

Estimación numérica de las constantes elásticas de estructuras impresas en PLA y validación mediante ensayos experimentales

Adrián Arias-Blanco, Miguel Marco, Ricardo Belda, María Henar Miguélez

Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Carlos III de Madrid, España. Email: adariasb@ing.uc3m.es
mimarcoe@ing.uc3m.es rbelda@ing.uc3m.es mhmiguel@ing.uc3m.es

Resumen

La fabricación aditiva o impresión 3D mediante deposición de material fundido es una técnica de fabricación que presenta grandes ventajas, tales como la variabilidad de piezas que un mismo dispositivo puede fabricar/imprimir o la rapidez de diseño. No obstante, existe una brecha en el conocimiento del comportamiento mecánico de las estructuras impresas en 3D, dificultando la implantación de estas en el entorno industrial. En este trabajo, se pretende analizar las propiedades mecánicas de estructuras obtenidas por fabricación aditiva desde una escala mesoscópica, validando los resultados obtenidos mediante ensayos experimentales. Para ello, mediante modelos numéricos de elementos finitos y homogeneización numérica de la respuesta elástica, se obtendrán las constantes elásticas de diferentes estructuras. Además, se ha llevado a cabo la caracterización de estas estructuras mediante microtomografía computarizada, segmentación de imagen y la correlación digital de imágenes. Los resultados ponen de manifiesto la existencia de microporos que afectan al comportamiento mecánico.

Palabras clave: Impresión 3D, Homogeneización, Polímeros, Método de los Elementos Finitos, Microtomografía Computarizada de Rayos X.

Abstract

Additive manufacturing or 3D printing through fused deposition modelling is a manufacturing technique which presents considerable advantages such as the variability of the pieces which can be manufactured/printed by means of the same device or the quickness of design. Nevertheless, there is a gap in the knowledge of the mechanical behaviour of the 3D printed structures, hindering the implantation of this technology in the industrial environment. In this work, it is intended to analyse the mechanical properties of structures obtained by additive manufacturing from a mesoscopic point of view, validating the results through experimental tests. For that purpose, throughout the finite element method and a numerical homogenization technique, the elastic constants of different structures are estimated. Besides, a characterization of these structures has been carried out through a combination of microcomputed tomography, image segmentation and digital image correlation. Results highlight the presence of micropores which affects the mechanical behaviour.

Keywords: 3D printing, Homogenization, Polymers, Finite Element Method, X-ray micro-computed tomography.

1. Introducción.

La fabricación aditiva, también denominada como impresión 3D, se define de acuerdo a la norma UNE-EN ISO 52900:2022 [1] como “aquellas tecnologías que crean objetos físicos mediante la adición sucesiva de material”. Estos materiales pueden ser tanto polímeros como metales, e incluso materiales cerámicos [2] o materiales compuestos [3]. Este trabajo se centrará en la impresión 3D de materiales poliméricos, en concreto, ácido poliláctico (PLA). En este trabajo se empleará como técnica de fabricación la deposición de material fundido o FDM por sus siglas en inglés “*Fused Deposition Modelling*”.

La impresión 3D presenta atributos que le confieren ventajas sobre otros procesos de fabricación como, por ejemplo, la variabilidad y, a su vez la complejidad, de geometrías que se pueden producir con una misma impresora 3D. Sin embargo, una de las principales limitaciones es la dificultad de predecir el comportamiento mecánico de las estructuras impresas en 3D. Una de las técnicas empleadas para este propósito, la cual es objeto de estudio de este trabajo, es la homogeneización numérica de la respuesta elástica. La homogeneización es una técnica multiescalar en la cual se toma una micro- o mesoestructura, sometida a una serie de estados de carga y condiciones de contorno. Con ello se obtienen los campos de tensiones y deformaciones de dicha estructura, a partir de los cuales, se derivarán posteriormente sus constantes elásticas [4]. En relación a la geometría a analizar, se ha de tener en cuenta el concepto de elemento volumétrico representativo o RVE por sus siglas en inglés “*Representative Volume Element*” [5], que se trata de la unidad básica de una estructura que se repite de forma periódica dentro de un cuerpo.

