



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO **ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA POROSIDAD EN EL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LAS GEOMETRÍAS LATTICE SCHWARZ D.**

Autor: Jaime Simón Aristegui Abaitua

Director: Xavier Soldani

Directora: Eva Paz

Madrid

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
‘Análisis del efecto de la porosidad en el comportamiento mecánico de las geometrías
lattice Schwars D’

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el

curso académico 2024/25 es de mi autoría, original e inédito y

no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido
tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: Jaime Simón Aristegui Abaitua

Fecha: 22 / 07 /2025

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTORES DEL PROYECTO

Fdo.: Xavier Soldani

Fecha: X / 07 /2025

Fdo.: Eva Paz

Fecha: X / 07 /2025



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO **ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA POROSIDAD EN EL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LAS GEOMETRÍAS LATTICE SCHWARZ D.**

Autor: Jaime Simón Aristegui Abaitua

Director: Xavier Soldani

Directora: Eva Paz

Madrid

ANÁLISIS DEL EFECTO DE LA POROSIDAD EN EL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LAS GEOMETRÍAS LATTICE SCHWARZ D.

Autor: Aristegui Abaitua, Jaime Simón.

Director: Soldani, Xavier.

Directora: Paz, Eva.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

Este trabajo estudia el comportamiento mecánico de estructuras con geometría tipo Schwarz D, para tres niveles distintos de porosidad (50 %, 60 % y 70 %). Se han realizado ensayos experimentales de tracción, compresión y fatiga, y se han analizado los resultados tanto de forma directa como mediante modelos estadísticos. El objetivo ha sido evaluar cómo afecta la porosidad al rendimiento estructural.

Palabras clave: Schwarz D, porosidad, tracción, compresión, fatiga, Weibull, Wöhler.

1. Introducción

Las estructuras tipo lattice se han convertido en una alternativa prometedora en diseño estructural gracias a su alta relación resistencia-peso. Dentro de este campo, las geometrías basadas en superficies mínimas como Schwarz D permiten diseñar piezas ligeras con propiedades mecánicas interesantes.

Este proyecto se centra en analizar la influencia de la porosidad en el rendimiento mecánico de este tipo de estructuras. Para ello, se han fabricado probetas con diferentes niveles de porosidad y se han sometido a ensayos estáticos (tracción y compresión) y dinámicos (fatiga), comparando los resultados obtenidos entre los distintos grupos.

2. Definición del Proyecto

Este trabajo tiene como objetivo estudiar cómo influye la porosidad en el comportamiento mecánico de estructuras tipo Lattice Schwarz D fabricadas por impresión 3D. Estas geometrías se han investigado principalmente por su interés en aplicaciones biomédicas, ya que permiten combinar rigidez estructural y porosidad, algo clave para aplicaciones como la regeneración ósea.

El análisis se ha centrado en tres niveles de porosidad (50 %, 60 % y 70 %) y ha incluido tanto ensayos estáticos (tracción y compresión) como ensayos a fatiga. El objetivo final es entender cómo cambian las propiedades del material a medida que se incrementa la porosidad, y qué implicaciones tiene esto en su fiabilidad estructural. Además, se han empleado modelos estadísticos como Weibull para analizar la dispersión de los resultados a fatiga, con el fin de aportar una visión más completa del comportamiento del material.

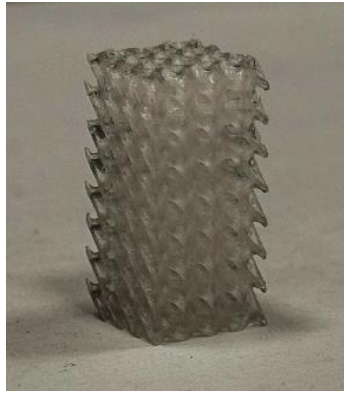


Figura 1 Probeta impresa en 3D con geometría Lattice Schwarz D

3. Descripción del modelo

Las probetas se fabricaron en resina rígida mediante impresión 3D y se dividieron según el tipo de ensayo a realizar. Las de compresión presentaban forma rectangular, mientras que las de tracción seguían una geometría en forma de "hueso de perro", más adecuada para evitar concentraciones de tensión en los extremos.

Los ensayos se llevaron a cabo en laboratorio de la universidad. En primer lugar, se realizaron ensayos estáticos para determinar propiedades mecánicas como la resistencia, la deformación a rotura y el módulo de Young, tanto en tracción como en compresión. Posteriormente, se desarrollaron ensayos a fatiga por compresión, siguiendo dos enfoques distintos: Wöhler y Weibull. El análisis de los resultados se realizó con herramientas como Excel y MATLAB, lo que permitió extraer parámetros clave como la vida característica, el parámetro de forma (b) o el índice de rendimiento a fatiga (I).

4. Resultados

En los ensayos estáticos (Figura 2) se observa una disminución progresiva de la resistencia y del módulo de Young con el aumento de la porosidad, tanto a tracción como a compresión. Por el contrario, la deformación a rotura tiende a aumentar.

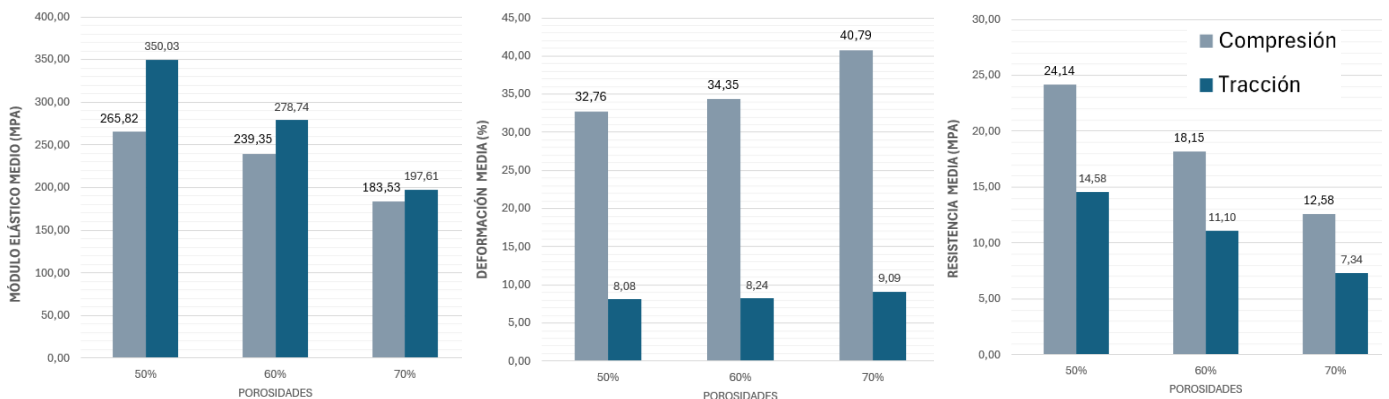


Figura 2 Comparativa de los resultados medios en tracción y compresión según la porosidad: módulo elástico, deformación a rotura y resistencia

En los ensayos a fatiga se siguieron dos métodos distintos: Wöhler y Weibull. Las curvas de Wöhler (Figura 3), que relacionan la tensión aplicada con el número de ciclos hasta la rotura, mostraron unos resultados inesperados. Las probetas con un 70 % de porosidad tuvieron, en general, un comportamiento muy similar a las del 60 %. Este resultado no era lo esperado, ya que inicialmente se pensaba que las probetas con un 70 % de porosidad rendirían peor que las del 60 %. Sin embargo, no ha ocurrido, y probablemente se deba a que las probetas de 60 % se ensayaron varios días después de su fabricación, lo que pudo afectar a sus propiedades.

