

Diseño y optimización de sólidos celulares de acero inoxidable obtenidos mediante MEX

Marco A. Pérez¹, Héctor García de la Torre¹, Kevork Pérez Bustos¹, Maria C. Mera Bastidas¹,
Giovanni Gómez-Gras¹

¹Group of Applied Mechanics and Advanced Manufacturing, IQS School of Engineering, Universitat Ramon Llull, España.
Email: marcoantonio.perez@iqs.url.edu; hectorgarciat@iqs.url.edu; kevork.perez@iqs.url.edu; maria.mera@iqs.url.edu; giovanni.gomez@iqs.url.edu

Resumen

El diseño de sólidos celulares permite la creación de estructuras robustas y livianas con buena relación rigidez-peso. Dentro de estas geometrías, las estructuras gyroide destacan por presentar curvatura media nula, lo que reduce las concentraciones de tensiones y confiere buenas propiedades mecánicas. Debido a su complejidad geométrica, son necesarias tecnologías avanzadas como la fabricación aditiva (FA) para obtenerlas. Este estudio se focaliza en la fabricación y caracterización de estructuras gyroide de acero inoxidable 17-4 PH mediante extrusión de materiales (MEX). Se determinó la microestructura, porosidad, rugosidad superficial y comportamiento mecánico a compresión. Los resultados mostraron una porosidad no uniforme entre el 2.3% y 3.4%, con poros de hasta 50 μm . El gyroide con celda (L) de 10 mm y densidad relativa (DR) de 0.223 presentó los valores de tensión máxima y energía absorbida más elevados. De estos resultados se establecieron relaciones entre los defectos, las propiedades mecánicas y los parámetros L y DR.

Palabras clave: Fabricación aditiva, Acero inoxidable 17-4 PH, Extrusión de materiales, Sólidos celulares, Comportamiento mecánico.

Abstract

The design of cellular solids allows the creation of robust and lightweight structures with a good stiffness-to-weight ratio. Within these geometries, gyroid structures stand out for having zero mean curvature, which reduces stress concentrations and confers good mechanical properties. Due to their geometrical complexity, advanced technologies such as additive manufacturing (AM) are necessary to obtain them. This study focuses on the fabrication and characterization of 17-4 PH stainless steel gyroid structures by material extrusion (MEX). The microstructure, porosity, surface roughness and mechanical behavior under compression were determined. The results showed a non-uniform porosity between 2.3% and 3.4%, with pores up to 50 μm . The gyroid with a cell (L) of 10 mm and relative density (RD) of 0.223 presented the highest values of maximum stress and absorbed energy. From these results, relationships between defects, mechanical properties and L and RD parameters were established.

Keywords: Additive manufacturing, 17-4 PH stainless steel, Material extrusion, Cellular solids, Mechanical performance.

1. Introducción

El diseño de componentes más resistentes y livianos ha impulsado el desarrollo de estructuras celulares inspiradas en la naturaleza. Tal es el caso de las Superficies Mínimas Triplemente Periódicas (TPMS), que siguen un patrón celular bioinspirado con

propiedades mejoradas, gracias al efecto del tamaño y la interconectividad de sus celdas. Dichas estructuras han resultado de gran interés para la ingeniería debido a su capacidad para incrementar el rendimiento mecánico de las piezas finales [1]. Las TPMS presentan curvatura media nula en cada punto, minimizando el área localmente y reduciendo las

concentraciones de tensiones debido a su geometría suave y sin esquinas ni bordes afilados. Además, dividen el espacio en dominios entrelazados y no intersectantes que se pueden repetir periódicamente en tres dimensiones, creando materiales con refuerzos continuos e interconectados [2]. Estas propiedades resultan en una rigidez específica y axilsimétrica favorable, altas relaciones superficie-volumen y mayor capacidad de absorción de energía en comparación con estructuras convencionales de densidades similares [3].

Entre las topologías más utilizadas de TPMS se encuentran los gyroides, reconocidas por sus buenas propiedades mecánicas y bajas densidades relativas [4]. Además, sobresale por su alta capacidad de disipación de calor y resistencia a la compresión, siendo ideal para aplicaciones que requieran de una transferencia de calor eficiente [5]. Los gyroides han sido fabricados con diversos materiales como polímeros, cerámicos y metales. Las estructuras metálicas, especialmente las de acero inoxidable, ofrecen un excelente rendimiento mecánico y térmico gracias a la resistencia, ductilidad y conductividad térmica del material. También este acero proporciona buena resistencia a la corrosión y excelentes propiedades mecánicas a altas temperaturas, lo cual lo hace ideal para componentes de intercambio y disipación térmica [6].

En la última década, la fabricación aditiva (FA) ha captado una enorme atención en la comunidad científica e industrial, consolidándose como un pilar estratégico de la Industria 4.0. La FA permite la fabricación de piezas con geometrías complejas que no son posibles de obtener con técnicas de fabricación convencionales, ofreciendo flexibilidad de diseño y reducción de material de desecho. Esta tecnología es especialmente adecuada para producir estructuras TPMS, destacándose por integrar fácilmente estas topologías en aplicaciones industriales y científicas [7].