En este trabajo, se aplicará la técnica de la homogeneización numérica para obtener las constantes elásticas efectivas de diferentes estructuras impresas en 3D para, posteriormente, validar estas propiedades mediante ensayos experimentales. Para definir con precisión la mesoestructura de las piezas impresas en 3D, se ha recurrido a la microtomografía computarizada de rayos X (micro CT) y a las técnicas de segmentación de imagen.

2. Metodología.

La metodología empleada se basa en la técnica de homogeneización numérica de la respuesta elástica, como se ha comentado anteriormente. Para la implementación de esta técnica es necesario definir la geometría de las estructuras a analizar con precisión,

que, en el caso de la impresión 3D, requiere de una caracterización de la geometría del filamento impreso.

2.1. Caracterización de las estructuras impresas.

2.1.1. Caracterización geométrica.

Debido a la deposición de material durante el proceso de impresión se tiene una cierta variación en la geometría interna de una misma estructura. Esto entra en conflicto con la naturaleza de la propia homogeneización, ya que en esta se busca un elemento volumétrico representativo. Por ello, se ha puesto un especial interés en realizar una caracterización geométrica de la sección de los filamentos impresos. Para tal propósito, se ha desarrollado un algoritmo propio implementado en MATLAB R2021b (MathWorks, Estados Unidos) para esta caracterización.

La geometría de cada filamento ya depositado se ha modelado como elipses o pseudo-elipses en trabajos anteriores [6][7]. En este trabajo se ha considerado una geometría que se adapta mejor a la forma real de las secciones impresas en 3D y que, además, optimiza el funcionamiento del algoritmo. Esta geometría, representada en la Figura 1, consiste en dos elipses de semiejes a y b con una cierta inclinación β unidas por dos segmentos tangentes, separadas por una distancia d y con una altura total h .

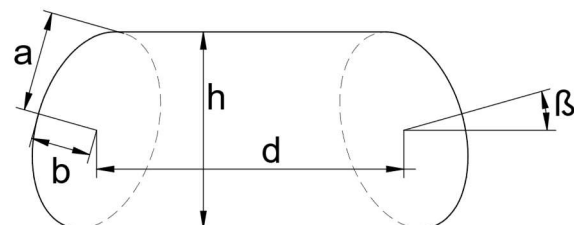


Figura 1. Geometría empleada para describir la sección de los filamentos. a : semieje mayor de la elipse. b : semieje menor de la elipse, β : ángulo de inclinación de la elipse, h : altura de filamento, d : separación entre elipses.

El algoritmo empleado para la caracterización de esta geometría parte de imágenes obtenidas a partir de escáneres microCT (voltaje: 40 kV, intensidad de corriente: 250 μ A, tamaño del píxel de la cámara: 5 μ m y tiempo de exposición: 580 ms), utilizando un escáner Skyscan 1727 (Bruker, Estados Unidos). Mediante la segmentación de imágenes e interpolación, detallado a continuación, se obtienen los parámetros característicos de la geometría anteriormente descrita (Figura 2):

1. Se parte de un escáner microCT y se segmenta este mediante una umbralización adaptativa basada en el método de Bradley [8].
2. Se realiza una detección de bordes a través del método de Canny [9], eliminando cuerpos

residuales resultado de la segmentación anterior.

3. Para separar las columnas de filamentos se utiliza el algoritmo de agrupamiento DBSCAN [10].
4. Una vez se tienen separadas las columnas se han de separar los propios filamentos entre sí. Para ello se emplea un algoritmo propio que se basa en buscar máximos y mínimos locales.
5. La interpolación de las elipses se lleva a cabo mediante el método de Ahn [11].

Como resultado de estos procesos se obtienen los semiejes de las elipses interpoladas y el ángulo de inclinación de forma directa a través del método de Ahn. Finalmente, midiendo las distancias entre elipses, tanto verticales como horizontales, se obtiene la altura de capa y la distancia entre elipses, respectivamente.

2.1.2. Caracterización mecánica del material empleado.

El material empleado es ácido poliláctico (PLA) producido por la empresa 3DGence (3DGence, Polonia). La caracterización de este material se ha realizado mediante 6 ensayos de tracción utilizando como referencia la norma ISO 527-1:2020 [12] en una máquina de ensayo universal electromecánica Instron 3366 (Instron, Estados Unidos).

La medición de los desplazamientos se ha realizado mediante un extensómetro de pinzas y mediante la técnica de correlación digital de imágenes (DIC por sus siglas en inglés *Digital Image Correlation*). Esta técnica se ha implementado a través del software MultiDIC [13] y dos cámaras digitales (Nikon D3300, 24 megapíxeles).

