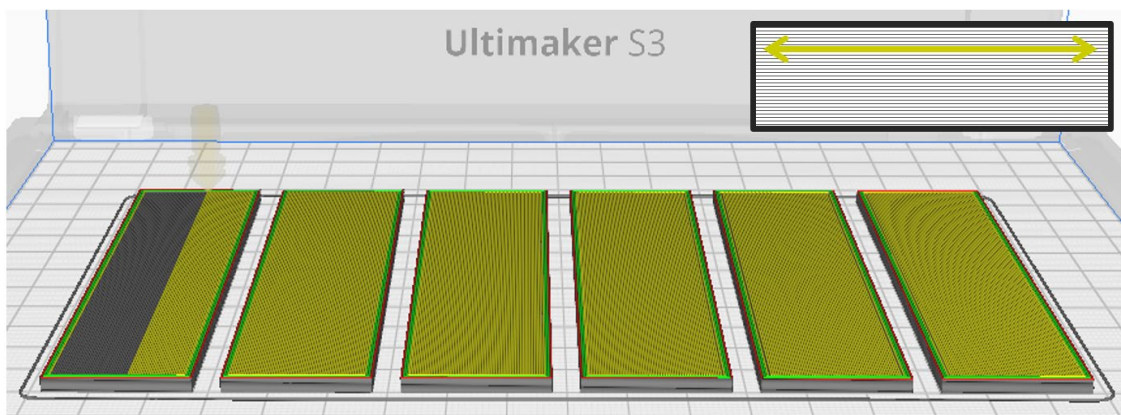


Figura 2. Visualización previa del proceso de impresión y orientación del relleno. Fuente: elaboración propia.

Tabla 1. Parámetros de impresión.

Parámetro	Valor
Tª Impresión	215 °C
Tª Cama Caliente	60 °C
Velocidad de Impresión	50 mm/s
Densidad de Relleno	100 %
Líneas de Borde (<i>Walls</i>)	3
Altura de Capa	0,2 mm

Fuente: elaboración propia.

Los ensayos se realizaron a temperaturas constantes de 60 °C (temperatura de transición vítrea del PLA), 70 °C, 80 °C y 90 °C, con el ventilador encendido en todo momento. El horno se precalentaba a la temperatura de ensayo antes de la introducción de las probetas durante 1 h.

El tiempo mínimo de tratamiento estudiado es de 10 min. Este tiempo fue ampliándose con incrementos de 10 min en 10 min hasta alcanzar los 40 min en



Figura 3. Horno empleado junto con detalle en su interior de la probeta SLJ y su utillaje. Fuente: elaboración propia.

2.2. Tratamiento térmico

Los tratamientos térmicos se han llevado a cabo en un horno de cocina convencional el cual permitía seleccionar la temperatura mediante un *display* digital. El termostato del horno consta de un control PID, una sonda tipo K y un relé que gobierna la resistencia térmica.

Para fijar las dos piezas que conforman la unión de simple solape se han utilizado 3 pinzas tipo clip de papelería de acero de 32 mm de longitud. Este tipo de pinzas ha sido empleado con anterioridad en la bibliografía consultada [11]. También se han empleado 4 pletinas de aluminio de 3 mm de espesor para distribuir la presión de las pinzas sobre el PLA. La Figura 3 muestra el horno utilizado durante la realización de los ensayos y el detalle en su interior de una probeta SLJ de PLA con la fijación descrita.

determinados casos. Una vez realizado el tratamiento térmico las probetas se dejaron enfriar fuera del horno a temperatura ambiente durante 24 h.

2.3. Ensayo de cizalladura

Las probetas SLJ han sido ensayadas en una máquina de ensayos universal de disposición horizontal equipada con una célula de carga de 20 kN. Todos los ensayos han sido realizados a una velocidad de 5 mm/min.

Las probetas se aseguraban a la máquina de ensayos con dos garras de aluminio apretadas mediante pernos. Para la correcta alineación de la probeta durante el ensayo se imprimieron pequeños calzos de espesor 2,5 mm. La Figura 4 muestra el esquema del montaje de las probetas SLJ.