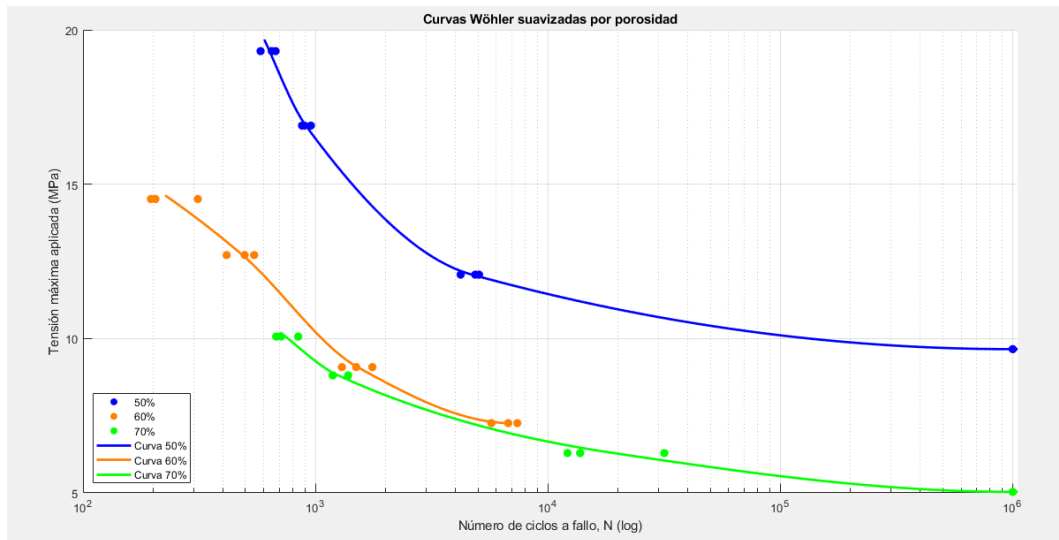


Figura 3 Curvas de Wöhler suavizadas para los tres niveles de porosidad, en función del número de ciclos a fallo (logarítmico)

Por otro lado, el análisis estadístico de Weibull (Figura 4) sí refleja la tendencia lógica: a medida que aumenta la porosidad, el comportamiento a fatiga se deteriora. Las curvas de probabilidad muestran claramente cómo disminuye la probabilidad de supervivencia con el número de ciclos en los materiales más porosos. Los parámetros obtenidos (vida mínima, vida característica, pendiente (b) e índice de rendimiento a fatiga (I)) indican que el grupo de 50 % es la mejor opción, aunque conviene mencionar que su bajo valor de b indica una mayor dispersión de los resultados. Por tanto, aunque su rendimiento medio es mejor, su fiabilidad puede no ser tan alta como esperábamos.

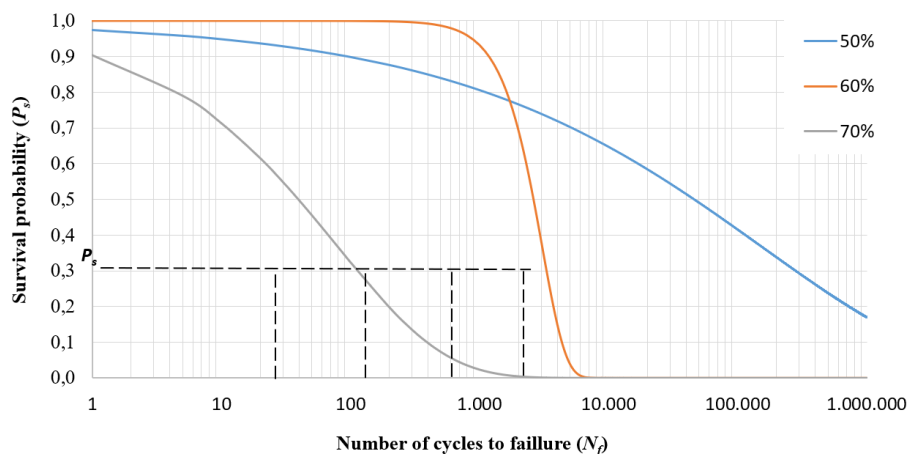


Figura 4 Curvas de probabilidad de supervivencia obtenidas con el modelo de Weibull para cada grupo de porosidad

5. Conclusiones

A lo largo del estudio se ha visto que, al aumentar la porosidad, las probetas pierden resistencia y rigidez, aunque ganan en deformabilidad antes de romper. Este comportamiento se repite tanto en tracción como en compresión, y tiene sentido si pensamos que, con más huecos, el material efectivo es menor.

En los ensayos a fatiga se aplicaron tanto el enfoque clásico de Wöhler como el modelo estadístico de Weibull. Aunque las curvas de Wöhler mostraron un comportamiento inesperado en los grupos del 60 y 70 %, los resultados de Weibull sí siguieron la tendencia esperada. El grupo del 50 % mostró el mejor rendimiento medio (índice I), aunque su bajo valor de b indica una mayor dispersión, lo que pone en duda su fiabilidad. En conjunto, el análisis ha sido útil para entender mejor cómo se comporta el material frente a cargas cíclicas y qué diferencias hay entre los distintos niveles de porosidad.

ANALYSIS OF THE EFFECT OF POROSITY ON THE MECHANICAL BEHAVIOR OF LATTICE SCHWARZ D STRUCTURES.

Author: Aristegui Abaitua, Jaime Simón.

Supervisor: Soldani, Xavier.

Supervisor: Paz, Eva.

Collaborating Institution: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

PROJECT SUMMARY

This project studies the mechanical behaviour of lattice structures with Schwarz D geometry at three different porosity levels (50%, 60% and 70%). Tensile, compression and fatigue tests were carried out, and the results were analysed both directly and using statistical models. The main goal was to evaluate how porosity affects structural performance.

Keywords: Schwarz D, porosity, tensile, compression, fatigue, Weibull, Wöhler.

1. Introduction

Lattice structures have become a promising alternative in structural design due to their high strength-to-weight ratio. In this field, geometries based on minimal surfaces like Schwarz D make it possible to create lightweight parts with interesting mechanical properties.

This project focuses on analysing how porosity affects the mechanical performance of these structures. To do so, samples with different porosities were printed and tested under static loads (tensile and compression) and dynamic loads (fatigue), comparing the results between the different groups.

2. Project Definition

The objective of this work is to study how porosity influences the mechanical behaviour of Schwarz D lattice structures made by 3D printing. These geometries are especially interesting in biomedical applications because they combine structural stiffness with porosity, which is key for bone regeneration.

The analysis focused on three porosity levels (50%, 60%, and 70%) and included both static tests (tensile and compression) and fatigue tests. The aim was to understand how material properties change as porosity increases, and what this means for structural reliability. In addition, statistical models like Weibull were used to analyse result dispersion under fatigue, offering a broader view of the material's behaviour.

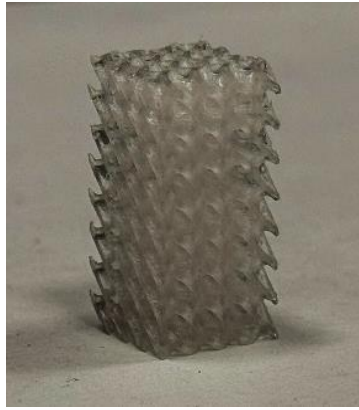


Figure 1 Specimen 3D printed with Lattice Schwarz D geometry

3. Model Description

The specimens were printed in rigid resin using 3D printing and were divided according to the type of test. Compression specimens had a rectangular shape, while the tensile ones followed a “dog bone” shape, better suited to avoid stress concentrations at the ends.

All tests were carried out in the university lab. First, static tests were done to determine mechanical properties such as strength, strain at break, and Young’s modulus, both in tension and compression. Then, fatigue tests under compression were conducted using two different methods: Wöhler and Weibull. The results were processed using tools like Excel and MATLAB, which allowed the extraction of key parameters such as characteristic life, shape parameter (b), and fatigue performance index (I).

4. Results

Static tests (Figure 2) showed a clear decrease in strength and Young’s modulus as porosity increased, both in tension and compression. On the other hand, strain at break tended to increase.

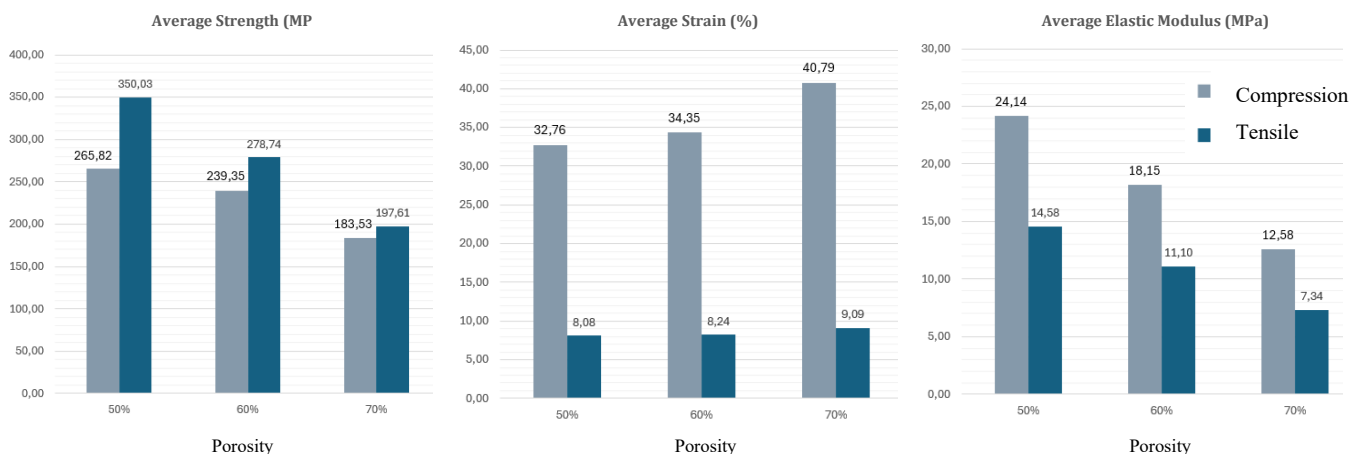


Figure 2 Comparison of average results in tension and compression by porosity level: Young’s modulus, strain at break, and strength

For fatigue tests, two approaches were used: Wöhler and Weibull. Wöhler curves (Figure 3), which relate the applied stress to the number of cycles until failure, showed some unexpected results. The 70 % porosity group performed really like the 60 % group, which was surprising. This might be explained by the delay in testing the 60 % specimens, which were tested several days after printing and may have degraded over time.