Cabe destacar que, con el fin de obtener unas propiedades del filamento más fidedignas se ha tenido en cuenta la porosidad real de las probetas, ya que debido al propio proceso de impresión 3D pueden existir cavidades en la sección transversal de las probetas empleadas para la caracterización mecánica (Figura 3).

Para realizar esta corrección se ha determinado la porosidad real a través de medidas utilizando micro CT y técnicas de segmentación de imagen. A través de esto, se ha obtenido una porosidad del 7%, lo que lleva a un factor de corrección de las propiedades mecánicas de 0.93.

2.2. Homogeneización de propiedades elásticas.

La homogeneización de las propiedades elásticas de las estructuras estudiadas se ha llevado a cabo siguiendo una metodología numérica ampliamente utilizada en la literatura [14].

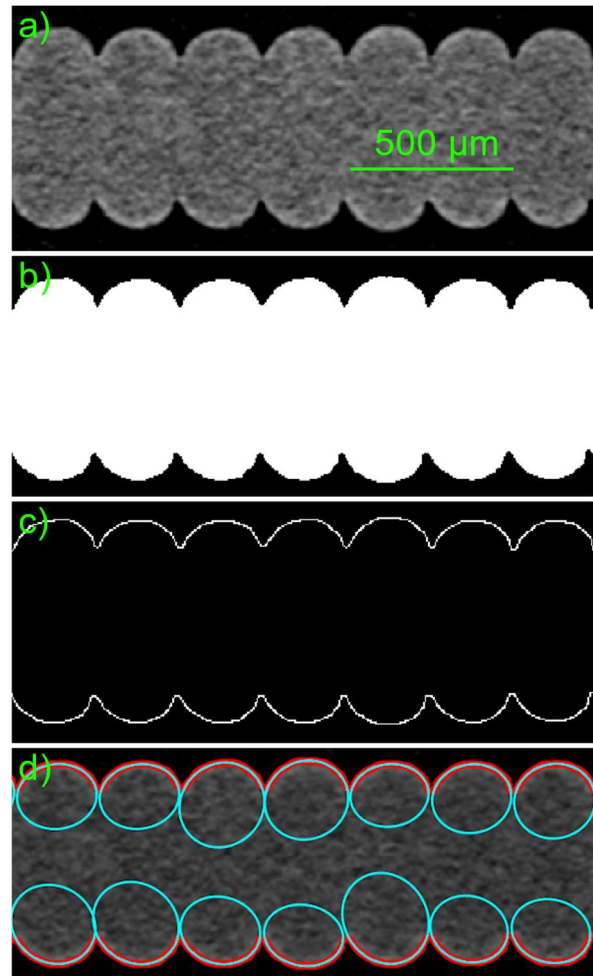


Figura 2. Caracterización geométrica de las secciones de los filamentos impresos en 3D. a) Escáner microCT de varios filamentos apilados en una columna. b) Segmentación del escáner. c) Detección de bordes y limpieza de imagen. d) Interpolación de elipses de las secciones.

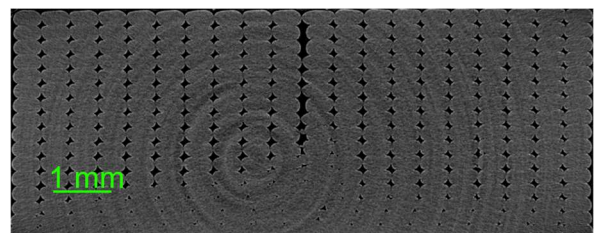


Figura 3. Sección transversal de las probetas de tracción utilizadas en la caracterización mecánica. Nótese los huecos presentes en la sección.

