

# Análisis numérico y experimental del comportamiento mecánico de sólidos celulares tridimensionales obtenidos por fabricación por filamento fundido

Marco A. Pérez<sup>1</sup>, Albert Forés-Garriga<sup>2</sup>, Manuel D. Abad<sup>3</sup>, Giovanni Gómez-Gras<sup>4</sup>

<sup>1</sup>*Applied Mechanics and Advanced Manufacturing Group, Dep. Ingeniería Industrial, IQS School of Engineering, Universitat Ramon Llull, España. Email: [marcoantonio.perez@iqs.url.edu](mailto:marcoantonio.perez@iqs.url.edu)*

<sup>2</sup>*Applied Mechanics and Advanced Manufacturing Group, Dep. Ingeniería Industrial, IQS School of Engineering, Universitat Ramon Llull, España. Email: [albertforesg@iqs.url.edu](mailto:albertforesg@iqs.url.edu)*

<sup>3</sup>*Applied Mechanics and Advanced Manufacturing Group, Dep. Ingeniería Industrial, IQS School of Engineering, Universitat Ramon Llull, España. Email: [manuel.abad@iqs.url.edu](mailto:manuel.abad@iqs.url.edu)*

<sup>4</sup>*Applied Mechanics and Advanced Manufacturing Group, Dep. Ingeniería Industrial, IQS School of Engineering, Universitat Ramon Llull, España. Email: [giovanni.gomez@iqs.url.edu](mailto:giovanni.gomez@iqs.url.edu)*

## Resumen

Las tecnologías de fabricación aditiva (AM), capaces de producir complejas geometrías con una amplia gama de materiales, han favorecido el desarrollo de los sólidos celulares, uno de los campos con mayor interés por sus numerosas aplicaciones en la industria. Estas redes interconectadas de elementos bioinspirados conforman estructuras ligeras con una excelente rigidez y resistencia. La impresión 3D de estos patrones con la tecnología de fabricación por filamento fundido (FFF) proporciona nuevos grados de libertad en el diseño de componentes, confiriendo a las estructuras finales propiedades mecánicas particulares para aplicaciones específicas. Este trabajo aborda el estudio de celdas tridimensionales de diferentes tipologías numérica y experimentalmente, demostrando que un control de los parámetros de fabricación permite producir estructuras ligeras con una amplia gama de rigidez y resistencia específicas.

**Palabras clave:** Fabricación Aditiva; Impresión 3D; Fabricación por Filamento Fundido; Sólidos Celulares; Biomimética Estructural; Propiedades Mecánicas; Análisis por Elementos Finitos; Homogenización Numérica; Celosía; Superficies Mínimas Triplemente Periódicas

## Abstract

Additive manufacturing (AM) technologies, which can produce complex geometries with a wide range of materials, have favored the development of cellular solids, one of the fields of greatest interest due to their numerous applications in multiple industry sectors. These interconnected networks of bioinspired elements form very light structures with excellent stiffness and strength. The manufacturing of these patterns with fused filament fabrication (FFF) technology provides new degrees of freedom in component design, bringing to the final structures the desired mechanical properties for specific applications. This work addresses the study of three-dimensional cells of different typologies both numerically and experimentally, proving that a control of the manufacturing parameters allows the production of lightweight structures with a wide range of specific stiffness and strength.

**Keywords:** Additive Manufacturing; 3D Printing; Fused Filament Fabrication; Cellular Solids; Structural Biomimetics; Mechanical Properties; Finite Element Analysis; Numerical Homogenization; Lattice; Triply Periodic Minimal Surfaces

## 1. Introducción

A lo largo de la última década, la fabricación aditiva (AM) se ha posicionado como uno de los principales pilares estratégicos de la Industria 4.0. El constante y acelerado desarrollo de nuevas tecnologías y materiales han favorecido su rápida consolidación e implementación en un amplio abanico de sectores industriales, como el aeroespacial o el automovilístico, ofreciendo la posibilidad de obtener piezas funcionales con una elevada complejidad geométrica, inalcanzables por los métodos de fabricación convencionales.

En ese sentido, el desarrollo de los llamados sólidos celulares se ha convertido en uno de los mayores focos de investigación en el campo de las tecnologías de AM de los últimos años [1-3]. Estas organizaciones con periodicidad geométrica se basan en el concepto de la biomimetización. Y es que las estructuras presentes en la naturaleza han evolucionado durante milenios hasta alcanzar un grado de optimización extraordinario. Hasta hace unos años, la replicación de dichas morfologías resultaba inviable debido a las técnicas de fabricación disponibles. No obstante, la impresión 3D ha abierto las puertas a la construcción de estas geometrías de elevada complejidad, con el objetivo de lograr componentes plenamente funcionales haciendo un mejor uso de los recursos y, a su vez, reduciendo el impacto medioambiental de los procesos de fabricación [4, 5].

Las propiedades finales de los sólidos celulares dependen, básicamente, de dos factores. En primer lugar, el material empleado para su fabricación condicionará directamente las propiedades químicas, físicas y mecánicas de la estructura reticular. En segundo lugar, algunos aspectos del diseño de la unidad celular, como la geometría empleada y sus dimensiones, permiten modificar ciertas características de especial importancia, como la densidad del patrón o el tamaño y la orientación de sus secciones resistentes. Así, con un adecuado control sobre estos parámetros resulta posible adaptar el comportamiento de la estructura celular a las necesidades y los requerimientos que la aplicación requiera [6-10].

De entre todas las tecnologías de AM, la fabricación por filamento fundido (FFF) destaca por ser la más accesible, económica, fácil de utilizar y razonablemente rápida. En este proceso, un filamento de material termoplástico se calienta y se extruye a través de un cabezal móvil, depositándolo en finas capas acorde con la geometría deseada. Cuando el material depositado entra en contacto con la capa inferior, éste se enfría y se solidifica, quedando adherido al volumen previamente construido. La repetición de este procedimiento permite obtener

cualquier diseño con el mismo equipo, ofreciendo mucha flexibilidad al proceso de fabricación.