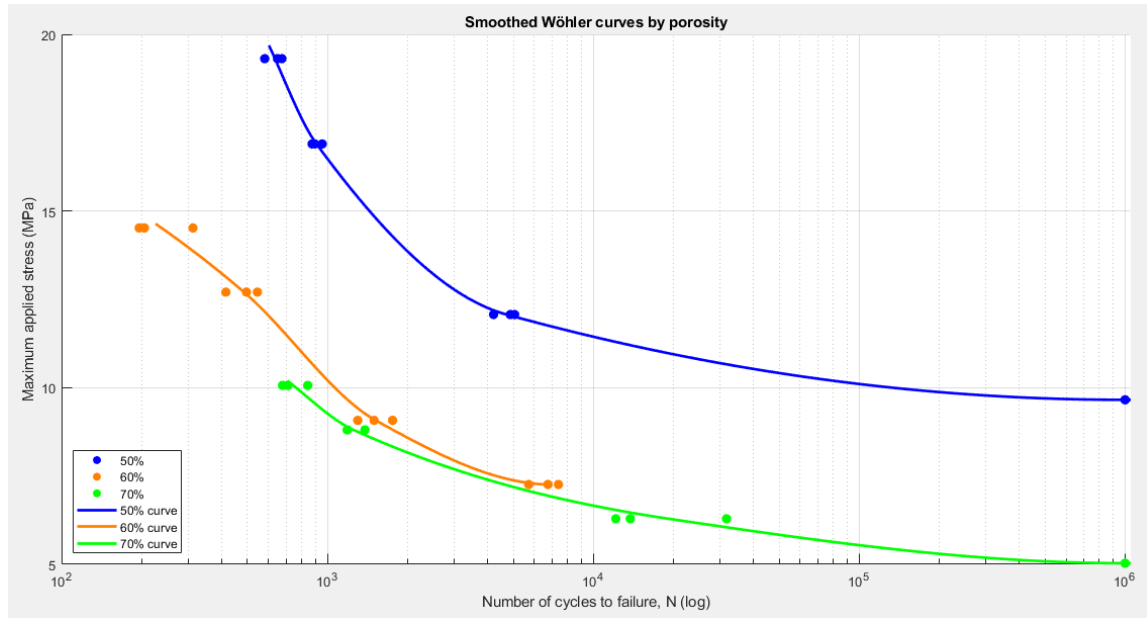


Figure 3 Smoothed Wöhler curves for the three porosity levels, based on the number of cycles to failure (logarithmic scale)

On the other hand, the Weibull (Figure 4) statistical analysis followed the expected trend: as porosity increases, fatigue performance gets worse. The probability curves clearly show how the chance of surviving more cycles drops in more porous materials. The extracted parameters (minimum life, characteristic life, shape parameter b , and fatigue performance index I) point to the 50 % group as the best-performing one. However, its low b value also means the results are more scattered, so its reliability might not be as high as it seems.

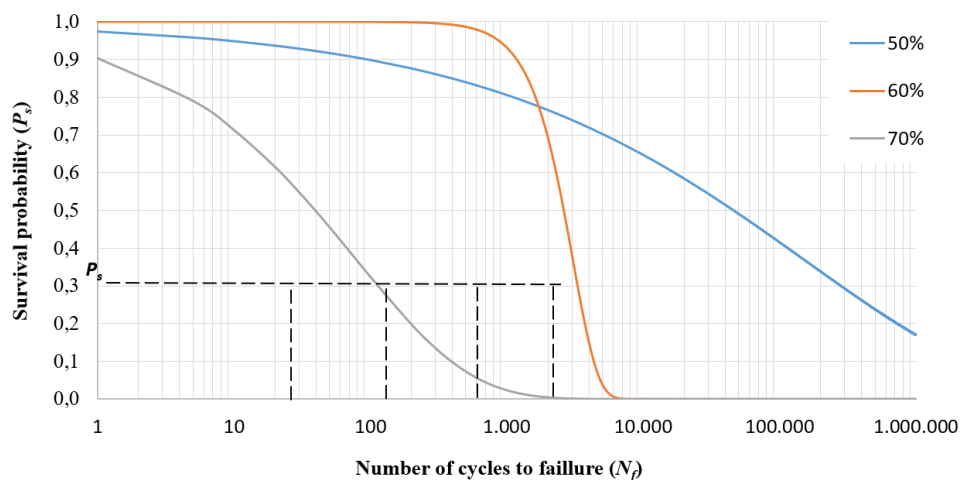


Figure 4 Probability curves from the Weibull model for each porosity group

5. Conclusions

Throughout the study, it was observed that increasing porosity causes a reduction in strength and stiffness but also leads to greater deformability before failure. This was seen in both tension and compression and makes sense if we think that more porosity means less effective material to carry loads.

For fatigue, both Wöhler curves and the Weibull model were used. While Wöhler curves showed unexpected behaviours in the 60 and 70 % groups, the Weibull results followed the expected trend. The 50 % group had the highest average performance (I index), but also the lowest b value, meaning the results were more spread out, which raises questions about its reliability. Overall, the analysis helped to better understand how the material behaves under cyclic loads and the differences between the three porosity levels.

Índice de la memoria

1. Introducción	6
2. Estado del arte	7
2.1 Introducción al Estado del Arte	7
2.2 Scaffold y regeneración ósea	7
2.3 Impresión 3D aplicada a la medicina	8
2.4 Estructuras TPMS y Schwarz D	9
2.5 Ensayos mecánicos en estructuras porosas	10
2.6 Conclusiones del Estado del Arte	11
3. Motivación, Objetivos y Planificación	12
3.1 Motivación personal y científica	12
3.2 Objetivos	14
3.3 Metodología.....	15
3.3.1 Metodología experimental.....	15
3.3.1.1 Inspección y medición de probetas.....	15
3.3.1.2 Ensayos mecánicos.....	15
3.3.1.3 Análisis de resultados.....	16
3.3.2 Planificación temporal del trabajo.....	16
4. Material y Metodología Experimental.....	17
4.1 Materiales	17
4.2 Fabricación	19
4.2.1 Diseño.....	19
4.2.2 Impresión 3D.....	21
4.3 Ensayos Mecánicos	22
4.3.1 Ensayos estáticos.....	22
4.3.2 Ensayos a fatiga	26
4.3.2.1 Ensayos Wöhler.....	27
4.3.2.2 Ensayos Weibull	28
5. Análisis de Resultados.....	31
5.1 Ensayos Estáticos	31

5.1.1 Resultados a tracción	31
5.1.2 Resultados a compresión	34
5.2 Ensayos a Fatiga	36
5.2.1 Resultados de los ensayos de Wöhler	36
5.2.2 Resultados de los ensayos de Weibull	39
6. Conclusiones y Trabajos Futuros	42
6.1 Conclusiones	42
6.2 Trabajos futuros	43
7. Bibliografía	44