En este trabajo, se fabricaron estructuras metálicas tipo TPMS gyroide, utilizando acero inoxidable 17-4 PH como materia prima, mediante extrusión de material (MEX) como proceso de FA. La microestructura resultante, los defectos presentes, el comportamiento mecánico a compresión y la dureza fueron caracterizadas y relacionadas con los parámetros de diseño. De manera complementaria, se realizó la caracterización del filamento en términos de composición química, carga de polvo metálico y tamaño y forma de las partículas metálicas.

2. Materiales y métodos

2.1. Materiales

Como materia prima, se empleó el filamento comercial de acero inoxidable BASF Ultrafuse 17-4 PH, con un

diámetro de $1.75 \text{ mm} \pm 0.050 \text{ mm}$ y redondez de $\pm 0.050 \text{ mm}$. Este material está catalogado dentro de los aceros inoxidables endurecibles por precipitación y es conocido por su alta resistencia, tenacidad y resistencia a la corrosión [8]. De acuerdo con el fabricante, la composición química del polvo metálico es la siguiente: Cr (15-17.5%), Ni (3-5%), Cu (3-5%), Nb (0.15-0.45%), con otros elementos en proporciones menores como Mn ($\leq 1\%$), Si ($\leq 1\%$), y Fe como balance [9].

2.2. Proceso de fabricación

2.2.1. Parámetros de diseño

Según estudios de Hailu et al. [10] y Parenti et al. [11], los factores cruciales en el diseño de estructuras gyroide son la longitud de celda (L), la densidad relativa (DR) y el grosor de la pared (t), con especial énfasis en la interacción entre L y DR. Adicionalmente, ellos determinaron los límites de estos parámetros de diseño con el objetivo de fabricar estructuras garantizando la uniformidad y la minimización de defectos. La Figura 1 muestra las combinaciones de L y DR estudiadas y los resultados obtenidos tras el proceso de fabricación.

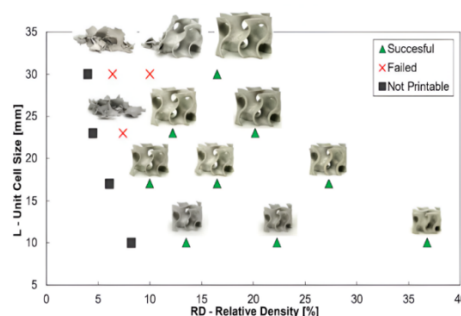


Figura 1. Resultados de aceptabilidad de impresión en el diseño de estructuras gyroide [11].

A partir de esta información, se seleccionaron rangos específicos de L (10-30 mm) y DR (6.1%-22.3%) como parámetros de diseño para la fabricación de los gyroides estudiados en este trabajo. Las combinaciones específicas se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros de diseño. Fuente: Elaboración propia.

Muestra ID	Longitud de Celda Unitaria (mm)	Densidad Relativa
S1	10	0.223
S2	10	0.135
S3	10	0.082
S4	17	0.165
S5	17	0.100
S6	17	0.067
S7	23	0.122
S8	30	0.100

2.2.2. Parámetros de impresión

Para la fabricación se utilizaron modelos CAD de estructuras gyroide creadas a partir de ecuaciones matemáticas desarrolladas en investigaciones previas [12], utilizando TPMSGen [13]. El segmentado del modelo se realizó con el software Ultimaker Cura 5.7.1 y la deposición de las estructuras se llevó a cabo en una impresora 3D MakerBot Method X equipada con un extrusor LABS GEN 2. Se empleó el filamento comercial BASF Ultrafuse® 17-4 PH como materia prima para la impresión. Los parámetros de impresión se seleccionaron teniendo en cuenta estudios previos [14] y pueden consultarse en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros utilizados en el proceso de fabricación. Fuente: Elaboración propia.

Parámetro	Magnitud	Unidad
Diámetro de boquilla	0.4	mm
Relleno	100	%
Temperatura del extrusor	235	°C
Temperatura de la cámara	80	°C
Escalado en XY	116	%
Escalado en Z	120	%
Altura de capa	0.1	mm
Velocidad de impresión	30	mm s ⁻¹

2.2.3. Desaglomerado y sinterizado

Las piezas fueron sometidas a un desaglomerado catalítico, utilizando un flujo de gas de ácido nítrico de 30 mL h⁻¹, con una concentración superior al 98%, en una atmosfera inerte de nitrógeno y a una temperatura de 120°C. El ciclo de sinterizado consistió en las siguientes etapas: calentamiento hasta 600°C con una velocidad de 5°C min⁻¹, mantenimiento a 600°C durante 1 hora seguido de un aumento a 1300°C a la misma velocidad, con una permanencia de 3 horas y un enfriamiento en el propio horno.

2.3. Caracterización del material

2.3.1. Caracterización del filamento

El aglutinante principal fue determinado mediante espectroscopia raman, utilizando un equipo Raman Thermo Scientific DXR2. La carga metálica del filamento fue estimada mediante un análisis termogravimétrico (TGA) realizado con un equipo Mettler Toledo TGA/SDTA 851 en atmósfera de nitrógeno. La morfología del polvo y la distribución del tamaño de partículas fueron caracterizados utilizando un microscopio electrónico de barrido (SEM) JEOL JSM-6460.

2.3.2. Caracterización de los gyroides

Después de la fabricación y sinterizado, los gyroides fueron sometidos a una inspección visual para detectar defectos durante la deposición. El perfil de rugosidad superficial, la porosidad y la microestructura fueron estudiadas utilizando un microscopio óptico Olympus DSX1000.