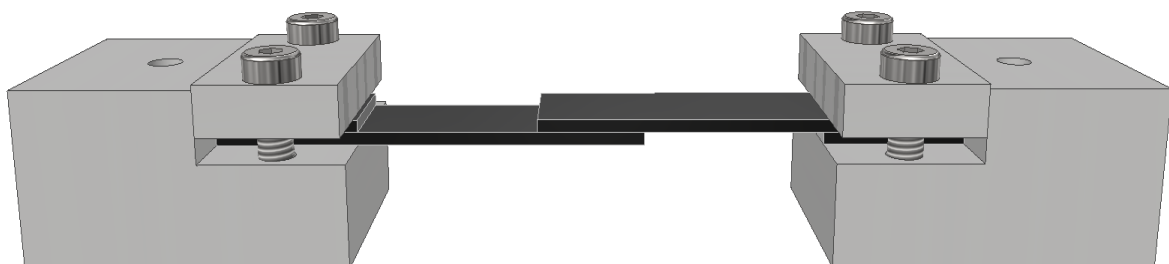


Figura 4. Esquema del montaje de la probeta SLJ en las garras de la máquina de ensayo. Fuente: elaboración propia.

3. Resultados

Se han ensayado 3 probetas para cada combinación de temperatura y tiempo dentro del horno durante el proceso de tratamiento térmico. Las probetas sometidas a una temperatura de 60 °C no lograron producir una unión efectiva. Estas piezas de PLA se introdujeron inicialmente en el horno durante 10 *min*. Como no se produjo la adhesión, el tratamiento térmico se realizó durante 20, 30 y 40 *min*. Tras estos periodos de tiempo mayores, las probetas podían extraerse unidas del horno, pero se separaban antes de poder realizar el ensayo de cizalladura durante del proceso de montaje sobre las garras.

Los tratamientos térmicos realizados a la temperatura de 70 °C arrojaron los primeros resultados positivos.

De nuevo, con 10 *min* de tratamiento no se produjo la unión, pero a 20, 30 y 40 *min* se alcanzó la adhesión. El ensayo de cizalladura realizado sobre las muestras unidas provocó un fallo adhesivo que separaba ambas partes de la probeta.

El procedimiento a 80 °C ya produjo la unión efectiva con únicamente 10 *min* de tratamiento térmico. Al incrementar el tiempo a 20 *min* se alcanzó el fallo del sustrato: en lugar de separarse, las probetas de PLA se fracturaban por el borde contiguo a la superficie solapada. Se decidió no incrementar el tiempo de tratamiento térmico una vez alcanzado el fallo del sustrato y aumentar la temperatura en su lugar.

La Figura 5 muestra el gráfico Fuerza-Desplazamiento del ensayo de cizalladura para un ejemplo de probeta tratada a 80 °C durante 10 *min* y otra durante 20 *min*. La probeta SLJ con 10 *min* de tratamiento produjo el fallo adhesivo en torno a 1,2 *kN* con un desplazamiento de 1,5 *mm*. La probeta sometida al tratamiento térmico durante 20 *min* resistió hasta los 2,8 *kN* con un desplazamiento cercano a los 3 *mm* donde se produjo el fallo del sustrato.

Los tratamientos térmicos a 90 °C ya generaron directamente una unión donde se produjo el fallo en el