Estudios previos han constatado los beneficios de esta tecnología para construir sólidos celulares bidimensionales, es decir, aquellos patrones basados en los panales hexagonales de las abejas y que presentan un plano de extrusión [11-13]. No obstante, este hecho, que puede suponer una ventaja desde el punto de vista de la fabricación ya que evita el uso y la posterior eliminación de las estructuras de soporte, confiere a estos diseños un alto nivel de anisotropía. Así, los patrones bidimensionales presentan un máximo de rigidez en la dirección perpendicular al plano de construcción, mientras que la rigidez en las otras direcciones se ve claramente comprometida [14].

Por su parte, la posibilidad de diseñar y construir sólidos celulares tridimensionales que no presenten dicho plano ha despertado el interés para fabricar componentes muy ligeros y con propiedades más homogéneas. En ese sentido, diversos autores se han centrado en explorar las capacidades de la tecnología de FFF para producir patrones tridimensionales utilizando un proceso más económico y sostenible [15-17].

La principal exigencia para la fabricación de los sólidos celulares tridimensionales se fundamenta en el grado máximo de complejidad geométrica que los caracteriza. En cuestión, la inclinación, orientación y longitud de las barras y superficies que presentan estos diseños requiere, en muchas ocasiones, la implementación de estructuras de soporte que permitan su sustentación durante la construcción de la estructura. Sin embargo, los avances en el campo del diseño para la fabricación han logrado obtener unas configuraciones tridimensionales que, basadas en expresiones matemáticas, permiten ser fabricadas por FFF sin necesidad de estructuras de apoyo [18-19]. Son las llamadas superficies mínimas triplemente periódicas (TPMS), y permiten minimizar la superficie para cubrir un volumen deseado, sin intersecciones ni discontinuidades en su curvatura, hecho que mejora sus capacidades mecánicas al reducir extraordinariamente la cantidad de concentradores de tensiones [20-23].

No obstante, quedan aún incógnitas por resolver para validar el potencial de estos patrones en aplicaciones del ámbito industrial que busquen la reducción de peso de piezas funcionales. Lo que podría convertirse en un cambio de paradigma para la fabricación de componentes ligeros en los sectores del transporte terrestre, aéreo y espacial, pasa por validar sus capacidades mecánicas atendiendo a otros aspectos relacionados con el proceso de fabricación, como la viabilidad para producir largas series y la calidad de la construcción.

Por todo ello, en esta investigación se realiza un estudio exhaustivo con diferentes sólidos celulares tridimensionales obtenidos por FFF, analizando su comportamiento mecánico a compresión y el grado de isotropía de las estructuras, abordando otros aspectos relevantes del proceso de fabricación como el tiempo requerido para la construcción de los patrones y la presencia de defectos en la deposición del material. Este estudio se ha llevado a cabo utilizando un equipo de FFF profesional, que incorpora una cámara climática que garantiza una temperatura estable durante todo el proceso de fabricación para mejorar la calidad y la resistencia de las piezas construidas. Además, los sólidos celulares han sido fabricados con un polímero técnico de altas prestaciones [24], que ofrece una alto ratio resistencia/peso, para explorar las máximas capacidades de los diseños considerados. Finalmente, se comparan los resultados obtenidos con los de dos enfoques numéricos diferentes para simular la respuesta a compresión de los patrones celulares, con el objetivo de contribuir en nuevas estrategias de diseño de componentes más ligeros y eficientes.

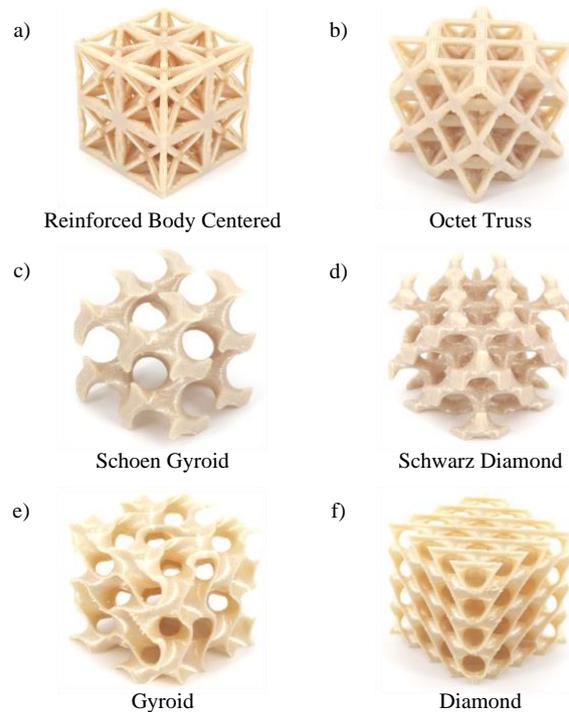
## 2. Metodología

### 2.1. Fabricación de las muestras

En este estudio se han analizado un total de 6 sólidos celulares tridimensionales (ver Figura 1) para comprender el efecto del diseño y la densidad en la calidad de la fabricación, las propiedades mecánicas y la isotropía de la estructura. Para ello, se han seleccionado patrones de morfologías del tipo *lattice* (a y b), *Skeletal-TPMS* (c y d) y *Shell-TPMS* (e y f), con el objetivo de analizar qué tipologías son las más adecuadas para ser fabricadas con la tecnología de FFF.

Para el modelado CAD de las muestras, se cubrió un volumen de 40x40x40 mm con los diferentes patrones considerados, utilizando para cada caso un total de 8 unidades celulares del mismo tamaño (20x20x20 mm). Seguidamente, dos ejemplares de cada configuración se fabricaron en un equipo industrial de FFF Fortus 400mc de Stratasys, empleando Ultem 9085 como material (PEI Ultem) [24], un polímero técnico (polieterimida) que ofrece una ratio resistencia/peso excelente, así como una resistencia química excepcional. Además, el equipo de fabricación aditiva implementado para esta investigación cuenta con una cámara de impresión calefactada que garantiza el control de la temperatura durante todo el proceso de construcción. Esta característica permite mejorar la adherencia entre las capas depositadas, incrementando la resistencia de las piezas fabricadas. En particular, la temperatura del horno se fijó en 195°C, mientras que el material seleccionado requiere una temperatura de extrusión de 380°C. En todos los casos, las muestras se fabricaron con una altura de capa de 0.254 mm. Finalmente, el tiempo necesario para la construcción de

cada patrón (ver Tabla 2) se estimó mediante el software Insight (Stratasys), utilizado para el control de los parámetros anteriores y la generación de los archivos necesarios para la fabricación de las muestras.