Este método consiste en calcular la matriz de rigidez C que relaciona el vector de tensiones, σ , con el vector de deformaciones, ϵ , a través de la ecuación constitutiva de Lamé – Hooke (ecuaciones (1) y (2)).

$$\sigma = C\epsilon \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & \dots & C_{16} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{61} & \dots & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{zz} \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Para el cálculo de esta matriz C se somete al RVE a 6 estados de deformación unitarios como los mostrados en la Figura 4. A través de cada uno de estos estados de carga se obtiene la columna correspondiente de la matriz C . Una vez que se tiene la matriz C las constantes elásticas se obtienen a partir de la matriz de flexibilidad S , ecuación (3), y las ecuaciones (4 – 12).

$$[S] = [C]^{-1} \quad (3)$$

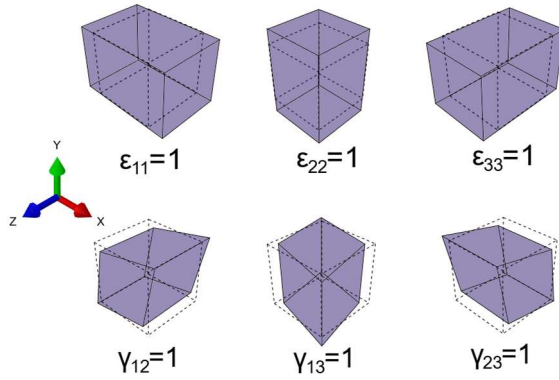


Figura 4. Esquema de los estados de deformación a los que se somete el RVE durante el proceso de homogeneización numérica.

$$E_x = 1/S_{11} \quad (4)$$

$$E_y = 1/S_{22} \quad (5)$$

$$E_z = 1/S_{33} \quad (6)$$

$$G_{xy} = 1/S_{66} \quad (7)$$

$$G_{xz} = 1/S_{55} \quad (8)$$

$$G_{yz} = 1/S_{44} \quad (9)$$

$$\nu_{xy} = -E_x \cdot S_{12} \quad (10)$$

$$\nu_{xz} = -E_z \cdot S_{13} \quad (11)$$

$$\nu_{yz} = -E_y \cdot S_{23} \quad (12)$$

Siendo E el módulo de Young, G el módulo de cizalladura y ν el coeficiente de Poisson.

Para aplicar al RVE los estados de carga correspondientes se ha empleado el método de los elementos finitos. Empleándose para el mallado elementos tetraedros cuadráticos (código C3D10 en Abaqus). Los modelos están formados por un total de, aproximadamente, 350000 elementos.

2.3. Validación experimental del proceso de homogeneización.

Para la validación del modelo numérico se ha realizado ensayos de tracción con varias probetas tipo *dog-bone* con una densidad relativa de impresión del 25% como la mostrada en la Figura 5.

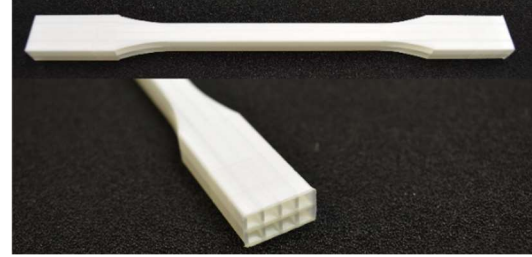


Figura 5. Probeta tipo *dog-bone* con una densidad relativa de impresión del 25% empleada para la validación del proceso de homogeneización.

En lo que al modelo numérico en sí se refiere, en este caso, se ha modelado únicamente la sección prismática cuadrangular de la misma. Esto se ha realizado ya que es la región de interés de la probeta en la cual se realizan las mediciones y, además, con ello se reduce el número de elementos necesarios y se optimizan los recursos de simulación. La geometría simulada es la mostrada en la Figura 6 y consta de dos materiales. El material interior, color azul, tiene las propiedades para la densidad del 25% obtenidas mediante homogeneización, tratándose de un material ortótropo con un comportamiento elástico lineal. El material exterior, color gris oscuro, tiene las propiedades del filamento de PLA, tratándose de un material isótropo y homogéneo con un comportamiento elástico lineal.

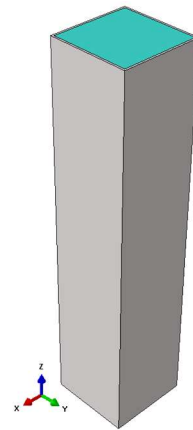


Figura 6. Geometría empleada para reproducir mediante elementos finitos el ensayo de tracción con probetas con una densidad relativa de impresión del 25%. En azul la región con las propiedades del modelo homogeneizadas, en gris la región con propiedades del filamento de PLA.