Índice de figuras

<i>Figura 1 Imagen en detalle de un scaffold reticulado impreso en 3D para regeneración ósea, representando una estructura porosa biomédica adaptada anatómicamente</i>	<i>8</i>
<i>Figura 2 Ejemplos de estructuras reticuladas fabricadas mediante tecnología de impresión 3D Material Jetting (MJ): estructuras rígidas, flexibles, multimaterial, de control de ondas, jerárquicas auxéticas y funcionalmente gradadas</i>	<i>9</i>
<i>Figura 3 Representación de distintas celdas unitarias basadas en superficies mínimas triplemente periódicas (TPMS): (a) Schwarz P, (b) Schoen G, (c) Schwarz D, (d) Schoen IWP, (e) Fischer-Koch S, (f) Schoen FRD.....</i>	<i>10</i>
<i>Figura 4 Aplicación biomédica de un andamio poroso basado en geometría Lattice Schwarz D..</i>	<i>12</i>
<i>Figura 5 Imagen clínica que ilustra una intervención con fijación metálica tras fractura ósea. Este tipo de tratamientos refuerzan la necesidad de alternativas regenerativas como los scaffolds personalizados.....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 6 Diagrama de Gantt de la planificación temporal del trabajo.....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 7 Pieza impresa en 3D con resina Clear V4 utilizando tecnología SLA.....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 8 Propiedades mecánicas de la resina Clear V4. Fuente: Formlabs Material Comparison Tool</i>	<i>18</i>
<i>Figura 9 Esquema de las probetas prismáticas (10×10×20 mm) utilizadas para ensayos de compresión.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 10 Geometría de la probeta plana utilizada en los ensayos de tracción, con sección y longitud útil de 5 × 5 mm y 30 mm respectivamente.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 11 parámetros característicos a partir de los datos experimentales</i>	<i>24</i>
<i>Figura 12 Ejemplo ensayo. Compresión – Probeta 1 (porosidad 70 %). Resultados numéricos y curvas tensión-deformación</i>	<i>25</i>
<i>Figura 13 Máquina servoelectrica Instron ElectroPuls utilizada para los ensayos a fatiga</i>	<i>26</i>

<i>Figura 14 Captura de pantalla de la interfaz del programa WaveMatrix, utilizado para registrar y controlar los ensayos de fatiga realizados con la máquina Instron ElectroPuls.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 15 Ejemplo de tabla de datos para los ensayos de fatiga según el método de Wohler en probetas con un 50 % de porosidad.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 16 Ejemplo de tabla de datos de entrada para el análisis de Weibull correspondiente a los ensayos a fatiga de las probetas con un 60 % de porosidad.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 17 Comparativa de la resistencia a tracción media para cada grupo de porosidad.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 18 Comparativa de la deformación a rotura media (%).....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 19 Comparativa del módulo de Young medio para cada grupo</i>	<i>33</i>
<i>Figura 20 Comparativa de la resistencia media a compresión según la porosidad del material ...</i>	<i>35</i>
<i>Figura 21 Deformación media a rotura en los ensayos de compresión</i>	<i>35</i>
<i>Figura 22 Comparativa del módulo de compresión medio (MPa) para los distintos niveles de porosidad.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 23 Curvas Wöhler suavizadas para los tres niveles de porosidad.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 24 Cálculos realizados con Excel para obtener los parámetros del modelo de Weibull en el grupo de 70 % de porosidad</i>	<i>39</i>
<i>Figura 25 Numero de ciclos a fallo individuales a 8 MPa y cálculo de la media y desviación estándar para cada grupo.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 26 Comparativa de parámetros de Weibull y representación gráfica del índice de rendimiento a fatiga para cada porosidad.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 27 Curvas de probabilidad de supervivencia obtenidas a partir de los parámetros de Weibull para los tres niveles de porosidad.....</i>	<i>41</i>

Índice de tablas

<i>Tabla 1 Medidas geométricas de las probetas utilizadas en los ensayos de compresión</i>	<i>22</i>
<i>Tabla 2 Medidas geométricas de las probetas utilizadas en los ensayos de tracción</i>	<i>23</i>
<i>Tabla 3 Resultados individuales de los ensayos a tracción para los tres niveles de porosidad, incluyendo la media y la desviación estándar para cada parámetro</i>	<i>31</i>
<i>Tabla 4 Resultados obtenidos en los ensayos de compresión para cada grupo de porosidad</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 5 Datos empleados en la construcción de las curvas Wöhler</i>	<i>37</i>

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el desarrollo de materiales estructurados ha cobrado especial relevancia en sectores como la medicina regenerativa, donde se buscan soluciones que imiten de forma fiable el comportamiento del hueso. Una de las líneas más prometedoras en este ámbito es la fabricación de geometrías porosas mediante impresión 3D, capaces de reproducir tanto la arquitectura como parte del comportamiento mecánico del tejido óseo.

Dentro de estas estructuras, las basadas en superficies mínimas triplemente periódicas (TPMS), como la geometría Schwarz D, destacan por su combinación de rigidez, ligereza y capacidad de interconexión entre poros, algo clave para aplicaciones biomédicas. Sin embargo, aunque ya existen estudios teóricos sobre este tipo de geometrías, siguen siendo necesarios ensayos experimentales que validen su rendimiento bajo diferentes condiciones de carga.

Este trabajo se centra en el análisis del comportamiento mecánico de probetas fabricadas con geometría Schwarz D, evaluando su respuesta a tracción, compresión y fatiga. Para ello, se han empleado tres niveles de porosidad distintos con el objetivo de analizar cómo afecta esta variable a propiedades como la resistencia, la deformación y la vida útil del material. Los ensayos realizados permiten además comparar los resultados con otros estudios similares y sentar las bases para futuras investigaciones en el campo.

El enfoque experimental y aplicado de este trabajo no solo permite obtener datos reales sobre el rendimiento de estas estructuras, sino que también aporta una base sólida para avanzar en su posible uso en procesos de regeneración ósea.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1 INTRODUCCIÓN AL ESTADO DEL ARTE

En los últimos años, el interés por el diseño de materiales con estructuras porosas se ha intensificado, especialmente en el ámbito biomédico. Las geometrías tipo lattice, y en particular las superficies mínimas triplemente periódicas (TPMS), han demostrado ser una opción muy interesante para regeneración ósea, ya que combinan buena resistencia con un alto nivel de porosidad. Este tipo de estructuras no solo permiten ajustar propiedades mecánicas como la rigidez, sino que también favorecen la integración con el hueso del paciente, sobre todo cuando se fabrican con tecnologías de impresión 3D.

En este capítulo se repasan los estudios más relevantes que se han publicado sobre este tipo de estructuras en el ámbito médico. Se analizan los fundamentos de los *scaffolds* óseos, las ventajas de la impresión 3D, el diseño de geometrías TPMS como la Schwarz D y, por último, los ensayos mecánicos realizados sobre estos materiales.

2.2 SCAFFOLD Y REGENERACIÓN ÓSEA

Los injertos óseos se usan habitualmente para reparar daños en el hueso, pero tanto los autoinjertos como los aloinjertos tienen limitaciones. Los autoinjertos pueden causar molestias o complicaciones en el lugar donde se extraen, mientras que los aloinjertos no tienen la misma capacidad de regeneración y pueden generar rechazo o infecciones (1). Por eso, se están desarrollando *scaffolds* que buscan imitar la estructura del hueso natural y facilitar su regeneración.

Un *scaffold* ideal debería estar hecho con materiales que imiten la matriz extracelular del hueso y que ayuden al crecimiento de células nuevas gracias a señales tanto mecánicas como bioquímicas (1). Es muy importante que estas estructuras tengan poros conectados entre sí, ya que eso facilita que las células puedan moverse, crecer, y formar vasos sanguíneos (2).

En enfermedades como la osteoporosis, que afectan a mucha gente mayor, los *scaffolds* pueden ser una buena solución. Se estima que cada 20 segundos hay una fractura relacionada con la osteoporosis en personas mayores de 50 años, lo que muestra lo necesario que es encontrar mejores tratamientos (2).

Uno de los materiales más estudiados para esto es el colágeno, ya que es biocompatible y se degrada de forma natural. Sin embargo, por sí solo no es muy resistente, así que se combina con otros materiales como cerámicas o polímeros para mejorar su comportamiento mecánico (3).

También se está investigando cómo usar estas estructuras en implantes ortopédicos, como las prótesis de cadera, para evitar el “apantallamiento de tensiones”, que ocurre cuando el implante es más rígido que el hueso. Esto puede hacer que el hueso se debilite con el tiempo. Para evitarlo, se están usando implantes con estructuras porosas que permiten que el hueso crezca dentro, aumentando su estabilidad (4).

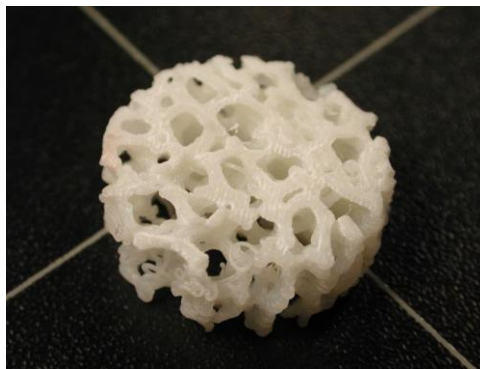


Figura 1 Imagen en detalle de un scaffold reticulado impreso en 3D para regeneración ósea, representando una estructura porosa biomédica adaptada anatómicamente

2.3 IMPRESIÓN 3D APLICADA A LA MEDICINA

La impresión 3D ha cambiado por completo la forma de fabricar implantes médicos, ya que permite crear estructuras complejas adaptadas a cada paciente. En medicina, esto ha sido

muy útil para fabricar *scaffolds* personalizados que mejoran el ajuste y el funcionamiento del implante (5).