**Figura 1.** Sólidos celulares tridimensionales considerados para este estudio. Fuente: elaboración propia.

La complejidad geométrica de los sólidos celulares tridimensionales investigados requiere analizar la necesidad de introducir estructuras de soporte (polisulfona) para garantizar la correcta fabricación de las muestras. En el caso de los diseños seleccionados para este estudio, el uso de soportes sólo fue imprescindible para la lograr la construcción de los patrones pertenecientes a la tipología *lattice* (a y b), mientras que las morfologías *Skeletal-TPMS* y *Shell-TPMS* consideradas consiguieron ser autosoportantes durante todo el proceso de fabricación. Una vez fabricadas las muestras, se implementó un procedimiento optimizado para la eliminación de las estructuras de soporte utilizando un disolvente 20% v/v de anilina en tolueno [25, 26].

### 2.2. Análisis de microscopía

Todas las muestras se inspeccionaron con un microscopio digital de alta resolución Olympus DSX1000 para identificar posibles defectos de fabricación que pudieran condicionar sus capacidades estructurales. En concreto, se analizó la calidad de las uniones del filamento depositado tanto dentro de la misma capa de construcción (IL) como entre capas consecutivas (OL).

### 2.3. Ensayos de compresión

El comportamiento a compresión de los sólidos celulares se evaluó siguiendo el estándar ASTM C365 [27] y empleando un equipo ZwickRoell Z030 (30 kN). La velocidad del travesaño se fijó en 3 mm/min. Los ensayos se realizaron en la dirección perpendicular al plano de fabricación de las muestras y se consideraron sus dimensiones exteriores (40x40x40 mm) para el cálculo de los valores de tensión y deformación. En cada caso, se reportaron los resultados del módulo elástico y la tensión máxima alcanzada antes de que se produjese el fallo de la estructura.

### 2.4. Enfoque numérico

Para reproducir el comportamiento elástico de los diseños celulares, se han desarrollado y verificado dos estrategias numéricas implementando un modelo de elementos finitos implícito mediante el software Ansys: el modelo (a) basado en elementos sólidos (SE) y el modelo homogeneizado (b) fundamentado en elementos volumétricos representativos (H-RVE) (ver Figura 2).

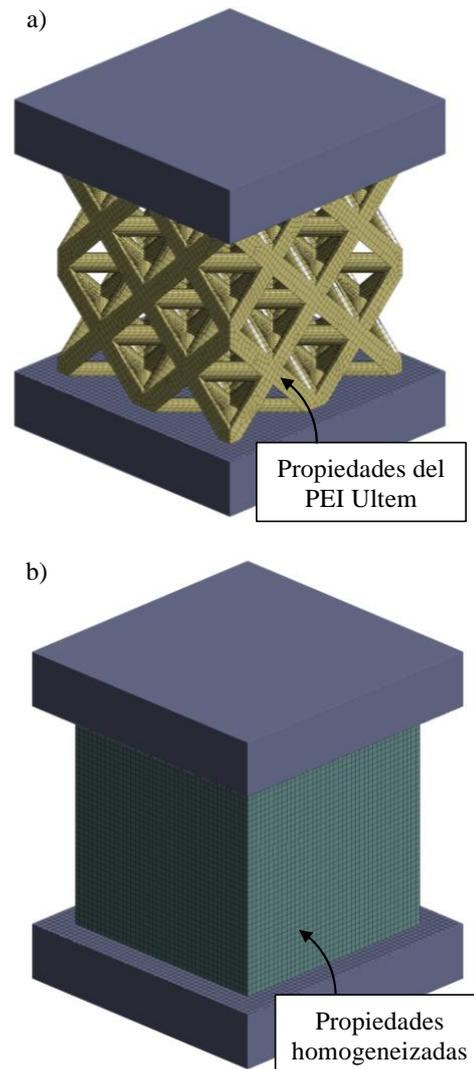
Por un lado, en el enfoque SE se ha utilizado el archivo CAD de cada patrón como modelo para la simulación. Éste ha sido mallado con elementos SOLID186 de 0.50 mm. Las propiedades mecánicas del PEI Utem (ver Tabla 1) se han adoptado de un estudio previo muy completo [28], considerando un comportamiento cuasi-isótropo del material procesado por FFF.

**Tabla 1.** Propiedades del PEI Utem utilizadas en el modelo numérico SE y la homogeneización del RVE de cada diseño.

Propiedades cuasi-isótropas del PEI Utem	
Módulo elástico $x - E_x$	2121 MPa
Módulo elástico $y - E_y$	2121 MPa
Módulo elástico $z - E_z$	2126 MPa
Coef. de Poisson $xy - \nu_{xy}$	0.344
Coef. de Poisson $yz - \nu_{yz}$	0.392
Coef. de Poisson $xz - \nu_{xz}$	0.392
Módulo a cizalla $xy - G_{xy}$	630 MPa
Módulo a cizalla $yz - G_{yz}$	741 MPa
Módulo a cizalla $xz - G_{xz}$	741 MPa

Fuente: adaptado de [28]

Por otro lado, el enfoque H-RVE presentado es una herramienta de cálculo muy eficiente desde el punto de vista computacional. Para su desarrollo, cada unidad celular fue en un inicio homogeneizada considerando condiciones de contorno periódicas para calcular el tensor de rigidez que describe el comportamiento elástico de cada patrón. Las propiedades equivalentes obtenidas se utilizaron para simular, en este caso, un volumen cúbico acorde con las dimensiones exteriores de las muestras (40x40x40 mm).



**Figura 2.** Modelos numéricos basados en elementos sólidos (a) y homogeneizado (b) para reproducir el comportamiento elástico a compresión de los sólidos celulares tridimensionales. Fuente: elaboración propia.

En ambos enfoques se introdujeron dos cuerpos rígidos en las partes superior e inferior del modelo para aplicar las condiciones de contorno de los ensayos de compresión. Se restringieron los desplazamientos y las rotaciones del plato inferior, mientras que en el plato superior se aplicó un desplazamiento de compresión de 0.1 mm en la dirección del ensayo. En la definición de los contactos entre los platos y el cuerpo del modelo, se fijó un coeficiente de fricción de 0.42 y un *Normal Stiffness Factor* (FKN) de 0.050 para reproducir la asimetría elástica inherente a las pizas fabricadas por FFF [29]. Para la solución del modelo, se empleó la formulación *Augmented Lagrange* con una tolerancia de penetración de 0.1 mm. Finalmente, la rigidez numérica de los patrones celulares se determinó a partir de la fuerza de reacción resultante en el plato de compresión superior.