El motivo de esta elección viene dado por la propia idiosincrasia de la homogeneización. En la Figura 7 se muestra un escáner microCT de la sección transversal de la región de interés de la probeta de tracción de la Figura 5. En azul se indica el RVE para esta densidad, mientras que en rojo se muestra una región del material que no se incluye en la homogeneización ya que escapa a la repetición periódica de este RVE. Por lo tanto, esta región que escapa a la homogeneización se introduce en el modelo numérico como una sección de PLA con las propiedades del filamento.

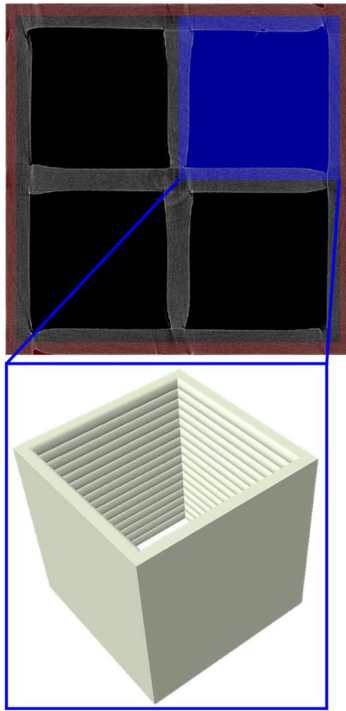


Figura 7. Escáner Micro CT de la sección de la región de interés de la probeta a tracción. En azul se indica el RVE seleccionado para la densidad del 25%. En rojo se indica el material que no puede ser abarcado en la homogeneización.

A la hora de elegir la anchura de esta región de PLA se ha tenido en cuenta el concepto de “región portante de carga relativa” [15]. Este concepto tiene en cuenta que en la unión entre diferentes capas la región que soporta la carga tiene un ancho inferior al de la sección total del filamento, correspondiéndose este con el ancho de la unión entre filamentos, tal y como se muestra en la Figura 8. Por lo tanto, se ha tomado como anchura de esta región la mitad de la magnitud d mostrada en la Figura 1, ya que esta es una medida representativa de la región portante de carga relativa.

En lo que al resto del modelo se refiere se han empleado elementos octaedros (código C3D8R en Abaqus) y condiciones de contorno que reproducen una tracción pura. Empleándose en los modelos, aproximadamente, 370000 elementos.

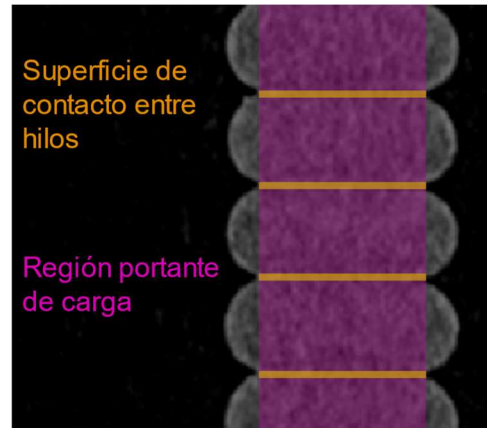


Figura 8. Columna de filamentos apilados. En naranja se muestra la superficie de contacto entre filamentos y en morado la región portante de carga.

3. Resultados.

3.1. Caracterización geométrica de la sección del filamento impreso.

Para la caracterización geométrica se ha aplicado el algoritmo descrito en la sección 2.1.1 sobre probetas con diferente densidad relativa de impresión con el fin de obtener unos parámetros característicos únicos para el modelo. En este trabajo se han analizado las siguientes densidades relativas de impresión: 25%, 50%, 75% y 100%. El asterisco (*) indica que cuando se habla de una densidad relativa de impresión del 100% es una densidad teórica definida durante la impresión, que no se alcanza con los parámetros de impresión utilizados, la densidad real es, aproximadamente, del 86 %, medido mediante microCT y segmentación de imagen. No obstante, por simplicidad, esta densidad se denominará como 100%. Los parámetros obtenidos son los que se muestran en la Tabla 1. Cabe destacar que en el caso del ángulo β este se ha establecido como 0° . Esto se explica en base a su alta desviación estándar, i.e. alta dispersión de datos, y al hecho de que la magnitud $2a$ sea igual a la altura del filamento, h , lo cual apoya esta simplificación.

Tabla 1. Parámetros geométricos obtenidos para describir las secciones de los filamentos.