Algunas de las técnicas más usadas son la estereolitografía (SLA), la proyección digital de luz (DLP) o el Material Jetting (MJ), que permiten imprimir estructuras con mucho detalle usando fotopolímeros (6). Estas técnicas se han usado sobre todo para fabricar *lattices* con porosidad controlada.

Aun así, uno de los retos que quedan pendientes es el impacto medioambiental de estas técnicas, ya que muchas resinas no son biodegradables y generan residuos. Por eso, cada vez hay más investigaciones enfocadas en usar materiales más sostenibles y en mejorar los sistemas de reciclaje (7).

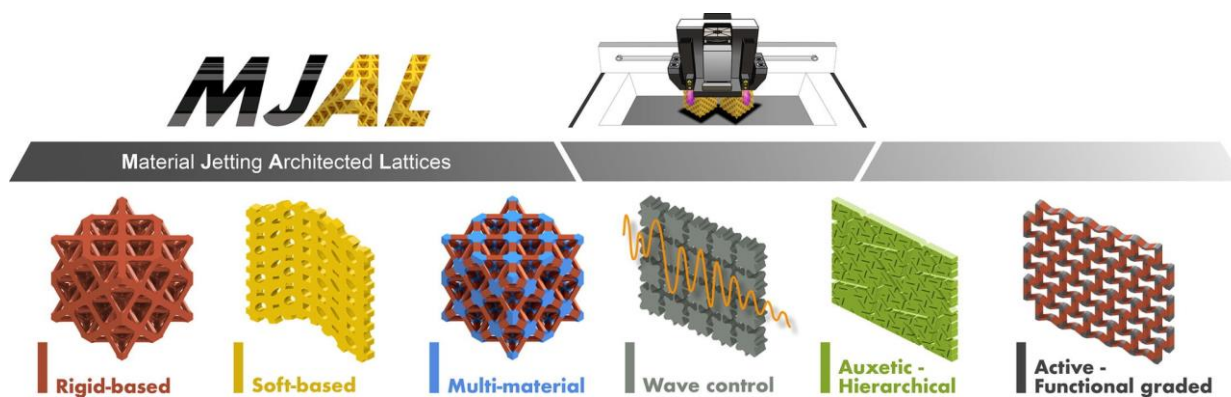


Figura 2 Ejemplos de estructuras reticuladas fabricadas mediante tecnología de impresión 3D Material Jetting (MJ): estructuras rígidas, flexibles, multimaterial, de control de ondas, jerárquicas auxéticas y funcionalmente gradadas

2.4 ESTRUCTURAS TPMS Y SCHWARZ D

Las estructuras reticuladas (*lattice structures*), como espumas, panales y retículas, destacan por ser ligeras, resistentes y capaces de absorber impactos o vibraciones. Por eso se han usado en sectores como la aviación, la ingeniería biomédica o la automatización (8).

Dentro de estas, las estructuras TPMS, como la Schwarz D, se caracterizan por tener formas suaves y continuas, con buena interconectividad y una gran superficie interna. Se pueden diseñar con tres enfoques distintos: usando celdas geométricas, con algoritmos matemáticos o con técnicas de optimización topológica (8). Esto permite adaptarlas fácilmente según la necesidad mecánica del diseño.

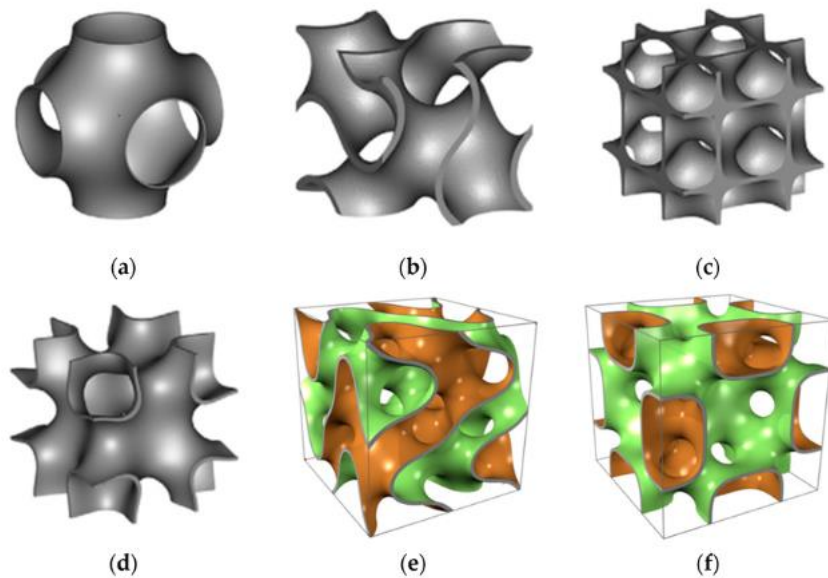


Figura 3 Representación de distintas celdas unitarias basadas en superficies mínimas triplemente periódicas (TPMS): (a) Schwarz P, (b) Schoen G, (c) Schwarz D, (d) Schoen IWP, (e) Fischer-Koch S, (f) Schoen FRD

2.5 ENSAYOS MECÁNICOS EN ESTRUCTURAS POROSAS

Para saber si estas estructuras pueden usarse en medicina o en la industria, es necesario evaluar bien su comportamiento mecánico. Muchos estudios usan simulaciones por elementos finitos para calcular propiedades como el módulo de Young, el coeficiente de Poisson o el límite elástico, y ver cómo cambian según la porosidad (9).

Un factor muy importante es cómo están distribuidos los poros: si están organizados en patrones cuadrados o hexagonales, la estructura suele ser más rígida; si están distribuidos de forma aleatoria, la estructura es más débil pero también falla de forma más progresiva (9).

Las estructuras impresas con tecnologías aditivas, sobre todo si son de metal, han demostrado ser prometedoras. Aun así, su resistencia a largo plazo todavía se está estudiando, ya que algunos defectos internos pueden afectar a su comportamiento en fatiga (10).

Por suerte, ahora se entienden mejor los fallos que pueden aparecer durante la fabricación, y eso está ayudando a mejorar las técnicas de producción y a predecir mejor cómo se comportarán estas estructuras en condiciones reales (10).

2.6 CONCLUSIONES DEL ESTADO DEL ARTE

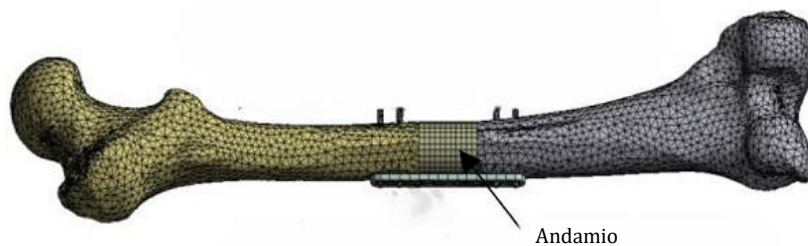
Tras revisar la bibliografía, se puede decir que las estructuras TPMS, y en particular la Schwarz D, tienen un gran potencial para fabricar scaffolds orientados a la regeneración ósea. Su forma y sus propiedades mecánicas, junto con la posibilidad de fabricarlas de forma personalizada con impresión 3D, las convierten en una opción muy competitiva frente a otras soluciones.

A pesar de todo, hay aspectos que todavía necesitan más investigación, como el comportamiento a fatiga de estas estructuras cuando se imprimen en polímeros. También queda trabajo por hacer en temas como la sostenibilidad de los materiales usados y la optimización del diseño. Por todo ello, seguir investigando en esta línea sigue siendo muy importante.

3. MOTIVACIÓN, OBJETIVOS Y PLANIFICACIÓN

3.1 *MOTIVACIÓN PERSONAL Y CIENTÍFICA*

El estudio y desarrollo de las estructuras lattice Schwarz D, basadas en superficies mínimas triplemente periódicas (TPMS), muestra indicios de un gran impacto positivo en el mundo de la biomecánica, particularmente en la evolución de implantes para el aumento de eficiencia en el proceso de regeneración ósea. El correcto entendimiento y diseño de estas geometrías otorgan la posibilidad de evitar la reabsorción ósea por falta de estímulo mecánico propiciado por los implantes ortopédicos de la actualidad.