## 2.5. Grado de anisotropía de los diseños celulares

El grado de anisotropía permite cuantificar la uniformidad del comportamiento mecánico de un material en todas las orientaciones del espacio. Para analizar el comportamiento de los diseños celulares, otros autores han optado por adaptar el índice de Zener [30] y el índice de anisotropía universal [31], clásicamente utilizados en el campo del análisis de la anisotropía de cristales cúbicos.

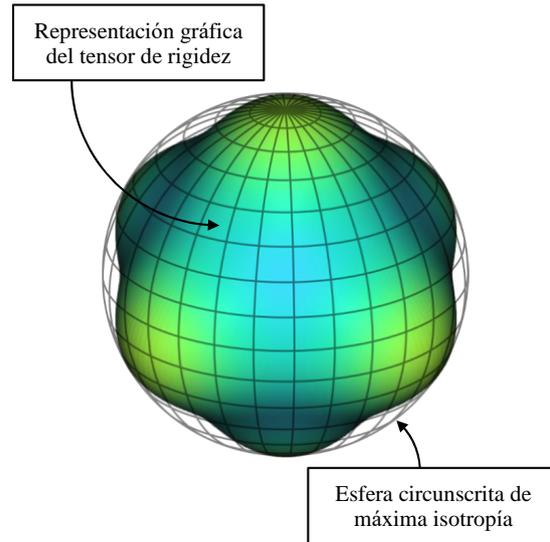
En ambos casos, el cálculo de estos índices se realiza a partir de ciertos elementos del tensor de rigidez del material. No obstante, según el parecer de los autores, la aplicación de estos procedimientos en el ámbito de la fabricación aditiva debería ser cuestionada, puesto que los componentes fabricados mediante la mayoría de las tecnologías de AM que se disponen hasta la fecha presentan una anisotropía relevante, inherente al método de construcción capa a capa. Así, al prescindir de ciertos elementos del tensor de rigidez para el cálculo de dichos índices, la anisotropía provocada por el método de fabricación no se considera completamente.

Por ello, en este trabajo se propone un nuevo procedimiento desarrollado para cuantificar el grado de anisotropía de los sólidos celulares construidos por AM. Este método se basa en la representación gráfica en el espacio tridimensional de su tensor de rigidez, calculado mediante la homogeneización numérica de las propiedades elásticas de la unidad celular (RVE). En concreto, el índice de anisotropía  $A^V$  que se presenta es el resultado de dividir el volumen de dicha representación gráfica por el de la correspondiente esfera circunscrita, que equivale a un comportamiento perfectamente isótropo (ver Figura 3). Así, en este procedimiento se implementan todos los elementos del tensor de rigidez, considerando de esta manera la anisotropía inherente al proceso de fabricación.

## 3. Resultados

### 3.1. Análisis de microscopía

La inspección de la calidad de las uniones IL y OL constata claros beneficios del uso de sólidos celulares tridimensionales frente a la fabricación de patrones bidimensionales por FFF (ver Figura 4). En estos segundos, el propio diseño de la unidad celular impide la deposición continua de material, provocando que el cabezal del equipo de AM deba realizar desplazamientos sin extruir filamento. Pese a usar un equipo profesional, las repetidas retracciones y empujes del hilo polimérico para frenar y continuar, respectivamente, con la extrusión del material conlleva que, en algunas ocasiones, las costuras puedan no ser correctamente consolidadas. Si esto ocurre, se produce un error de fabricación de tipo IL (Figura 4 – a). Estos

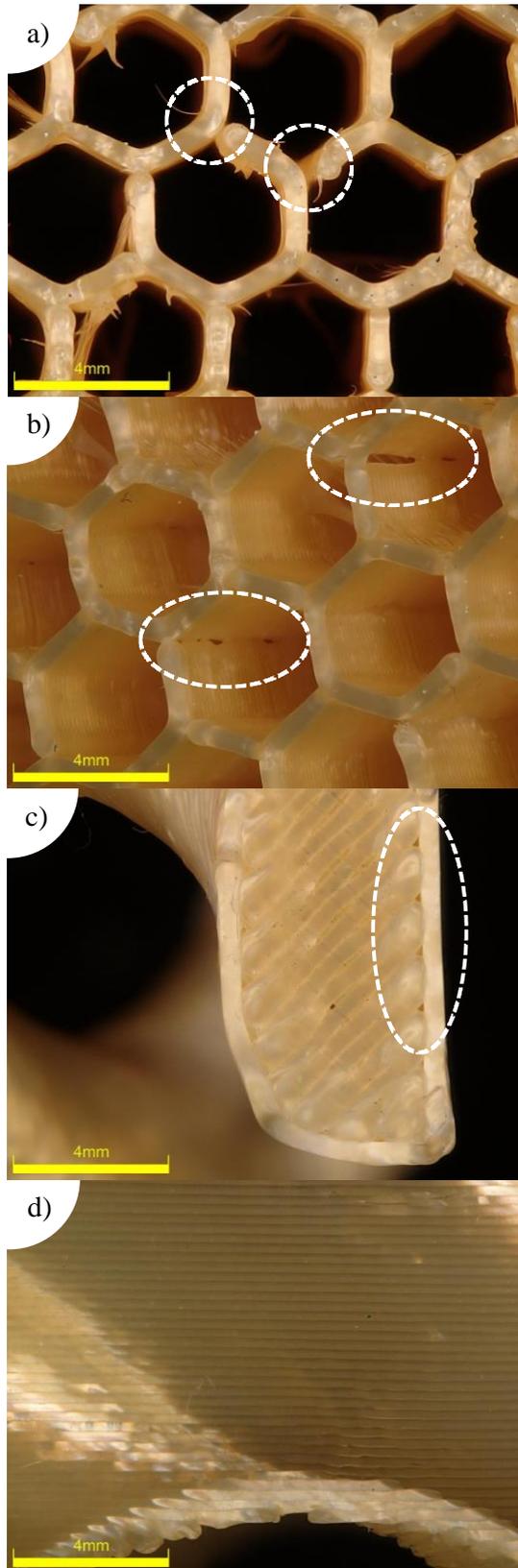


**Figura 3.** Representación volumétrica del tensor de rigidez homogeneizado del RVE del diseño *Diamond*, y su correspondiente esfera circunscrita de máxima isotropía. El cociente entre estos volúmenes corresponde al índice de anisotropía  $A^V$ . Fuente: elaboración propia.

defectos puntuales alteran la sección efectiva de las estructuras hasta el punto de originar posibles concentradores de tensiones.