La determinación de rugosidad superficial se realizó directamente sobre los gyroides sinterizados, sin preparación adicional, de acuerdo con la norma ISO 21920-2:2021. Para el estudio microestructural y determinación de porosidad se realizó una preparación metalográfica estándar. El estudio de porosidad se llevó a cabo sobre las muestras pulidas y la cuantificación de la distribución de tamaño de poro y el porcentaje de porosidad se realizaron mediante el software ImageJ versión 1.54i. Para el estudio microestructural, dos reveladores químicos fueron utilizados con el objetivo de identificar las fases presentes. Las muestras fueron primero reveladas electroquímicamente, por inmersión, durante 120 s, en una solución acuosa de ácido oxálico al 10% y una corriente de 1 A cm⁻². Luego, fueron pulidas nuevamente y atacadas por segunda vez con un reactivo Beraha II modificado, de composición 60 mL H₂O, 30 mL HCl y 0.6 g de bisulfito de potasio.

2.3.3. Comportamiento mecánico a compresión

Se utilizó una máquina de ensayos universales marca ZwickRoell, modelo Allround table top con una carga máxima de 30 kN para estudiar el comportamiento mecánico a compresión de los gyroides. Los ensayos mecánicos fueron realizados de acuerdo con la norma ISO 13314:2011 [15].

3. Resultados y discusión

3.1. Caracterización del filamento

En la figura 2(a) se observa una imagen representativa de las partículas metálicas contenidas en el filamento. Tal y como se puede apreciar, tanto la morfología de como su distribución de tamaños es heterogénea. El polvo metálico se compone de partículas esféricas, elongadas e incluso cilíndricas. La distribución de tamaños (Figura 2(b)) revela una amplia diversidad, con diámetros de partículas que van desde unas pocas micras hasta alrededor de 91,6 µm, siendo el tamaño medio de alrededor de 10 µm.

El espectro raman del filamento reveló, con una probabilidad del 98.20%, que el aglutinante principal es polioximetileno (POM). En el espectro TGA, el inicio de pérdida de masa ocurrió a una temperatura aproximada de 250°C y continuo de forma progresiva hasta alrededor de los 435°C, donde se observó un cambio de pendiente que continuó descendiendo hasta

una temperatura de 475°C, y una masa total del 88% respecto a la masa inicial.

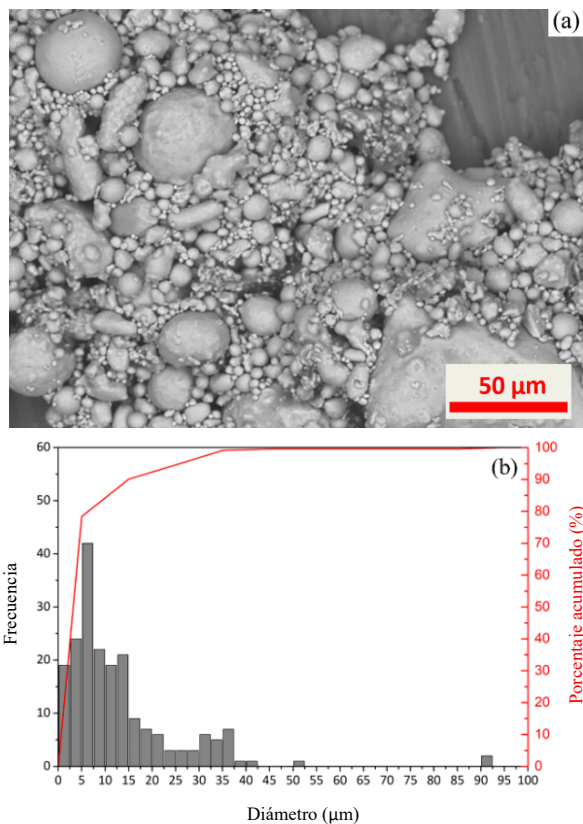


Figura 2. (a) Imagen representativa de las partículas metálicas contenidas en el filamento. (b) Distribución del tamaño de partículas del polvo metálico del filamento. Fuente: Elaboración propia.

Según estudios consultados [16,17], las partículas esféricas y uniformes son preferibles para mejorar la compactación y distribución del material. Asimismo, se ha encontrado que reducir el tamaño promedio de las partículas aumenta la carga de polvo, mejorando la compactación, reología y propiedades finales de las piezas sinterizadas [18]. En el filamento estudiado, tanto la heterogeneidad en la forma de las partículas como el amplio rango de tamaños son resultado del proceso de fabricación del polvo. Partículas irregulares y con distribuciones de tamaño amplios pueden afectar de forma negativa el proceso de deposición. Por una parte, las morfologías irregulares pueden dificultar el flujo de material a través del extrusor e incluso llegar a causar obstrucciones ocasionando defectos en las piezas fabricadas. Por otra parte, el amplio rango de tamaños de partículas puede influenciar la fluidez del material durante la deposición y, a su vez, la densidad y compactación durante el sinterizado, impactando negativamente sobre rugosidad superficial, porosidad y, consecuentemente, sobre la integridad estructural.