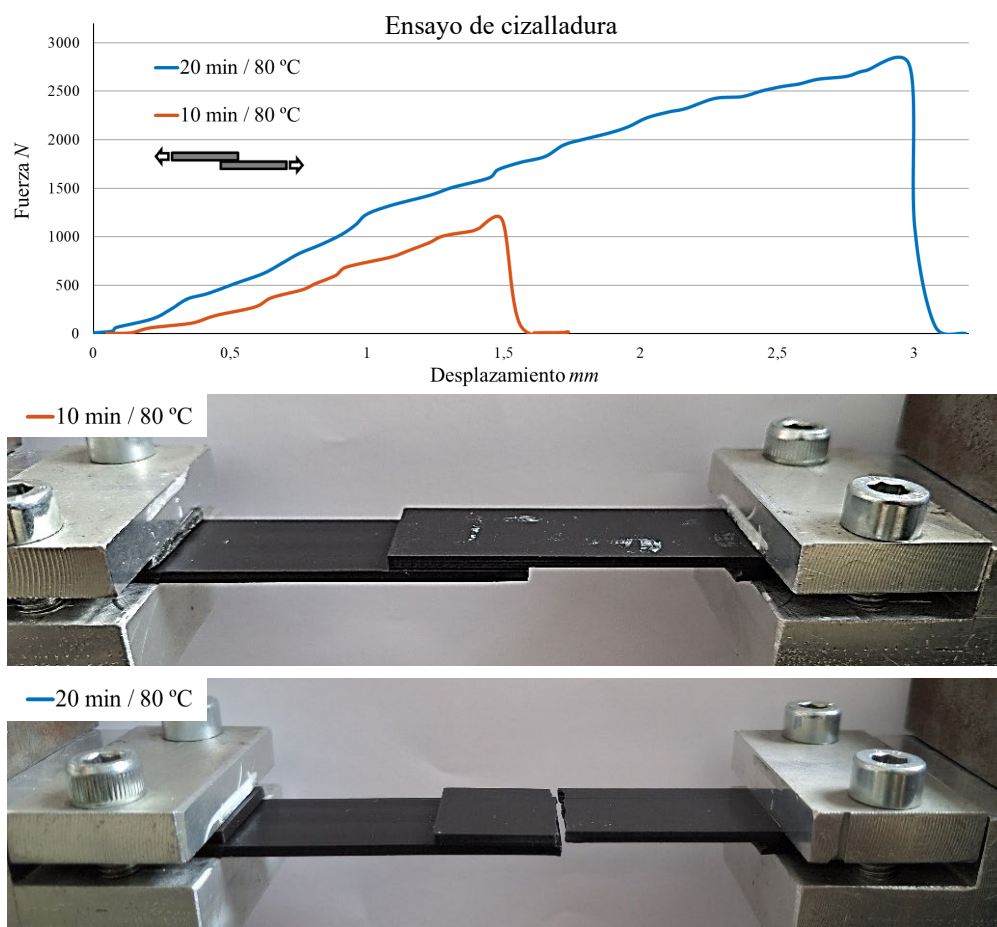


Figura 5. Gráfico Fuerza-Desplazamiento de dos ensayos de cizalladura con fotografías de las probetas tras producirse el fallo. Fuente: elaboración propia.

Promedio del valor máximo de fuerza soportado por la unión.				
	60 °C	70 °C	80 °C	90 °C
10 min	/	/	1,19 kN	2,53 kN
20 min	/	1,52 kN	2,41 kN	
30 min	/	1,45 kN		
40 min	/	1,75 kN		

Leyenda	
No se produce unión	
Unión → Fallo Adhesión	
Unión → Fallo Sustrato	

Figura 6. Cuadro resumen del tipo de fallo y fuerza soportada por la unión según el tratamiento térmico. Fuente: elaboración propia.

sustrato con únicamente 10 min de tratamiento. No se consideraron estudiar ensayos a temperaturas mayores debido las excesivas deformaciones que se producen por encima de esa temperatura [24].

Adicionalmente se realizaron ensayos de tracción sobre las piezas individuales de PLA que conforman la probeta SLJ sin recibir el tratamiento térmico, alcanzando una resistencia cercana a los 3 kN al fracturarse.

La Figura 6 muestra el valor promediado de la resistencia de la unión de los ensayos de cizalladura realizados sobre las 3 probetas SLJ sometidas a cada combinación de tiempo y temperatura durante el tratamiento térmico. Las uniones que fallan por rotura del sustrato se sitúan por encima de los 2,4 kN mientras que las que se separan debido al fallo adhesivo no llegan a resistir 1,8 kN.

4. Conclusiones

Este estudio ha demostrado que es posible lograr la unión de piezas fabricadas en PLA mediante un tratamiento térmico, similar a un recocido, pero con menores tiempos de exposición, empleando para ello un horno convencional. El tratamiento térmico se ha aplicado a probetas SLJ, variando las combinaciones de temperatura y tiempo.

La unión de las probetas se alcanzó en los ensayos realizados por encima de la temperatura de transición vítrea del PLA (60 °C).

Los ensayos de cizalladura realizados sobre las probetas SLJ tras el tratamiento térmico han permitido cuantificar la viabilidad de la unión, llegando a producir la rotura de las propias probetas de PLA en lugar de su separación. Por otro lado, queda patente que incrementando la temperatura se reduce el tiempo de tratamiento térmico necesario para lograr la adhesión.