Pese a modificar la ubicación de las costuras de todas las capas de fabricación de manera manual, la morfología de los diseños bidimensionales hace imposible evitar que dos capas adyacentes compartan uniones en la misma posición en el plano de construcción. En ese caso, si se origina el mismo defecto IL en múltiples capas consecutivas, se produce un error de fabricación del tipo OL (Figura 4 – b). Si esto ocurre, la conexión entre las celdas afectadas se ve significativamente alterada, pudiendo llegar a cambiar drásticamente la cinemática de la deformación de toda la estructura.

Por su parte, la tipología de los patrones tridimensionales condiciona la presencia de errores de fabricación, y para comprenderlo es necesario analizar la secuencia en la que se deposita el material. Por un lado, como los diseños tipo *lattice* y *Skeletal-TPMS* presentan barras o paredes de mayor espesor, la fabricación de cada capa empieza con la construcción de los contornos exteriores y, posteriormente, se deposita el material necesario para rellenar su interior. Este proceso puede comportar que, en ciertas ocasiones, la unión entre las trayectorias interiores y el contorno no sea perfecta y se originen pequeños defectos de tipo IL (Figura 4 – c). No obstante, en la tecnología de FFF es frecuente configurar el relleno con un desfase de  $90^\circ$  entre las capas consecutivas. De este modo, se controla que estos pequeños huecos que pueden aparecer entorno a la periferia cambien de



**Figura 4.** Defectos de fabricación IL (a) y OL (b) en patrón *Hexagonal* bidimensional. Imperfecciones en las uniones IL en tipologías *lattice* y *Skeletal-TPMS* (c) y calidad de las uniones OL en diseños *Shell-TPMS* (d).

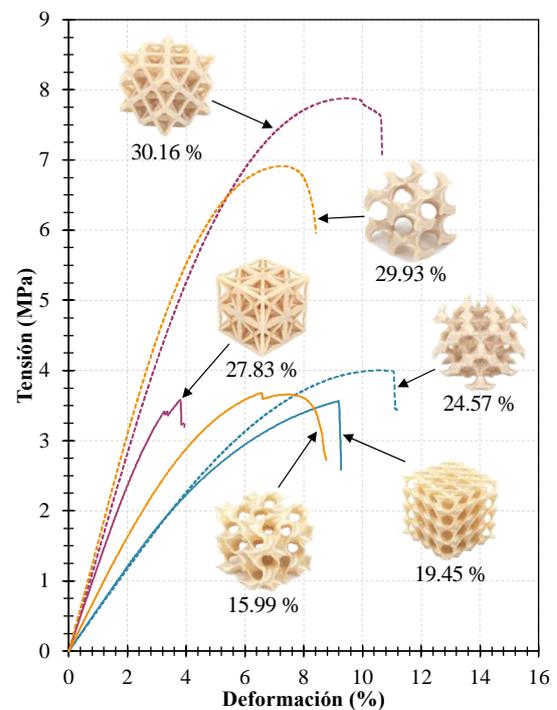
Fuente: elaboración propia.

posición entre dos capas adyacentes para evitar que se originen errores de fabricación OL, asegurando la capacidad estructural de las piezas construidas.

Pero, de entre todos los patrones analizados, cabe destacar las ventajas que ofrecen los diseños *Shell-TPMS* desde el punto de vista de la calidad de fabricación. Estas configuraciones no sólo permiten ser construidas sin requerir estructuras de soporte, sino que también sus celdas favorecen la deposición del material con trayectorias totalmente continuas (Figura 4 – d). De este modo, es el propio diseño el que evita de una forma inteligente la aparición tanto de defectos IL como, en consecuencia, de tipo OL.

### 3.2. Ensayos de compresión

En la Figura 5 se presenta una curva representativa de tensión/deformación correspondiente al ensayo de compresión de cada uno de los patrones tridimensionales considerados en este estudio. Como puede observarse, la geometría de la unidad celular tiene un impacto directo tanto en la densidad como en el comportamiento mecánico de las estructuras. En particular, los diseños *Shell-TPMS* permiten una reducción de peso superior que el resto de las morfologías si se utiliza el mismo tamaño de unidad celular. Además, el diseño geométrico de los patrones altera la distribución del material en el espacio, dando lugar a configuraciones más eficientes que otras si se analizan sus propiedades mecánicas específicas. En ese



**Figura 5.** Curvas representativas de tensión/deformación del comportamiento a compresión de los sólidos celulares tridimensionales. Densidad relativa indicada en porcentaje.

Fuente: elaboración propia.

sentido, entre las curvas representativas presentadas destaca el diseño *Shell-TPMS Diamond*, que ha exhibido una rigidez y carga máxima superior a las ofrecidas por la mayoría de las geometrías consideradas junto a una de las densidades más bajas.