Parámetro	Media	Desviación estándar
a [mm]	0.13	0.016
b [mm]	0.11	0.018
β [°]	0	52.607
h [mm]	0.26	0.090
d [mm]	0.41	0.009

Fuente: elaboración propia.

3.2. Caracterización mecánica del material.

Mediante lo expuesto en la sección 2.1.2 se han obtenido las curvas tensión-deformación de los ensayos a tracción (Figura 9) y las propiedades mecánicas mostradas en la Tabla 2. Estas propiedades reflejan la influencia de la porosidad real en el módulo de Young del filamento. Para el cálculo del módulo de Young se ha empleado la extensometría, mientras que para el cálculo del coeficiente de Poisson se ha empleado la correlación digital de imágenes.

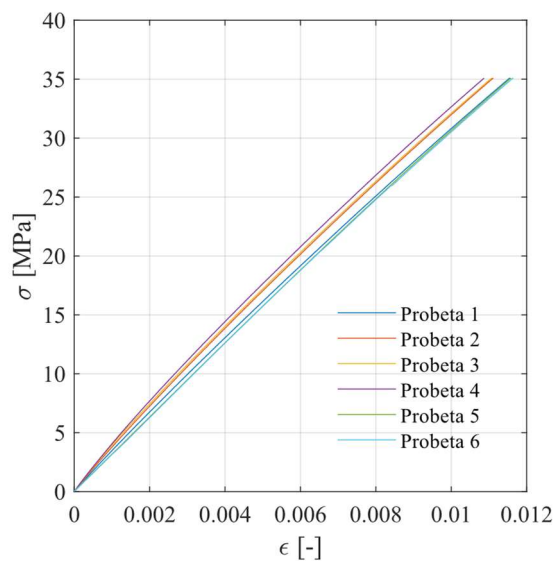


Figura 9. Gráfica tensión (σ) – deformación (ϵ) de los ensayos realizados para la caracterización del PLA. Mediciones de deformación realizadas a través de extensómetro.

Tabla 2. Propiedades mecánicas obtenidas para el PLA empleado en este trabajo, teniendo en cuenta el factor de corrección de 0.93.

Módulo de Young (filamento), E [MPa]	3299.22
Módulo de Young (probeta), E [MPa]	3076.19
Coefficiente de Poisson, ν [-]	0.33

Fuente: elaboración propia.

3.3. Homogeneización.

Se han creado modelos de homogeneización para las 4 densidades relativas de impresión analizadas en el trabajo: 25%, 50%, 75% y 100*% (Figura 10). Utilizándose como patrón de relleno el tipo *grid*.

En este proceso de homogeneización, se ha de definir el tipo de material, así como el modelo de material empleado en el RVE. En este caso se ha optado por un RVE compuesto por un material isótropo y homogéneo. En lo que al comportamiento del material

se refiere se ha optado por un comportamiento elástico lineal.

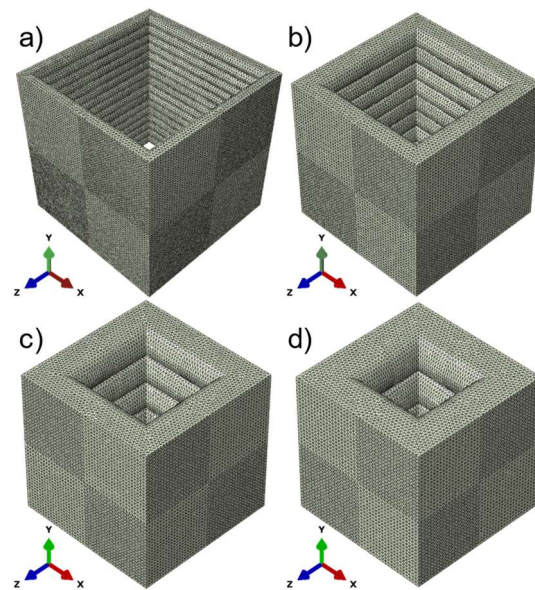


Figura 10. RVEs de las densidades relativas de impresión homogeneizadas: a) 25%, b) 50%, c) 75% y d) 100*%.