En la FA, el sistema de aglutinante se compone del aglutinante principal, el aglutinante secundario y una combinación de aditivos para modificar las

propiedades de este. Se ha detectado una diferencia de aproximadamente 1,8% de probabilidad de coincidencia entre el POM identificado en el filamento y el patrón de referencia, así como el cambio de pendiente observado en el espectro de TGA, que puede atribuirse a la presencia de estos aglutinantes secundarios y aditivos.

Si bien no existe un consenso respecto a la carga de polvo ideal en los filamentos, ya que esta depende de diversos factores como la morfología y tamaño de partículas, tipo de material y sistema de aglutinante, diversos estudios han reportado que la carga crítica para formulaciones polímero-polvo es de aproximadamente 70% en volumen, y que fue posible obtener contenidos de polvo de entre el 80% y 90% [19,20]. Por tanto, se podría afirmar que, con un contenido de polvo metálico del 88%, el filamento de empleado en este estudio cuenta con una alta carga metálica.

3.2. Caracterización de los gyroides

3.2.1. Observaciones generales

Tal como ya se ha anticipado, los parámetros de diseño fueron consensuados con un estudio previo [11]. Si bien estos autores utilizan MEX como tecnología para la fabricación de gyroides, el equipo empleado por ellos difiere del utilizado en este estudio. La diferencia más significativa es el tamaño de boquilla utilizado con un diámetro de 0.2 mm, comparado con el diámetro de 0.4 mm empleado en este estudio.

De los parámetros seleccionados, las estructuras identificadas como S3, S5 y S6 no pudieron ser fabricadas. En estos casos, la combinación de L y DR resultan en un grosor de pared (t) muy delgado, en el que la combinación entre la precisión de extrusión, el tamaño de boquilla de 0.4 mm y las características del polvo metálico del filamento han hecho inviable su fabricación. Por esta razón, dichas estructuras no han sido incluidas en los resultados y discusión.

3.2.2. Rugosidad Superficial

En la Figura 3 se presenta una imagen representativa de la superficie de las piezas sinterizadas. A pesar de la efectiva densificación del material y una deposición cohesiva, se observó una disposición irregular de los filamentos, especialmente en las muestras S1, S2 y S7. Esto podría explicarse igualmente, porque en estos casos también las combinaciones de L y DR arrojan grosores de pared más delgados, que suponen grandes retos para la impresión con la boquilla y filamentos utilizados.

Los resultados de las mediciones de rugosidad superficial se muestran en la Tabla 3.

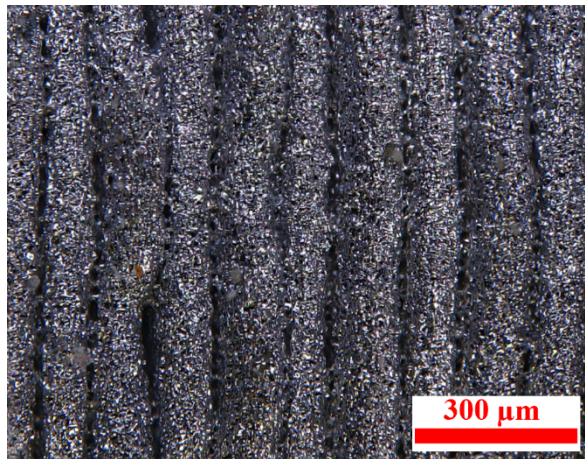


Figura 3. Imagen representativa de la superficie de las estructuras gyroide sinterizadas. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. Valores de rugosidad superficial R_a y R_z de las estructuras gyroide sinterizadas. Fuente: Elaboración propia.

Muestra ID	R_a (μm)	R_z (μm)
S1	9.73 ± 0.67	56.85 ± 7.92
S2	10.21 ± 0.53	69.75 ± 6.47
S4	11.97 ± 0.39	68.02 ± 3.56
S7	8.92 ± 0.63	50.19 ± 6.09
S8	8.87 ± 1.11	60.025 ± 7.47

Como se puede apreciar, el valor de R_a mínimo y máximo fue de $8.87 \pm 1.11 \mu\text{m}$ y $11.97 \pm 0.39 \mu\text{m}$ respectivamente. La diferencia entre las rugosidades superficiales medidas puede explicarse, en parte, por la variabilidad inherente al proceso de fabricación. Sin embargo, existe una relación entre los valores reportados y los parámetros de diseño. Las muestras S7 y S8, con los valores de R_a y R_z más bajos, corresponden a estructuras con L y DR tales que, durante la deposición, el control de extrusión del equipo permitió una deposición constante, minimizando los defectos producidos. En contraste, las muestras S2 y S4, que presentan los valores de R_a y R_z más altos, tienen unos parámetros L y DR que causan un elevado número de inicios y paradas durante la deposición y, a su vez, resultan en espesores de pared que presentan dificultades para ser extruidos por las limitaciones ya mencionadas. El caso de la estructura S2 resulta interesante, por una parte, el parámetro L de 10 mm ocasiona múltiples inicios y paradas durante la deposición, sin embargo, el espesor de pared resultante de una DR de 0.223 es suficientemente grande para minimizar el efecto de las limitaciones de extrusión, resultando en unos valores de R_a y R_z intermedios.

3.2.3. Porosidad

En este estudio se observaron diversos tipos de porosidad: por falta de fusión, por fabricación y por contracción. Tal y como se puede observar en la figura 4(a), tanto la distribución del tamaño de poro, como la

ubicación es no uniforme a lo largo de la pieza. Existen regiones donde se concentran poros de un diámetro relativamente grande, regiones con un tamaño de poro medio (dentro del rango previsto), y regiones con porosidad de tamaño reducido o sin porosidad observable.