*Figura 4 Aplicación biomédica de un andamio poroso
basado en geometría Lattice Schwarz D*

Este estudio también tiene motivación personal. Hace un año sufrí un accidente de donde me rompí la clavícula, el proceso de recuperación fue difícil y prolongado. Fue entonces, cuando me di cuenta de la importancia de investigar y desarrollar tecnologías que mejoren la eficiencia y calidad de estos procesos de recuperación.



Figura 5 Imagen clínica que ilustra una intervención con fijación metálica tras fractura ósea. Este tipo de tratamientos refuerzan la necesidad de alternativas regenerativas como los scaffolds personalizados

Estudiando estas estructuras también avanzamos en la necesidad de lograr estructuras cada vez más ligeras y resistentes, con posibles aplicaciones más allá del mundo de la biomedicina. El profundo conocimiento y control sobre la porosidad en estas geometrías optimiza la relación entre peso y ligereza generando así múltiples posibilidades de mejora en sectores donde estas características sean clave. Sectores como el aeroespacial podrán verse beneficiados de estas tecnologías a futuro por la importancia de la resistencia y ligereza en este entorno.

Por lo tanto, este TFG no solo tiene una motivación científica, sino que también quiere contribuir en el desarrollo de implantes óptimos para la regeneración ósea. Además, busca ampliar el conocimiento sobre la porosidad, y su influencia, con lo que poder optimizar el rendimiento de estructuras TPMS en diferentes industrias.

3.2 OBJETIVOS

El principal objetivo de este estudio es evaluar el comportamiento mecánico de geometrías creadas a partir de estructuras lattice Schwarz D, analizando la influencia de distintos niveles de porosidad en su resistencia, con ensayos de tracción y compresión, así como su durabilidad frente a fatiga.

Con este objetivo, se trabajarán tres niveles de porosidad distintos centrándonos en como varían las propiedades mecánicas, con lo que poder establecer relaciones para poder predecir su comportamiento con mayor precisión. Se determinará el efecto de la porosidad en el rendimiento mecánico, examinando las estructuras en términos de durabilidad, resistencia y deformabilidad, mediante ensayos físicos aplicando los modelos de Wöhler y Weibull.

Con los ensayos estáticos y a fatiga se obtendrán datos como el módulo de elasticidad, la resistencia máxima, deformación y se analizará la vida útil de las geometrías. Comparando los resultados con estudios previos y modelos teóricos se profundizará en la relación del diseño de estructuras con sus propiedades.

La realización del estudio permite obtener datos experimentales fiables que puedan contribuir a la mejora del diseño de las estructuras lattice Schwarz D. Este trabajo también proporcionara un conocimiento experimental básico necesario para futuros estudios e investigaciones, especialmente en el ámbito de la regeneración ósea, colaborando así en futuros modelos más precisos y completos.

3.3 METODOLOGÍA

3.3.1 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Para la realización del estudio se sigue una planificación experimental de estudio y ensayos para analizar el efecto de la porosidad en el comportamiento mecánico de estructuras lattice Schwarz D. La planificación se divide en tres fases: Inspección y medición de las probetas, ensayos mecánicos y análisis de resultados.

3.3.1.1 INSPECCIÓN Y MEDICIÓN DE PROBETAS

Las probetas para trabajar han sido fabricadas a partir de un modelo computacional y mediante manufactura aditiva para tres niveles de porosidad distintos: 50%, 60% y 70%. Antes de realizar los ensayos mecánicos, para garantizar la precisión de los resultados, se evaluará individualmente cada probeta tomando las medidas de sus dimensiones con un calibre digital y anotando cualquier imperfección, minimizando la posibilidad de errores experimentales relacionados con la geometría.

3.3.1.2 ENSAYOS MECÁNICOS

Las probetas se someterán a ensayos estáticos de tracción y compresión donde se obtendrán parámetros como: módulo de elasticidad, resistencia máxima y deformación. Para ello, se aplicarán cargas progresivas hasta fractura.

Por otro lado, las muestras también se someterán a ciclos de carga en ensayos de fatiga. Se aplicará en modelo de Wöhler, donde para cada nivel de porosidad se realizarán distintos ensayos a diferentes niveles de carga. Se anotará el número de ciclos hasta rotura y con todos los ensayos hechos se pintará una gráfica Amplitud de esfuerzo – Numero de ciclos hasta colapso, que nos permitirá conocer el máximo número de cargas alternas para diversas amplitudes de carga.

También, se realizarán ensayos a fatiga aplicando el método Weibull. Con este método, se aplicará repetidamente un nivel de carga constante para las distintas probetas del mismo y

diferente grado de porosidad. Se recogerán los datos en una gráfica Amplitud de esfuerzo – Número de ciclos hasta colapso, con la que se podrá cuantificar la dispersión de los resultados, determinar la confiabilidad de la geometría y predecir la probabilidad de falla.

3.3.1.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Contrastando las propiedades obtenidas experimentalmente con las teóricas se podrá observar la repercusión de la porosidad en las características mecánicas. Además, estudiando los resultados de ambos modelos a fatiga obtendremos un sistema capaz de proporcionar una visión estadística de la vida útil de las estructuras lattice Schwarz D.

3.3.2 PLANIFICACIÓN TEMPORAL DEL TRABAJO

En la Figura 6 se muestra el diagrama de Gantt con la planificación temporal de este trabajo. Se muestran las principales tareas desarrolladas y sus fechas de inicio y fin. Esta planificación ha ayudado a aprovechar mejor el tiempo disponible y a trabajar con más seguridad hacia el cumplimiento de los objetivos marcados.

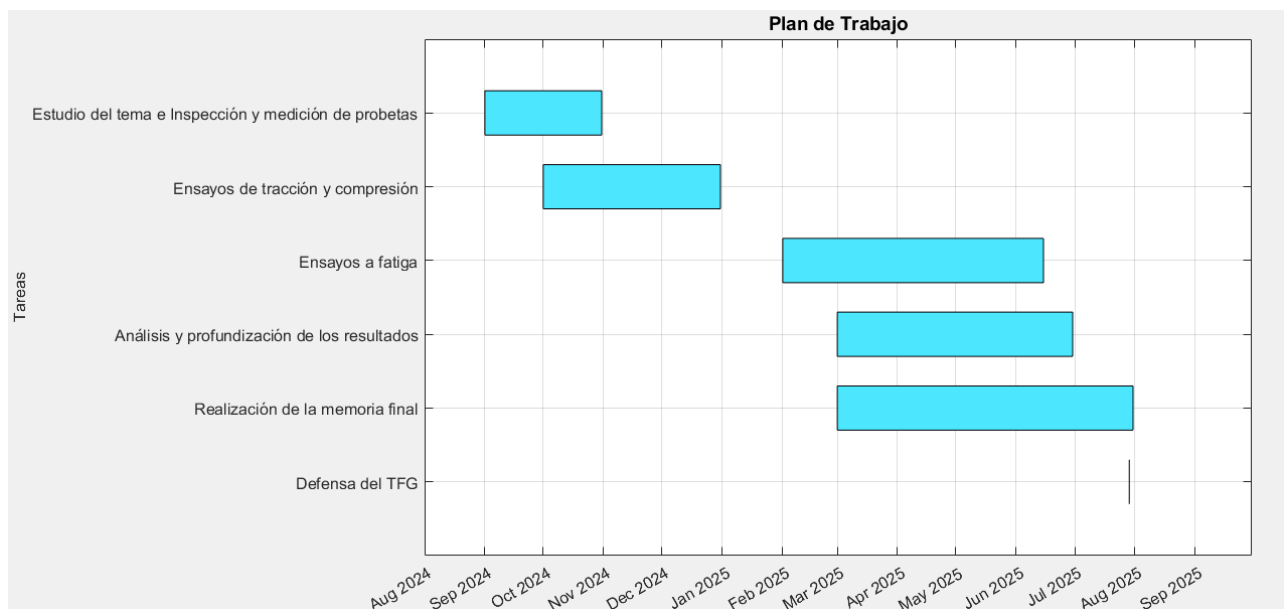


Figura 6 Diagrama de Gantt de la planificación temporal del trabajo

4. MATERIAL Y METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En este capítulo se describen los materiales empleados, el proceso de fabricación de las probetas y los ensayos mecánicos realizados. El objetivo es proporcionar toda la información necesaria sobre la metodología experimental para poder evaluar el comportamiento mecánico de las estructuras porosas analizadas.