La investigación actual de los autores de este estudio se centra en el desarrollo de una metodología de unión que permita ensamblar piezas reales fabricadas por FDM en PLA. El objetivo final es que usuarios particulares sean capaces de crear piezas que por sus dimensiones o características no pueden ser impresas directamente, pero que se pueden dividir en diferentes secciones para ser unidas al introducirlas ensambladas en un horno convencional. Además, las piezas ensambladas de esta forma pueden usarse en ámbitos donde el uso de adhesivos químicos se encuentre restringido, como en prótesis quirúrgicas donde el PLA está siendo actualmente empleado debido a su biocompatibilidad.

La Figura 7 muestra dos ejemplos de las líneas seguidas para el diseño de uniones reales en PLA. Por un lado, uniones tipo cola de milano, donde son las propias piezas las que, mediante su geometría, restringen la dirección de los esfuerzos principales, en tanto que el tratamiento térmico garantiza su adhesión trabajando a cizalladura en la dirección de ensamble. Por otro lado, uniones tipo pestaña que ya producen un enganche mecánico al ensamblarse, pero que

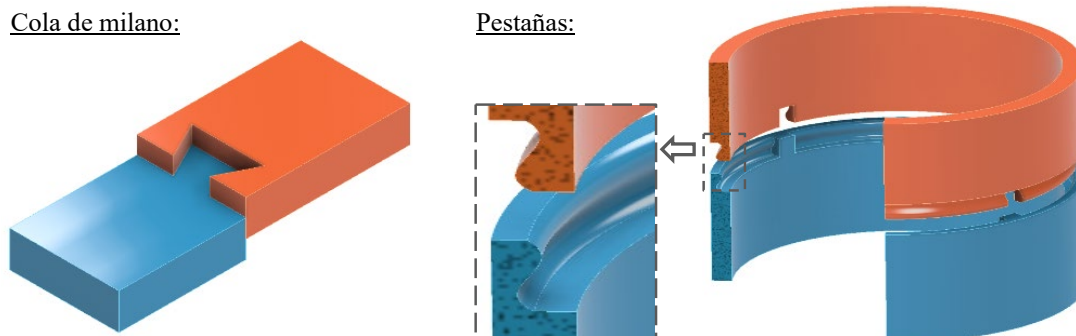


Figura 7. Dos tipos de diseños de uniones. Fuente: elaboración propia.

pueden mejorar su resistencia tras aplicar el tratamiento térmico.

La principal limitación encontrada a lo largo del desarrollo de este trabajo es la menor resistencia que presentan las probetas SLJ unidas por temperatura al ser separadas por pelado. Los trabajos futuros planteados pasan, además de por el diseño de uniones que trabajen a cizalladura, por la realización de otros tipos de ensayo, como los ensayos de flexión a 3 puntos.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen a D. Miguel Herrera Peinado por la realización de los ensayos del presente estudio, los cuales han sido ejecutados durante el desarrollo de su Trabajo Fin de Grado para la obtención del título de Graduado en Ingeniería Mecánica por la Universidad Miguel Hernández de Elche.