Esta elección se debe a la linealidad observada durante los ensayos (Figura 9). Además, para corroborar esto, se han realizado regresiones lineales en los intervalos especificados en la norma ISO 527-1:2020 [12] para la determinación de propiedades ($\epsilon = 0.05\% - 0.25\%$) a fin de valorar el grado de linealidad del PLA, obteniéndose en todos los casos valores de R^2 superiores a 0.99. Utilizándose de esta forma las propiedades mostradas en la Tabla 2 para los modelos numéricos. Una vez realizado este proceso de homogeneización se han obtenido las constantes elásticas mostradas en la Tabla 3.

Tabla 3. Constantes elásticas obtenidas a través del proceso de homogeneización numérica. DRI.: Densidad Relativa de Impresión.

DRI [%]	25	50	75	100*
E_x [MPa]	516.15	1024.72	1652.82	2088.54
E_y [MPa]	666.05	1276.03	1891.47	2254.26
E_z [MPa]	516.16	1024.47	1653.02	2088.62
G_{xy} [MPa]	145.75	315.01	542.14	712.30
G_{xz} [MPa]	2.53	48.67	256.83	515.58
G_{yz} [MPa]	156.79	329.42	558.69	728.88
ν_{xy} [-]	0.20	0.22	0.25	0.28
ν_{xz} [-]	0.01	0.09	0.17	0.23
ν_{yz} [-]	0.26	0.27	0.28	0.29

Fuente: elaboración propia.

3.4. Validación experimental del proceso de homogeneización.

En la Figura 11 se muestra la comparación entre los resultados del modelo numérico y los ensayos experimentales. En lo que a los ensayos experimentales se refiere se han obtenido los valores del módulo de Young mostrados en la Tabla 4, con un valor medio de 782.04 MPa y una desviación estándar de 30.58 MPa. Mientras que el modelo numérico es ligeramente más rígido, con un módulo de Young de 911.39 MPa.

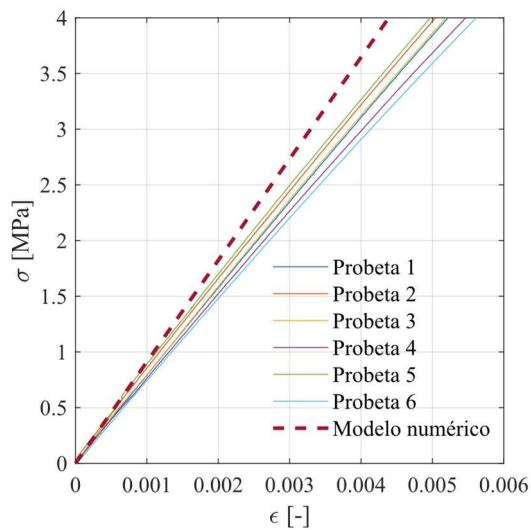


Figura 11. Gráfica comparativa entre los resultados de los ensayos de tracción de probetas tipo *dog-bone* con una densidad del 25% y el modelo numérico que reproduce el ensayo.

Tabla 4. Módulos de Young obtenidos en los ensayos experimentales para la validación experimental del proceso de homogeneización.

	E [MPa]
Probeta 1	782.43
Probeta 2	802.18
Probeta 3	783.75
Probeta 4	752.58
Probeta 5	832.05
Probeta 6	739.24

Fuente: elaboración propia.

4. Conclusiones.

Este estudio se ha llevado a cabo a fin de obtener las constantes elásticas para diferentes estructuras impresas en 3D, teniendo en cuenta las imperfecciones debidas a la deposición material en la impresión 3D.

A modo de resumen se pueden establecer las siguientes conclusiones:

- La microtomografía computarizada (micro CT) junto con las técnicas de segmentación de imagen constituyen una potente herramienta para la caracterización geométrica de estructuras impresas en 3D.
- A la hora de obtener las propiedades de probetas impresas en 3D conviene emplear un factor de corrección que tenga en cuenta la porosidad real de la misma.
- A medida que aumenta la densidad relativa de impresión generalmente aumentan linealmente los valores de las constantes elásticas.
- El proceso de homogeneización presentado en este trabajo presenta una buena agregación con los resultados experimentales, especialmente en estados de bajas deformaciones. Aunque la rigidez es ligeramente mayor en los modelos numéricos, lo cual, se puede deber a que la adhesión entre capas no ha sido considerada, y eso reduciría las propiedades elásticas.
- A la hora de aplicar la técnica de la homogeneización, en los modelos numéricos, se ha de tener en cuenta las limitaciones en cuanto a la región abarcable de esta. Siendo de gran importancia para solucionar esta limitación el concepto de región portante de carga relativa.