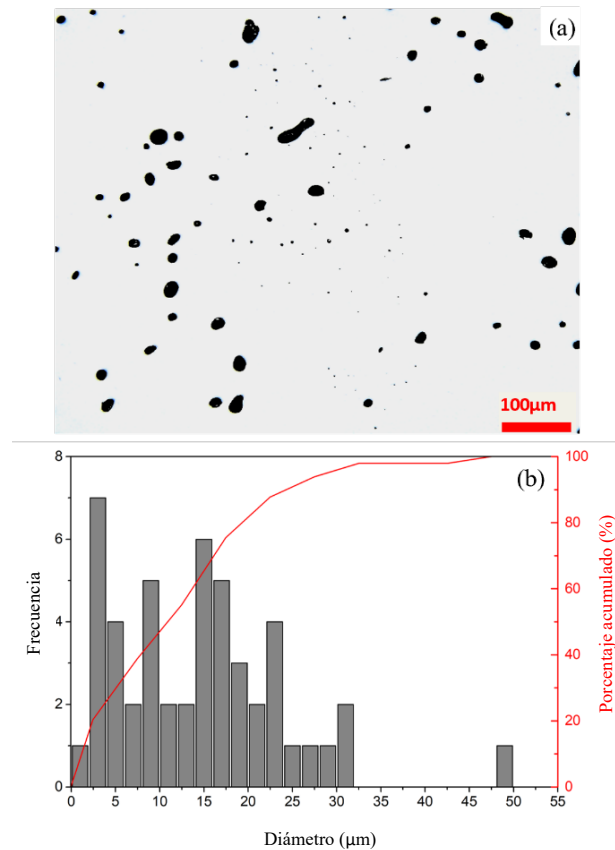


Figura 4. (a) Imagen representativa de la superficie pulida de las estructuras gyroide; los puntos negros representan porosidad. (b) Distribución del tamaño de poro. Fuente: Elaboración propia.

Un análisis más detallado reveló que las regiones con mayor tamaño de porosidad coinciden con secciones de las estructuras en las que el espesor de pared de la capa que está siendo depositada, es reducido. De manera opuesta, las regiones que presentan los tamaños de poro más reducidos o la ausencia de ellos, corresponden con regiones en las que el espesor de pared excede el tamaño de la boquilla (0.4 mm). Las regiones donde se observa un tamaño de porosidad intermedio corresponden a las zonas entre las dos previamente descritas. La ubicación preferencial de la porosidad de mayor tamaño es un indicativo de que esta es consecuencia del proceso de fabricación, más que del proceso de sinterizado. Si bien esta porosidad es mayoritariamente esférica y podría asociarse a la contracción, también podría atribuirse a defectos ocurridos durante la deposición, como falta de solape entre el relleno y el contorno, o defectos de subextrusión producidos por el espesor reducido de

pared. Las regiones que presentan porosidad de menor tamaño o ausencia de poros, indican que en las regiones donde las limitantes del diámetro de la boquilla y el proceso de extrusión no son críticos para la deposición del material, los parámetros de impresión utilizados permiten alcanzar una alta densificación durante el sinterizado.

La Figura 4(b) muestra la distribución del tamaño de poros observada en todas las piezas estudiadas. Como se puede apreciar, el diámetro de los poros va desde unas pocas micras hasta 50 μm , con frecuencias más altas en los rangos de 0-5 μm y 15-20 μm , alcanzando picos significativos alrededor de 5 μm y 15 μm . La curva acumulativa alcanza el 50% alrededor de las 12 μm , indicando que el tamaño medio de poros se encuentra alrededor de este diámetro.

El porcentaje de porosidad medido en cada estructura se puede observar en la Figura 5. Las muestras identificadas como S1 y S2 tienen los porcentajes de porosidad más altos, mientras que S4 revela una porosidad más baja, estando los valores intermedios en S7 y S8. Igual que con la rugosidad superficial, hay una relación inversa entre los parámetros de diseño L y DR y la porosidad. Varios autores han reportado para este material porcentajes de porosidad que oscilan entre 4% y 6% [21,22].

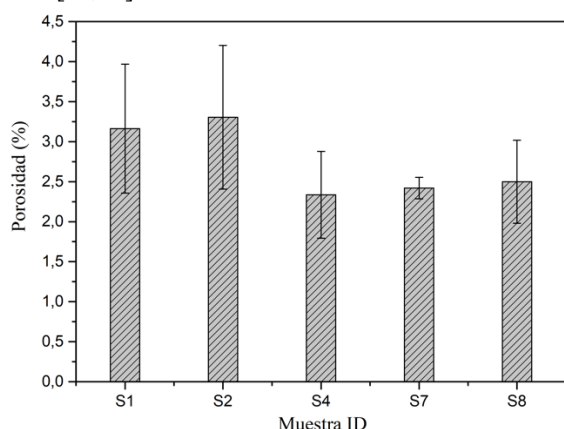


Figura 5. Porcentaje de porosidad en las piezas sinterizadas. Fuente: Elaboración propia.