6. Referencias

- [1] T.D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K.T.Q. Nguyen, D. Hui. "Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges". *Compos Part B Eng*, vol. 143, pp. 172-196, 2018.
- [2] F.J. Mercado Rivera, A.J. Rojas Arciniegas. "Additive manufacturing methods: techniques, materials, and closed-loop control applications". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 109, pp. 17-31, 2020.
- [3] E.H. Tümer, H.Y. Erbil. "Extrusion-Based 3D Printing Applications of PLA Composites: A Review". *Coatings*, vol. 11, n.º 4, 390, 2021.
- [4] S.C. Albu. "Contribution Regarding the Production of PLA Products Through 3D Printing, FDM Technology, Used in the Automotive Industry". Conference paper: The 16th International Conference Interdisciplinarity in Engineering. Inter-Eng 2022. *Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 605, pp. 197-209, 2022.
- [5] D. Yagnik. "Fused deposition modeling—a rapid prototyping technique for product cycle time reduction cost effectively in aerospace applications". *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, vol. 5, pp. 62-68, 2014.
- [6] E. Rubies, J. Palacín. "Design and FDM/FFF Implementation of a Compact Omnidirectional Wheel for a Mobile Robot and Assessment of ABS and PLA Printing Materials". *Robotics*, vol. 9, n.º 2, 43, 2020.
- [7] W.J. Choi, K.S. Hwang, H.J. Kwon, C. Lee, C.H. Kim, T.H. Kim, S.W. Heo, J.H. Kim, J.Y. Lee. "Rapid development of dual porous poly(lactic acid) foam using fused deposition modeling (FDM) 3D printing for medical scaffold application". *Materials Science and Engineering: C*, vol. 110, 110693, 2020.
- [8] J.M. Chacón, M.A. Caminero, E. García-Plaza, P.J. Núñez. "Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection". *Materials & Design*, vol. 124, pp. 143-157, 2017.
- [9] R.D. Adams, W.C. Wake (1997). *Structural Adhesive Joints in Engineering*, London, UK: Chapman & Hall.
- [10] V.S. Hiremath, T. Dhilipkumar, D.M. Reddy, S. Bagewadi. "Effect of print orientation on tensile and shear properties of 3D printed lap joints". *Materials Today: Proceedings*, 2023.
- [11] Ö. Öz, & F.H. Öztürk. "An investigation on failure behaviour of bonded polylactic acid adherends produced by 3D printing process: experimental and numerical approach". *J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng*, vol. 45, 399, 2023.
- [12] V.S. Hiremath, M.D. Reddy, R.M. Reddy, J. Naveen, R.P. Chand. "Enhancing shear strength in 3D printed single lap composite joints: A multi-faceted exploration of GNP integration, print orientation, utilizing artificial neural networks, and dynamic análisis". *J Appl Polym Sci*, vol. 141, 2024.
- [13] M.G. Atahan, M.K. Apalak. "Loading-rate effect on tensile and bending strength of 3D-printed polylactic acid adhesively bonded joints". *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 36, no. 3, pp. 317-344, 2021.
- [14] M.R. Khosravani, P. Soltani, K. Weinberg, T. Reinicke. "Structural integrity of adhesively bonded 3D-printed joints". *Polymer Testing*, vol. 100, 107262, 2021.
- [15] B. Paygozar, R.M. Görgülüarslan. "Bonding Additively Manufactured PLA Materials: Effects of Joint Scarf Angle and Substrate Raster Orientation". *MATİM*, vol. 21, pp. 33-42, 2023.
- [16] M. Rajesh, R. Venkatesan, S. Kesavan et al. "Influence of 3D printed adherend design on structural performance and vibrational behaviour of adhesively bonded joints". *J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng*, vol. 46, 402, 2024.

- [17] I. Manoj, A.K. Shah, A. Jain. "Strength and failure assessments of 3D printed PLA single lap joints: Experimental and numerical analysis". *Engineering Failure Analysis*, vol. 161, pp. 108257, 2024.
- [18] M. Michalak, M.A. Boca, A. Sover. "Characterization of welding notch designs and the impact on mechanical properties of 3D-printed PLA parts joined by a 3D pen". Conference paper: Conference: 4th International Conference. Business Meets Technology, 2022.
- [19] M.S.A. Parast, A. Bagheri, A. Kami, et al. "Bending fatigue behavior of fused filament fabrication 3D-printed ABS and PLA joints with rotary friction welding". *Prog Addit Manuf*, vol. 7, pp. 1345-1361, 2022.
- [20] A.K.R. Sharma, M. Roy Choudhury, K. Debnath. "Experimental investigation of friction stir welding of PLA". *Weld World*, vol. 64, pp. 1011-1021, 2020.
- [21] I. Tamaşag, I. Beşliu-Băncescu, T.L. Severin, C. Dulucianu, D.A. Cerlincă. "Experimental Study of In-Process Heat Treatment on the Mechanical Properties of 3D Printed Thermoplastic Polymer PLA". *Polymers*, vol. 15, 2367, 2023.
- [22] S. Bhandari, R.A. Lopez-Anido, D.J. Gardner. "Enhancing the interlayer tensile strength of 3D printed short carbon fiber reinforced PETG and PLA composites via annealing". *Addit. Manuf.*, vol. 30, 100922, 2019.
- [23] N. Jayanth, K. Jaswanthraj, S. Sandeep, N. Harish Mallaya, S. Raghul Siddharth. "Effect of heat treatment on mechanical properties of 3D printed PLA". *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, vol. 123, 104764, 2021.
- [24] M. Shbanah, M. Jordanov, Z. Nyikes, L. Tóth, T.A. Kovács. "The Effect of Heat Treatment on a 3D-Printed PLA Polymer's Mechanical Properties". *Polymers*, vol. 15, n.º 6, 1587, 2023.