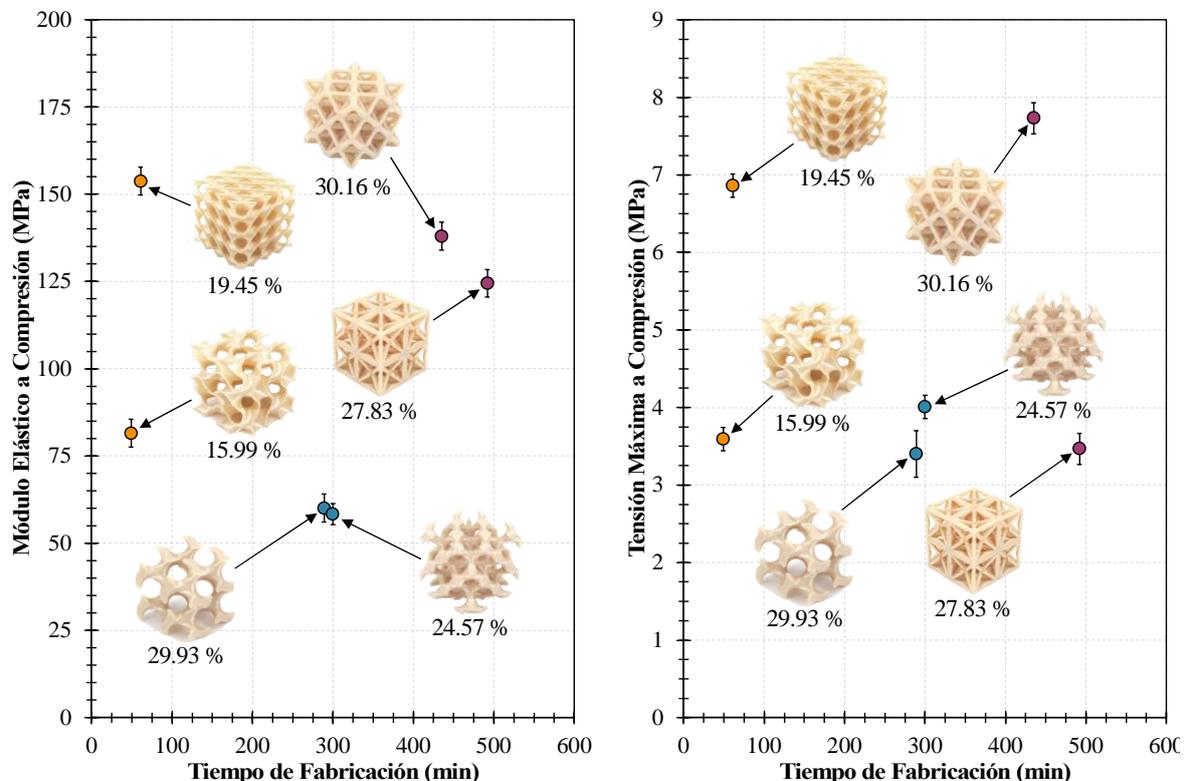
Cabe destacar que una de las particularidades más interesantes de los sólidos celulares es su capacidad para absorber importantes cantidades de energía pese a su baja densidad. Así, es habitual que aparezca una zona plana de mayor o menor extensión en la parte central de la curva tensión/deformación. En esta región, conocida como estrés de *plateau*, las celdas de la estructura se deforman sin que aumente la fuerza aplicada y, por ende, incrementa la deformación, pero no la tensión, dando lugar a esa zona llana tan característica. No obstante, los resultados de esta investigación parecen indicar que la selección de PEI Ultem como material de construcción junto a la posible presencia de algunas imperfecciones en la fabricación como las previamente analizadas, condicionan la capacidad de absorción de energía de los patrones celulares, que en la mayoría de las ocasiones presentan un tipo de rotura frágil.

En la Figura 6 se representan los resultados experimentales de módulo elástico (*izquierda*) y carga máxima (*derecha*) frente al tiempo de fabricación necesario para la construcción de las muestras

ensayadas. Los resultados manifiestan una clara ventaja de los diseños *Shell-TPMS* frente al resto de topologías desde el punto de vista de la fabricación. Su geometría optimizada para ser construíble sin requerir estructuras de soporte permite reducir el tiempo de construcción entre un 80% y un 90% comparado con el resto de los patrones *lattice* y *Skeletal-TPMS*. Además, sus diseños con curvaturas continuas reducen la presencia de concentradores de tensiones y, al mismo tiempo, son más adecuados para ser producidos por FFF ya que permiten eliminar eficazmente la presencia de imperfecciones. Por todo ello, a pesar de ser estructuras muy ligeras, el módulo elástico y la tensión máxima a compresión que consiguen los patrones *Shell-TPMS* es comparable al resto de diseños, e incluso superior a la gran mayoría de ellos.

### 3.3. Enfoque numérico

En paralelo con el análisis experimental de las capacidades de los sólidos celulares tridimensionales bajo cargas de compresión, su comportamiento elástico ha sido también investigado mediante dos enfoques numéricos. Por una parte, se ha desarrollado el modelo SE basado en elementos sólidos y, en segundo lugar, el modelo H-RVE, una alternativa simplificada que, implementando una homogeneización de las propiedades del diseño celular, es mucho más eficiente en cuanto a tiempo y recursos de cálculo.



**Figura 6.** Resultados experimentales del módulo elástico (*izquierda*) y de la tensión máxima (*derecha*) a compresión frente al tiempo de fabricación de los sólidos celulares tridimensionales. Densidad relativa indicada en porcentaje. Fuente: elaboración propia.

**Tabla 2.** Comparación de los valores experimentales de Módulo de Young con los resultados de los modelos SE y H-RVE.

Sólidos celulares tridimensionales	Tiempo de fabricación	Experimental	Modelo SE		Modelo H-RVE	
		E (MPa)	E (MPa)	$\varepsilon$ (%)	E (MPa)	$\varepsilon$ (%)
Reinforced Body Centered	492	124 ± 4	100	19.4	102	17.7
Octet Truss	435	138 ± 4	107	22.5	108	21.7
Schoen Gyroid	289	60 ± 4	68	13.3	68	13.3
Schwarz Diamond	300	58 ± 3	52	10.3	65	12.1
Gyroid	49	82 ± 4	62	24.4	63	23.2
Diamond	61	154 ± 4	132	14.3	125	18.8

Fuente: elaboración propia.

Para comparar la precisión de ambos modelos, en la Tabla 2 se presentan los valores de Módulo de Young de los respectivos diseños que han sido obtenidos del análisis experimental junto a los provenientes de ambos modelos numéricos. En cada caso, se ha calculado el error absoluto entre el resultado numérico y el valor experimental de referencia, que en ningún caso supera el 25%. Además, se ha añadido el tiempo requerido para la fabricación de cada diseño.

Como puede observarse, ambos modelos son capaces de reproducir el comportamiento elástico de los patrones celulares con suficiente precisión. No obstante, la implementación del modelo SE es imprescindible si se desea analizar la cinemática de la deformación de estas estructuras, ya que para ello es necesario contar con la geometría exacta del diseño. Así, este modelo es capaz de captar efectos locales, como posibles concentradores de tensión geométricos, pero a un coste computacional mucho más elevado. Por su parte, la utilización del modelo H-RVE permitió una reducción del tiempo de cálculo de hasta un 90%, logrando resultados de rigidez muy similares.