4.1 MATERIALES

Para este trabajo se utilizó la resina Clear Resin V4 de Formlabs, un fotopolímero diseñado para impresión 3D por tecnología SLA, ideal para reproducir geometrías complejas con elevada fidelidad. Se eligió por su combinación de resistencia mecánica, precisión dimensional y capacidad para fabricar estructuras porosas tipo lattice (11).



*Figura 7 Pieza impresa en 3D con resina Clear V4
utilizando tecnología SLA*

Tras el post-curado (30 minutos a 60 °C), la resina Clear V4 alcanza una resistencia a tracción de 65 MPa, un módulo de elasticidad de 2,8 GPa y un módulo de flexión de 2,2 GPa, ofreciendo un buen equilibrio entre rigidez y resistencia. También presenta una elongación a rotura del 6 % y una HDT de 73 °C, lo que aporta estabilidad frente a deformaciones (11).

La resina Clear V4 ofrece además excelente transparencia, facilitando la inspección visual de posibles defectos internos. Su compatibilidad con equipos Formlabs (Form 2, 3, 3+, 3L) y su buena respuesta al post-curado la hacen idónea para este tipo de ensayos (12).

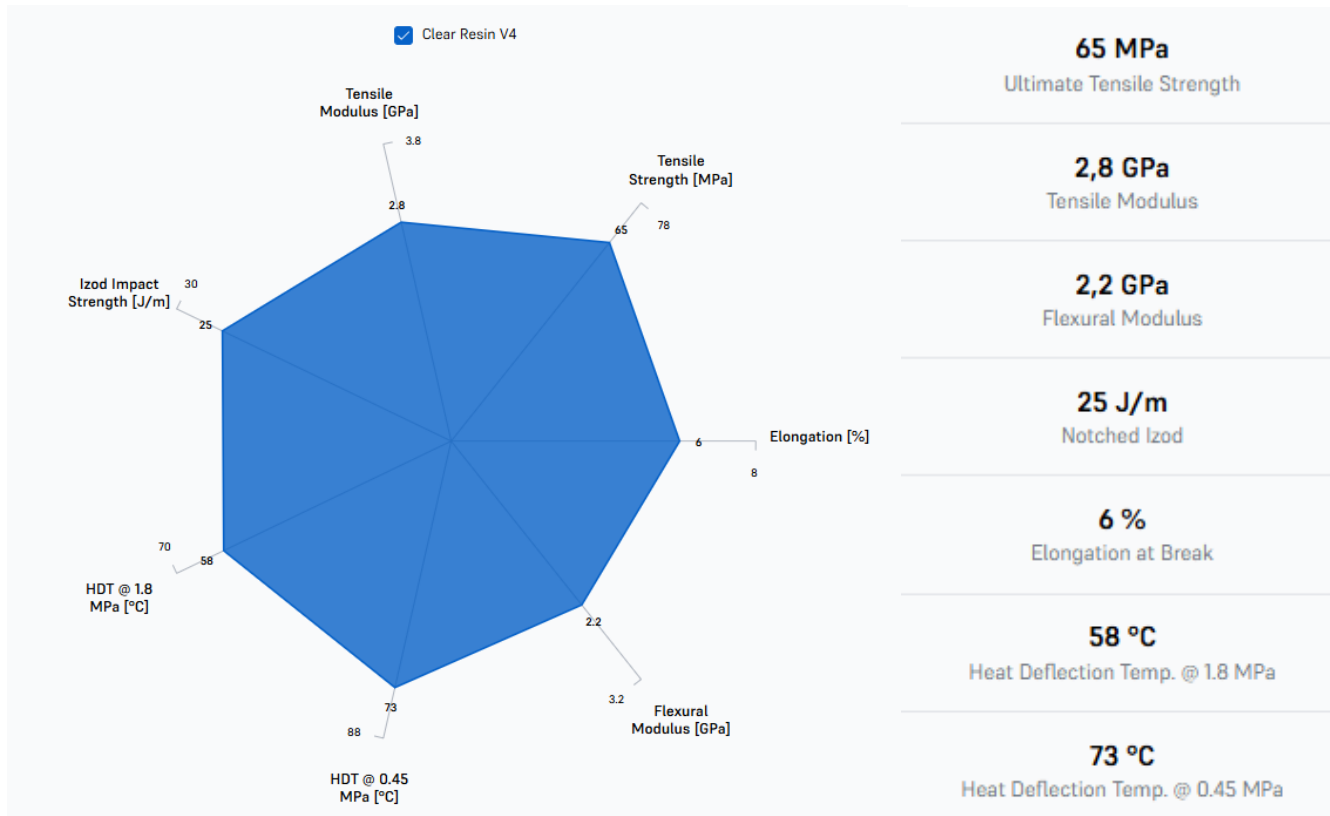


Figura 8 Propiedades mecánicas de la resina Clear V4.

Fuente: Formlabs Material Comparison Tool

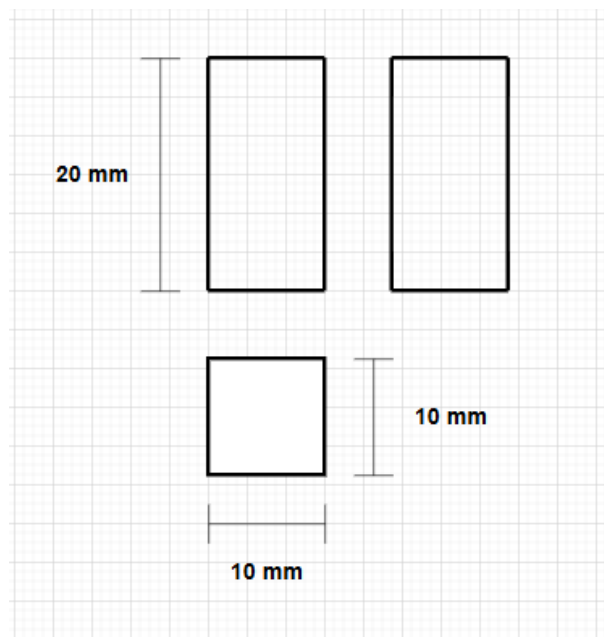
En conjunto, la Clear V4, tiene capacidad para reproducir con precisión detalles complejos y ofrece un punto de partida fiable para el estudio experimental, permitiendo centrarse en el análisis de las geometrías sin que el material suponga una limitación importante en los ensayos.

4.2 FABRICACIÓN

4.2.1 DISEÑO

Para este estudio se han diseñado dos tipos de probetas: unas destinadas a ensayos de compresión y otras a ensayos de tracción. En ambos casos, las geometrías han sido pensadas para facilitar el desarrollo de los ensayos experimentales y asegurar que los resultados obtenidos reflejan de forma fiable el comportamiento del material.

Las probetas de compresión, representadas en la Figura 9. Se trata de una base de 10 mm × 10 mm, mientras que la altura es de 20 mm. Este tipo de geometría sencilla permite una distribución homogénea de las cargas durante la compresión, y facilita tanto la fabricación como la sujeción en el utillaje del ensayo.



*Figura 9 Esquema de las probetas prismáticas
(10×10×20 mm) utilizadas para ensayos de compresión*

Por otro lado, las probetas de tracción (Figura 10) siguen una geometría tipo “hueso de perro”, con una sección reducida en la zona central para concentrar la deformación en esa región y evitar fracturas en las zonas de sujeción. Estas probetas cuentan con una anchura en la sección estrecha de 5 mm, una longitud útil de 30 mm y una longitud total implicada de 35 mm. El espesor es de 5 mm, constante a lo largo de la probeta. Esta geometría es adecuada para la caracterización a tracción, ya que permite localizar el alargamiento y la rotura en la zona central con mayor precisión.

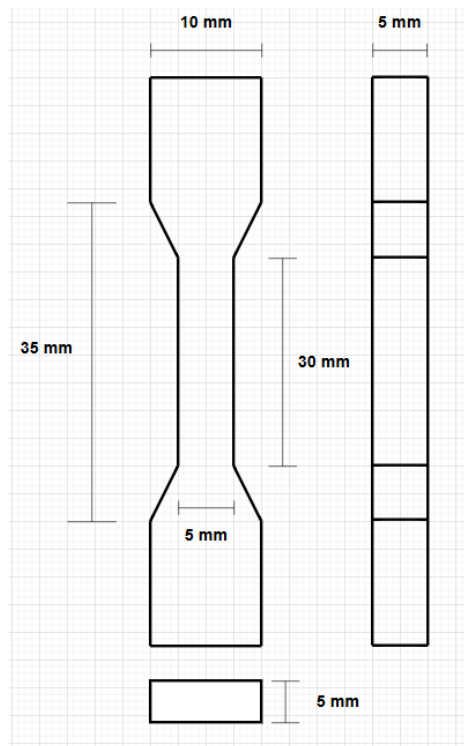


Figura 10 Geometría de la probeta plana utilizada en los ensayos de tracción, con sección y longitud útil de 5×5 mm y 30 mm respectivamente

Todas las dimensiones se definieron teniendo en cuenta las limitaciones de la impresora y lo que se buscaba conseguir con los ensayos. La idea era asegurar que las geometrías saliesen bien impresas y que las estructuras internas no se deformasen o perdieran detalle. Las ilustraciones se han hecho a partir de medidas reales tomadas sobre las probetas una vez fabricadas, intentando reflejar de forma clara y sencilla cómo es el diseño final.