Es importante considerar que, aunque los porcentajes de porosidad obtenidos son menores en comparación con los estudios mencionados, la porosidad de mayor tamaño, igual que los defectos en la superficie, pueden actuar como concentradores de tensiones, afectando la resistencia y la vida útil de las piezas.

3.2.4. Caracterización microestructural

Los patrones de difracción de rayos-X representativos de las estructuras gyroide en verde (GB) y sinterizadas (PS) se muestran en la Figura 6. En ambos patrones se observan picos característicos de la fase ferrítica (α). El difractograma de las piezas en verde muestra también

un pico a 23° atribuido al aglutinante principal y picos característicos de la austenita (γ). Típicamente, la microestructura de los aceros martensíticos como el 17-4 PH, está compuesta de ferrita delta (δ), γ -retenida y martensita (α'). Debido a su naturaleza cristalográfica, la identificación entre los diferentes tipos de ferrita y la martensita se dificulta a través de XRD [23].

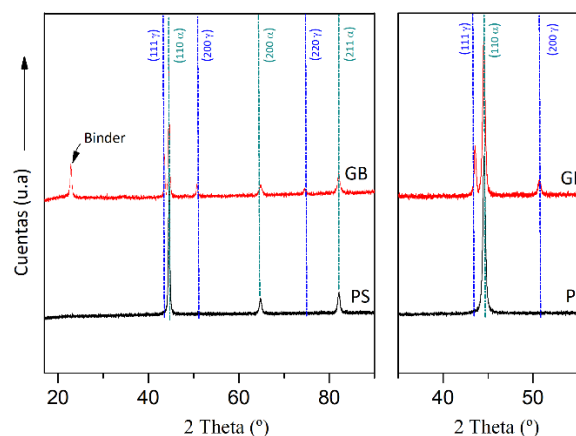


Figura 6. Patrones de difracción de rayos-X representativos de las estructuras gyroide en verde (GB) y de las estructuras gyroide sinterizadas (PS). Fuente: Elaboración propia.

En el espectro de la pieza sinterizada, se puede observar una reducción de la austenita retenida detectada en las muestras en estado verde y tras la eliminación del aglutinante. La elevada temperatura de sinterización sugiere la posible coexistencia de fases de δ -ferrita junto con la martensita [23]. El análisis de los especímenes metalográficos permitió identificar las fases presentes en el material como δ y α' . En la Figura 7(a) se puede apreciar la microestructura revelada con ácido oxálico. Esta corresponde a una morfología típica de agujas martensíticas revenidas. No se observaron orientaciones preferenciales en las agujas y no fue posible determinar los límites de grano. La figura 7(b) muestra la microestructura revelada con reactivo Beraha II modificado. Este revelador químico ataca preferencialmente la ferrita (color azul) y la martensita (color marrón); la austenita permanece de color blanco. Como se puede apreciar, la microestructura se compone de dos fases: una matriz de agujas martensíticas revenidas y ferrita delta, ubicada entre las agujas martensíticas. Si bien la microestructura observada corresponde con lo reportado en otros estudios [23,24], no se observó presencia de γ -retenida. Los resultados de XRD sugieren la eliminación de esta durante el proceso de sinterizado, pero no ha sido posible confirmarlo con esta técnica.

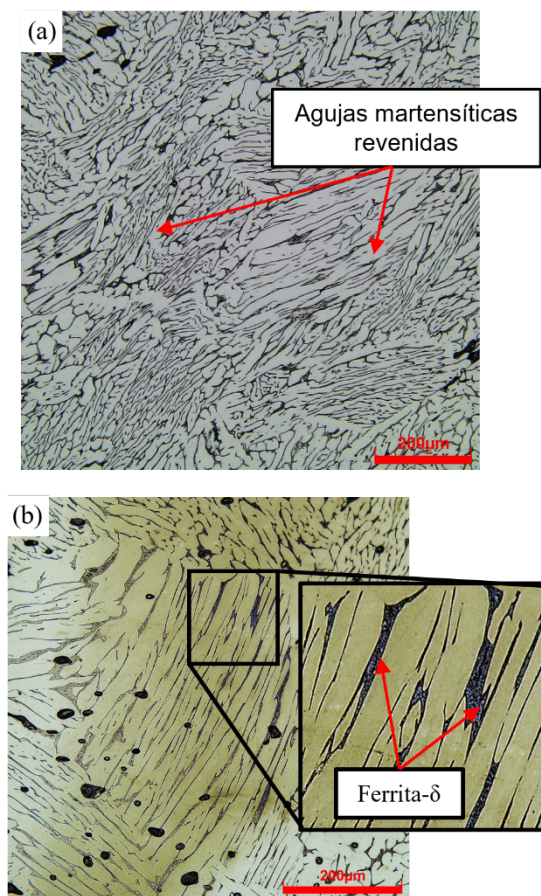


Figura 7. Microestructura de las estructuras gyroide sinterizadas revelada con (a) ácido oxálico al 10% y (b) Beraha II modificado. Fuente: Elaboración propia.

3.3. Comportamiento mecánico a compresión

En la Figura 8, se observa el comportamiento mecánico a compresión de las estructuras gyroide. S1, con valores de tensión máxima y energía absorbida de 51,67 MPa y 19,24 MJ m⁻³ respectivamente, y S4, con valores de tensión máxima y energía absorbida de 40,01 MPa y 17,11 MJ m⁻³, presentan los valores más altos encontrados en este estudio. Las estructuras S2, S7 y S8, con tensiones máximas de 22,82 MPa, 23,41 MPa y 18,44 MPa y energías absorbidas de 10,06 MJ m⁻³, 9,08 MJ m⁻³ y 8,91 MJ m⁻³ correspondientemente, presentan valores que no distan mucho entre sí.