### 3.4. Grado de anisotropía de los diseños celulares

La homogenización numérica de las unidades celulares de los respectivos sólidos celulares tridimensionales analizados considerando condiciones de contorno periódicas ha permitido calcular el tensor de rigidez de los diferentes patrones. Su representación gráfica en el espacio se presenta en la Figura 7, donde pueden

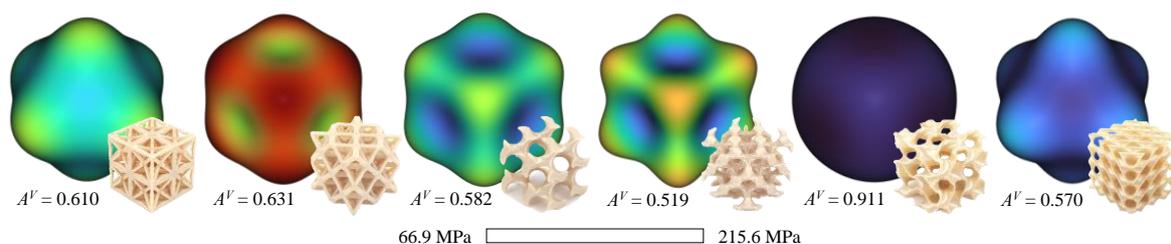
observarse las direcciones de máxima y mínima rigidez que ofrece cada uno de los diseños considerados.

La forma que adquiere esta representación tiene una relación directa con el grado de anisotropía de las estructuras. Las formas más esféricas indican un mayor grado de isotropía, mientras que si se observan salientes más pronunciados en algunas direcciones, el patrón tendrá un comportamiento más anisotrópico. Así, para cuantificar el grado de anisotropía de los diseños celulares fabricados por FFF, se ha calculado el valor del índice  $A^V$ , considerando que  $A^V = 1$  para el caso de máxima isotropía.

## 4. Conclusiones

Los resultados de esta investigación constatan las ventajas de los diseños celulares tridimensionales *Skeletal-TPMS* y *Shell-TPMS* desde el punto de vista de la fabricación por FFF. A diferencia de los patrones bidimensionales, la construcción de estas geometrías, que en ciertas ocasiones tampoco requiere de estructuras de soporte, favorece la reducción de imprecisiones de fabricación y mejora la calidad y su comportamiento estructural.

La geometría empleada tiene un impacto directo en las propiedades físicas y mecánicas. Así, aspectos como la densidad, la rigidez y la resistencia de los componentes donde éstas se empleen pueden ser debidamente configurados acorde con las necesidades para garantizar su plena funcionalidad.



**Figura 7.** Representación gráfica del tensor de rigidez de los diseños celulares tridimensionales. Su forma y la escala de colores indican la rigidez de la estructura en cada dirección del espacio. Resultados del grado de anisotropía de cada diseño calculados con el índice  $A^V$ . Fuente: elaboración propia.

En comparación con las morfologías *lattice*, los diseños *TPMS* permiten reducir el tiempo de fabricación necesario para mismos valores de densidad. Además, de entre las geometrías celulares investigadas, destaca el diseño *Shell-TPMS Diamond* con unas ratios rigidez/peso y resistencia/peso notables, y el diseño *Shell-TPMS Gyroid* por su elevado grado de isotropía.

Finalmente, las dos estrategias numéricas descritas son indicadas para reproducir el comportamiento elástico de los sólidos celulares. No obstante, el modelo SE es el único indicado para el análisis de la cinemática de deformación de los patrones con suficiente precisión, pese a comportar un coste computacional muy superior al que requiere el modelo H-RVE.

Con los resultados presentados, este trabajo pretende contribuir en el desarrollo de nuevos diseños ligeros que permitan hacer un uso más sostenible de los materiales para fabricar componentes más eficientes, todo ello aprovechando las ventajas y el potencial de las tecnologías de fabricación aditiva.

## 5. Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades a través del proyecto *New Developments in Lightweight Composite Sandwich Panels with 3D Printed Cores (3DPC)* - RTI2018-099754-A-I00; y por el *RIS3CAT Llabor 3D Community* cofinanciado por la Generalitat de Catalunya (ACCIÓ) a través del proyecto TRANSPORT COMRDI16-1-0010 (2017-2020).

## 6. Referencias

[1] L. J. Gibson, M. F. Ashby, Cellular solids - Structure and properties, 2n edition ed., *Cambridge University Press*, 1997. Disponible en: <https://doi.org/10.1017/CBO9781139878326>.

[2] Y. Liu, H. Hu, A review on auxetic structures and polymeric materials, *Sci. Res. Essays* 5 (2010) 1052–1063. Disponible en: <https://doi.org/10.5897/SRE.9000104>.

[3] N. A. Fleck, V. S. Deshpande, M. F. Ashby, Micro-architected materials: Past, present and future, *Proc. R. Soc. A* 466 (2010) 2495–2516. Disponible en: <https://doi.org/10.1098/rspa.2010.0215>.

[4] Q. Liu, R. Xu, Y. Zhou, J. Ge, S. Yuan, Y. Long, T. Shi, Metamaterials mapped lightweight structures by principal stress lines and topology optimization: Methodology, additive manufacturing, ductile failure and tests, *Mater. Design* 212 (2021) 110192. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110192>.

[5] K. Refai, M. Montemurro, C. Brugger, N. Saintier, Determination of the effective elastic properties of titanium lattice structures, *Mech. Adv. Mater. Struct.* 27 (2020) 1966–1982. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/15376494.2018.1536816>.

[6] C. Yang, Q. M. Li, Advanced lattice material with high energy absorption based on topology optimisation, *Mech. Mater.* 148 (2020) 103536. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2020.103536>.

[7] Y. Xu, D. Zhang, S. Hu, R. Chen, Y. Gu, X. Kong, J. Tao, Y. Jiang, Mechanical properties tailoring of topology optimized and selective laser melting fabricated Ti6Al4V lattice structure, *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.* 99 (2019) 225–239. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2019.06.021>.