5. Agradecimientos.

Los autores agradecen la financiación obtenida por el Ministerio de Ciencia e Innovación a través del proyecto PID2020-112628RA-I00/ AEI / 10.13039/501100011033 y a la Comunidad de Madrid a través del proyecto IND2020/IND-17413.

6. Referencias.

- [1] I. O. for Standardization, “UNE-EN ISO 52900. Fabricación aditiva. Principios generales. Fundamentos y vocabulario.” 2022.
- [2] F. Zhang, Z. Li, M. Xu, S. Wang, N. Li, and J. Yang, “A review of 3D printed porous ceramics,” *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 42, no. 8, pp. 3351–3373, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2022.02.039>.
- [3] N. van de Werken, H. Tekinalp, P. Khanbolouki, S. Ozcan, A. Williams, and M. Tehrani, “Additively manufactured carbon fiber-reinforced composites: State of the art and perspective,” *Addit. Manuf.*, vol. 31, p. 100962, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100962>.

- [4] M. Moeini, M. Begon, and M. Lévesque, “Numerical homogenization of a linearly elastic honeycomb lattice structure and comparison with analytical and experimental results,” *Mech. Mater.*, vol. 167, p. 104210, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2022.104210>.
- [5] I. Rivet, N. Dialami, M. Cervera, M. Chiumenti, G. Reyes, and M. A. Pérez, “Experimental, Computational, and Dimensional Analysis of the Mechanical Performance of Fused Filament Fabrication Parts,” *Polymers*, vol. 13, no. 11, 2021, doi: [10.3390/polym13111766](https://doi.org/10.3390/polym13111766).
- [6] H. Gonabadi, Y. Chen, A. Yadav, and S. Bull, “Investigation of the effect of raster angle, build orientation, and infill density on the elastic response of 3D printed parts using finite element microstructural modeling and homogenization techniques,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 118, no. 5, pp. 1485–1510, 2022, doi: [10.1007/s00170-021-07940-4](https://doi.org/10.1007/s00170-021-07940-4).
- [7] E. Monaldo and S. Marfia, “Multiscale technique for the analysis of 3D-printed materials,” *Int. J. Solids Struct.*, vol. 232, p. 111173, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2021.111173>.
- [8] D. Bradley and G. Roth, “Adaptive Thresholding using the Integral Image,” *J. Graph. Tools*, vol. 12, no. 2, pp. 13–21, Jan. 2007, doi: [10.1080/2151237X.2007.10129236](https://doi.org/10.1080/2151237X.2007.10129236).
- [9] J. CANNY, “A Computational Approach to Edge Detection,” M. A. Fischler and O. B. T.-R. in C. V. Firschein, Eds. San Francisco (CA): Morgan Kaufmann, 1987, pp. 184–203.
- [10] M. Ester, H.-P. Kriegel, J. Sander, and X. Xu, “A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise,” in *Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 1996, pp. 226–231.
- [11] S. J. Ahn, W. Rauh, and H.-J. Warnecke, “Least-squares orthogonal distances fitting of circle, sphere, ellipse, hyperbola, and parabola,” *Pattern Recognit.*, vol. 34, no. 12, pp. 2283–2303, 2001, doi: [https://doi.org/10.1016/S0031-3203\(00\)00152-7](https://doi.org/10.1016/S0031-3203(00)00152-7).
- [12] International Organization for Standardization, “UNE-EN ISO 527-1. Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción. Parte 1: Principios generales.” 2019.
- [13] D. Solav, K. M. Moerman, A. M. Jaeger, K. Genovese, and H. M. Herr, “MultiDIC: An Open-Source Toolbox for Multi-View 3D Digital Image Correlation,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 30520–30535, 2018, doi: [10.1109/ACCESS.2018.2843725](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2843725).
- [14] M. Marco, R. Belda, M. H. Miguélez, and E. Giner, “Numerical analysis of mechanical behaviour of lattice and porous structures,” *Compos. Struct.*, vol. 261, p. 113292, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113292>.
- [15] J. Allum, A. Moetazedian, A. Gleadall, and V. V. Silberschmidt, “Interlayer bonding has bulk-material strength in extrusion additive manufacturing: New understanding of anisotropy,” *Addit. Manuf.*, vol. 34, p. 101297, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101297>.