A su vez, se graficó la energía absorbida en función de los parámetros de diseño (Figura 9). En el gráfico se aprecia que dicha energía aumenta con un incremento de DR y una disminución de L. A partir de estos resultados, se puede concluir que, para una L dada, las propiedades mecánicas aumentan de manera directamente proporcional a DR. Esto puede explicarse ya que, para una L dada, un aumento de DR implica mayor cantidad de material depositado, siendo necesarias mayores tensiones para deformar la estructura, y permitiendo una mayor absorción de energía. Sin embargo, para una DR dada, si bien el

aumento de L se traduce también en un incremento de material para mantener la DR, este incremento no es proporcional al aumento del área, y las propiedades mecánicas resultantes no serán necesariamente mejores.

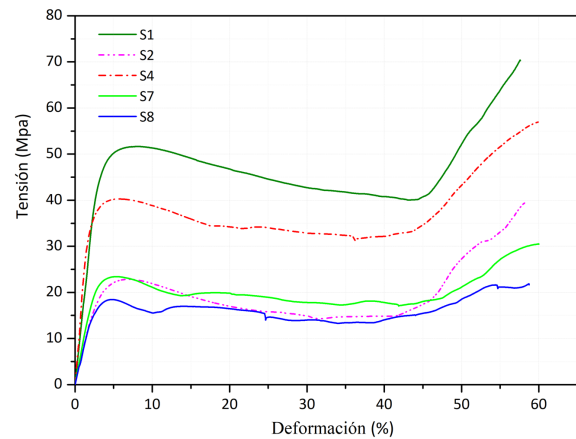


Figura 8. Curvas de tensión deformación de las estructuras sinterizadas. Fuente: Elaboración propia.

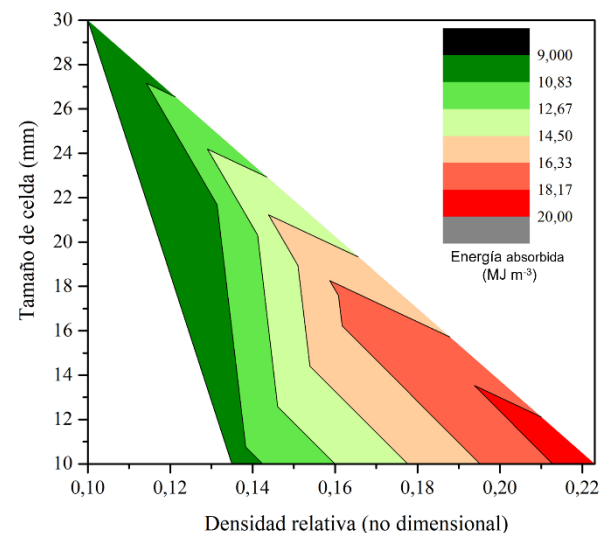


Figura 9. Energía absorbida por unidad de volumen en función de los parámetros de diseño L y DR. Fuente: Elaboración propia.

4. Conclusiones

A partir de este estudio es posible extraer las conclusiones que se enunciarán a continuación.

Es posible fabricar sólidos celulares tipo gyroide de acero inoxidable 17-4 PH utilizando la técnica MEX de fabricación aditiva, siendo la calidad de la impresión altamente dependiente del tipo y tamaño de la boquilla de extrusión, la composición del filamento empleado y la correcta combinación entre parámetros de diseño como la longitud de celda (L) y la densidad relativa (DR).

Las estructuras fabricadas fueron sometidas a análisis de porosidad, rugosidad superficial, microestructura y comportamiento mecánico a compresión. El porcentaje de porosidad medido en todas las muestras se encuentra comprendido entre el 2.3% y el 3.4% indicando que se alcanzó un alto nivel de densificación en las estructuras. La distribución no uniforme de la porosidad y los valores de rugosidad superficial obtenidos evidenciaron ser dependientes de los parámetros de diseño L y RD, las capacidades del equipo y las características del filamento.

El análisis microestructural reveló una microestructura típica de aceros inoxidables martensíticos compuesta por una matriz de agujas martensíticas revenidas y ferrita delta ubicada entre las agujas martensíticas. No se observó la presencia de austenita retenida ni orientación preferencial de los granos.

La estructura gyroide S1 reveló los valores más altos de tensión máxima y energía absorbida con magnitudes de 51,67 MPa y 19.24 MJ m⁻³, respectivamente. La estructura S8 presentó los valores más bajos de tensión máxima y energía absorbida con magnitudes de 18.44 MPa y 8.91 MJ m⁻³ respectivamente. De estos resultados se concluye que, para una L dada, existe una relación de proporcionalidad directa entre la RD y el comportamiento mecánico de las estructuras gyroide. En cambio, para un RD dada, el comportamiento mecánico depende de la combinación de parámetros L y RD y no solo de L.