[8] V. Caccese, J. R. Ferguson, M. A. Edgecomb, Optimal design of honeycomb material used to mitigate head impact, *Compos. Struct.* 100 (2013) 404–412. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.12.034>.

[9] L. Bai, Y. Xu, X. Chen, L. Xin, J. Zhang, K. Li, Y. Sun, Improved mechanical properties and energy absorption of Ti6Al4V laser powder bed fusion lattice structures using curving lattice struts, *Mater. Design* 211 (2021) 110140. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110140>.

[10] A. Arjunan, M. Singh, A. Baroutaji, C. Wang, Additively manufactured AISi10Mg inherently stable thin and thick-walled lattice with negative Poisson's ratio, *Compos. Struct.* 247 (2020) 112469. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112469>.

[11] J. J. Andrew, H. Alhashmi, A. Schiffer, S. Kumar, V. S. Deshpande, Energy absorption and self-sensing performance of 3D printed CF/PEEK cellular composites, *Mater. Design* 208 (2021) 109863. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109863>.

[12] S. M. Zaharia, L. A. Enescu, M. A. Pop, Mechanical performances of lightweight sandwich structures produced by material extrusion-based additive manufacturing, *Polymers* 12 (2020) 1740. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/polym12081740>.

[13] Y. Tao, L. Pan, D. Liu, P. Li, A case study: Mechanical modeling optimization of cellular structure fabricated using wood flour-filled polylactic acid composites with fused deposition modeling, *Compos. Struct.* 216 (2019) 360–365. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.03.010>.

- [14] A. Forés-Garriga, G. Gómez-Gras, M. A. Pérez, Mechanical performance of additively manufactured lightweight cellular solids: influence of cell pattern and relative density on the printing time and compression behavior, *Mater. Design* 215 (2022) 110474. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110474>.
- [15] W. Liu, H. Song, Z. Wang, J. Wang, C. Huang, Improving mechanical performance of fused deposition modeling lattice structures by a snap-fitting method, *Mater. Design* 181 (2019) 108065. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108065>.
- [16] G. Dong, G. Wijaya, Y. Tang, Y. F. Zhao, Optimizing process parameters of fused deposition modeling by Taguchi method for the fabrication of lattice structures, *Addit. Manuf.* 19 (2018) 62–72. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.11.004>.
- [17] R. Gautam, S. Idapalapati, S. Feih, Printing and characterisation of Kagome lattice structures by fused deposition modelling, *Mater. Design* 137 (2018) 266–275. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.10.022>.
- [18] O. Al-Ketan, D. W. Lee, R. Rowshan, R. K. Abu Al-Rub, Functionally graded and multi-morphology sheet TPMS lattices: Design, manufacturing, and mechanical properties, *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.* 102 (2020) 103520. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2019.103520>.
- [19] N. Sathishkumar, N. Vivekanandan, L. Balamurugan, N. Arunkumar, I. Ahamed, Mechanical Properties of Triply Periodic Minimal Surface based lattices made by Polyjet Printing, *Mater. Today: Proc.* 22 (2020) 2934–2940. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.427>.
- [20] A. Kumar, S. Verma, J.-Y. Jeng, Supportless lattice structures for energy absorption fabricated by fused deposition modeling, *3D Print Addit. Manuf.* 7 (2020) 85–96. Disponible en: <https://doi.org/10.1089/3dp.2019.0089>.
- [21] H. Jia, H. Lei, P. Wang, J. Meng, C. Li, H. Zhou, X. Zhang, D. Fang, An experimental and numerical investigation of compressive response of designed Schwarz Primitive triply periodic minimal surface with non-uniform shell thickness, *Extreme Mech. Lett.* 37 (2020) 100671. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.eml.2020.100671>.
- [22] D. Downing, A. Jones, M. Brandt, M. Leary, Increased efficiency gyroid structures by tailored material distribution, *Mater. Design* 197 (2021) 109096. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109096>.
- [23] I. Maskery, N. T. Aboulkhair, A. O. Aremu, C. J. Tuck, I. A. Ashcroft, Compressive failure modes and energy absorption in additively manufactured double gyroid lattices, *Addit. Manuf.* 16 (2017) 24–29. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.04.003>.
- [24] *Stratasys*, ULTEM™ 9085 Resin FDM® Thermoplastic Filament Fit for High-Performance Applications, Technical Report, 2021. Disponible en: <https://support.stratasys.com/en/materials/fdm/ultem-9085>.
- [25] A. Chueca de Bruijn, G. Gómez-Gras, M. A. Pérez, Selective dissolution of polysulfone support material of fused filament fabricated Ultem 9085 parts, *Polym. Test.* 108 (2022) 107495. Disponible en: <https://doi.org/10.016/j.polymertesting.2022.107495>.
- [26] A. Chueca de Bruijn, G. Gómez-Gras, M. A. Pérez, Mechanical study on the impact of an effective solvent support-removal methodology for FDM Ultem 9085 parts, *Polym. Test.* (2020) 106702. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106433>.
- [27] ASTM C365: Standard Test Method for Flatwise Compressive Properties of Sandwich Cores, Technical Report, *ASTM International*, 2016. Disponible en: [https://doi.org/10.1520/C0365\\_C0365M-16](https://doi.org/10.1520/C0365_C0365M-16).
- [28] A. Forés-Garriga, M. A. Pérez, G. Gómez-Gras, G. Reyes-Pozo, Role of infill parameters on the mechanical performance and weight reduction of PEI Ultem processed by FFF, *Mater. Design* 193 (2020) 108810. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108810>.
- [29] M. M. Pastor-Artigues, F. Roure-Fernández, X. Ayneto-Gubert, J. Bonada-Bo, E. Pérez-Guindal, I. Buj-Corral, Elastic asymmetry of PLA material in FDM-printed parts: Considerations concerning experimental characterisation for use in numerical simulations, *Materials* 13 (2020) 1–24. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/ma13010015>.
- [30] C. M. Zener, S. Siegel, Elasticity and Anelasticity of Metals, *J. Phys. Chem.* 53 (1949) 1468. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/j150474a017>.
- [31] S. I. Ranganathan, M. Ostoja-Starzewski, Universal elastic anisotropy index, *Phys. Rev. Lett.* 101 (2008) 055504. Disponible en: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.101.055504>.