5. Referencias

- [1] Y. Guo, W.F. Lu, J.Y.H. Fuh. Semi-supervised deep learning-based framework for assessing manufacturability of cellular structures in direct metal laser sintering process. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2021;32:347-359. <https://doi.org/10.1007/s10845-020-01575-0>.
- [2] H.A. Schwarz. *Gesammelte mathematische Abhandlungen*. American Mathematical Soc; 1972.
- [3] L.A. Lesmana, et al. Triply periodic minimal surface gyroid structure as effective metal hydride hydrogen storage reactor: Experimental study. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2023;42:101903. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.101903>.
- [4] C. Yan, et al. Metal alloys uniform TPMS structures. *Triply Periodic Minimal Surface Lattices Additively Manufactured by Selective Laser Melting*. Elsevier Ltd.: Amsterdam, The Netherlands; 2021:39-130.
- [5] S.V. Chernyshikhin, et al. Mechanical and thermal properties of Gyroid-based Wcu composites produced via laser powder bed fusion assisted by infiltration. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2024:106699. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2024.106699>.
- [6] P. Parenti, et al. A new solution for assessing the printability of 17-4 PH gyroids produced via extrusion-based metal AM. *Journal of Manufacturing Processes* 2022;74:557-572. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.12.043>.
- [7] I. Gibson, et al. Development of additive manufacturing technology. In: *Additive manufacturing technologies*. 2021:23-51. https://doi.org/10.1007/978-3-030-56127-7_2
- [8] J. Jones, A. Vafadar, R. Hashemi. A Review of the Mechanical Properties of 17-4PH Stainless Steel Produced by Bound Powder Extrusion. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, vol. 7, no. 5, p. 162, 2023. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/jmmp7050162>.
- [9] Forward AM. Data Sheet: Ultrafuse_17-4PH_TDS_EN_v1.1. Disponible en: https://www.forward-am.com/document/Data-Sheet-Ultrafuse_17-4PH_TDS_EN_v1.1.pdf
- [10] Y.M. Hailu, R. Tandon, M. Tripathi, H. Vo. Investigation of torsional properties of surface-and strut-based lattice structures manufactured using multiJet fusion technology. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022; p. 1-17. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s00170-022-08681-8>.
- [11] P. Parenti, et al. A new solution for assessing the printability of 17-4 PH gyroids produced via extrusion-based metal AM. *Journal of Manufacturing Processes*. 2022; vol. 74, p. 557-572. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.12.043>.
- [12] A. Forés-Garriga, H.G. de la Torre, R. Lado-Roigé, G. Gómez-Gras, M.A. Pérez. *Triply Periodic Minimal Surfaces Generator - TPMSgen*, 2023. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2023.111641>. URL: <https://github.com/albertforesg/TPMSgen>.
- [13] A. Forés-Garriga, G. Gómez-Gras, M.A. Pérez. Additively manufactured three-dimensional lightweight cellular solids: Experimental and numerical analysis. *Mater. Des.*, 226, 2023. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2023.111641>.
- [14] H.G. de la Torre, M.A. Pérez, G. Gómez-Gras. Tailored mechanical performance of fused filament fabricated 316L steel components through printing parameter optimization. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2023, vol. 128, p. 104141. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2023.104141>.

- [15] ISO 13314:2011. Metallic materials -- Compression test for porous and cellular metals -- Test method. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [16] C. Kukla, et al. Effect of particle size on the properties of highly-filled polymers for fused filament fabrication. En: AIP Conference Proceedings. AIP Publishing; 2017. Disponible en: <https://doi.org/10.1063/1.5016795>.
- [17] C. Suwanpreecha, A. Manonukul. A review on material extrusion additive manufacturing of metal and how it compares with metal injection moulding. *Metals*. 2022; vol. 12, no. 3, p. 429. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/met12030429>.
- [18] L. Ammosova, et al. Effect of metal particle size and powder volume fraction on the filling performance of powder injection moulded parts with a microtextured surface. *Precision Engineering*, 2021; vol. 72, p. 604-612. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2021.06.014>.
- [19] X. Kong, T. Barriere, J.C. Gelin. Determination of critical and optimal powder loadings for 316L fine stainless steel feedstocks for micro-powder injection molding. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012; vol. 212, no. 11, p. 2173-2182. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.05.023>
- [20] C. Kukla, et al. Effect of particle size on the properties of highly-filled polymers for fused filament fabrication. En: AIP Conference Proceedings. AIP Publishing; 2017. Disponible en: <https://doi.org/10.1063/1.5016795>.
- [21] M. Naim, et al. Taguchi DoE analysis and characterization of 17-4 PH stainless steel parts produced by material extrusion (MEX) process. *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*, 2024; vol. 8, p. 100138. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.aime.2024.100138>.
- [22] J. Gonzalez-Gutierrez, et al. Tensile properties of sintered 17-4PH stainless steel fabricated by material extrusion additive manufacturing. *Materials Letters*, 2019; vol. 248, p. 165-168. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.04.024>.
- [23] M.R. Condruz, A. Paraschiv, C. Puscasu. Heat treatment influence on hardness and microstructure of ADAM manufactured 17-4 PH. *Turbo*, 2018; vol. 1, p. 39-45.
- [24] B. Almangour, et al. Effect of processing parameters on the microstructure and mechanical properties of Co–Cr–Mo alloy fabricated by selective laser melting. *Materials Science and Engineering: A*, 2020; vol. 792, p. 139456. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139456>.