4.2.2 IMPRESIÓN 3D

Una vez diseñadas las estructuras en Solid Edge, se procede a su fabricación mediante impresión 3D. Esta etapa es clave, ya que de ella depende la fidelidad entre el diseño digital y la pieza física que después será ensayada.

Para llevar a cabo la impresión, se ha utilizado una impresora Formlabs Form 3L (13), que emplea tecnología SLA (estereolitografía). Esta tecnología permite trabajar con una alta resolución, lo que resulta fundamental para mantener la geometría interna de las estructuras porosas tipo Schwarz D.

En cuanto a los parámetros de impresión, se ha fijado una temperatura de 80 °C y una duración de 90 minutos por lote. Estas condiciones aseguran que la resina se solidifique correctamente, con alta precisión y que no aparezcan defectos que puedan alterar los resultados experimentales.

Una vez impresas, las probetas se extraen con cuidado del tanque de resina para evitar deformaciones. A continuación, se analizan metódicamente las probetas comprobando que no tienen fallos, deformaciones o errores de impresión. Este último paso otorga garantías y precisión a los resultados sobre las propiedades mecánicas finales de la geometría.

Con esta metodología se asegura una buena repetibilidad entre muestras, lo cual es esencial para poder comparar resultados entre probetas con distintos niveles de porosidad. También permite obtener probetas libres de defectos visibles y representativas del diseño digital, algo clave para la fiabilidad de los ensayos mecánicos posteriores.

4.3 ENSAYOS MECÁNICOS

4.3.1 ENSAYOS ESTÁTICOS

Los ensayos estáticos realizados incluyen tanto compresión como tracción, empleando en ambos casos una máquina universal de ensayos disponible en el laboratorio de materiales de ICAI. Aunque se utilizó la misma máquina, fue necesario adaptar los agarres según el tipo de probeta a ensayar.

Antes de comenzar cada ensayo, se midieron las dimensiones de las probetas con un calibre digital. En los ensayos de tracción se registraron la anchura, el espesor y la longitud útil, mientras que en los de compresión se midió la anchura, espesor y la altura total. Estas medidas fueron fundamentales para poder calcular posteriormente la tensión y la deformación reales.

Medidas Probetas Compresión								
Probetas 50%	T 50% 1	T 50% 2	T 50% 3	T 50% 4	T 50% 5	T 50% 6	T 50% 7	T 50% 8
Anchura	5.3	5.13	5.08	5.10	5.07	5.05	5.03	5.02
Espesor	5.09	5.13	5.07	5.08	5.07	5.02	5.06	5.13
Longitud T	35.02	35.13	34.94	35.06	35.29	35.09	35.21	35.12
Longitud U	30.13	30.52	30.24	30.22	30.41	30.49	30.36	30.12
Probetas 60%	T 60% 1	T 60% 2	T 60% 3	T 60% 4	T 60% 5	T 60% 6	T 60% 7	T 60% 8
Anchura	5.11	5.16	5.05	5.04	5.06	5.07	5.11	5.01
Espesor	5.11	5.11	5.09	5.03	5.11	5.05	5.08	5.05
Longitud T	35.17	35.08	35.25	35.08	35.17	35.00	34.98	35.13
Longitud U	29.99	30.06	30.31	30.41	30.40	30.50	30.40	30.01
Probetas 70%	T 70% 1	T 70% 2	T 70% 3	T 70% 4	T 70% 5	T 70% 6	T 70% 7	T 70% 8
Anchura	5.15	5.13	5.10	5.10	5.07	5.11	5.13	5.10
Espesor	5.15	5.09	5.12	5.13	5.13	5.10	5.12	5.09
Longitud T	35.23	35.29	35.08	35.24	35.05	35.19	35.38	35.50
Longitud U	30.93	30.59	30.48	30.54	30.52	30.56	30.59	30.58

Tabla 1 Medidas geométricas de las probetas utilizadas en los ensayos de compresión

Medidas Probetas Tracción								
Probetas 50%	T 50% 1	T 50% 2	T 50% 3	T 50% 4	T 50% 5	T 50% 6	T 50% 7	T 50% 8
Anchura (mm)	10,11	10,13	10,11	10,08	10,09	10,11	10,1	10,1
Anchura (mm)	10,13	10,15	10,14	10,1	10,1	10,09	10,11	10,12
Altura (mm)	20,28	20,25	20,28	20,23	20,29	20,26	20,28	20,22
Probetas 60%	T 60% 1	T 60% 2	T 60% 3	T 60% 4	T 60% 5	T 60% 6	T 60% 7	T 60% 8
Anchura (mm)	10,15	10,13	10,12	10,11	10,08	10,13	10,12	10,12
Anchura (mm)	10,12	10,12	10,11	10,1	10,09	10,11	10,09	10,1
Altura (mm)	20,28	20,28	20,27	20,21	20,21	20,25	20,27	20,24
Probetas 70%	T 70% 1	T 70% 2	T 70% 3	T 70% 4	T 70% 5	T 70% 6	T 70% 7	T 70% 8
Anchura (mm)	10,2	10,18	10,22	10,22	10,43	10,25	10,18	10,22
Anchura (mm)	10,13	10,16	10,25	10,21	10,17	10,2	10,14	10,2
Altura (mm)	20,27	20,29	20,31	20,31	20,32	20,24	20,23	20,28

Tabla 2 Medidas geométricas de las probetas utilizadas en los ensayos de tracción

La herramienta utilizada para los ensayos fue WinTest32, configurada con diferentes velocidades según el tipo de prueba: 5 mm/min para tracción y 10 mm/min para compresión. Las probetas se nombraban manualmente antes de comenzar cada ensayo, indicando el tipo y el nivel de porosidad correspondiente. Durante la prueba, se monitorizaban en tiempo real los valores de tiempo (s), fuerza (kN) y carrera (mm), datos los cuales quedaban guardados para su posterior análisis. Por seguridad, en caso de acercarse a los 5000 N, era necesario detener el equipo manualmente.

A partir de los datos registrados, se calcularon las curvas tensión-deformación para cada muestra.

Tipo de Ensayo	Parámetro	Método de cálculo
Compresión	Resistencia a compresión (MPa)	Máximo valor de la columna de tensión
	Acortamiento a rotura (mm)	Máximo valor registrado en la columna de carrera
	Deformación a rotura (%)	Máximo valor de la columna de deformación $\times 100$
	Módulo Compresión (MPa)	Obtenido por ajuste gráfico y cálculo numérico; se toma la media de ambos

Tracción	Resistencia a tracción (MPa)	Máximo valor registrado en la columna de tensión
	Alargamiento a rotura (mm)	Máximo valor registrado en la columna de carrera
	Deformación a rotura (%)	Máximo valor de la columna de deformación $\times 100$
	Módulo de Young (MPa)	Obtenido por ajuste gráfico y cálculo numérico; se toma la media de ambos

Figura 11 parámetros característicos a partir de los datos experimentales

El módulo de Young (E) y módulo de compresión se han obtenido numéricamente calculando la pendiente de la parte lineal de la curva tensión-deformación, tomando dos puntos representativos de dicha zona. La expresión utilizada ha sido la siguiente:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}$$

Ecuación 1 Cálculo numérico del módulo de Young

Donde:

- σ_1 y σ_2 son los valores de tensión (MPa) correspondientes a dos puntos dentro del tramo elástico de la curva.
- ε_1 y ε_2 son los valores de deformación unitaria para esos mismos puntos.

Este valor ha sido posteriormente comparado con el obtenido mediante regresión lineal en la gráfica, y se ha hecho la media de ambos resultados para mayor fiabilidad.

El procesamiento de los datos se llevó a cabo en Excel, generando para cada probeta ensayada su curva individual tensión-deformación, y posteriormente organizando los resultados en tablas resumen por niveles de porosidad. Todos los datos se guardaron en formato .csv.

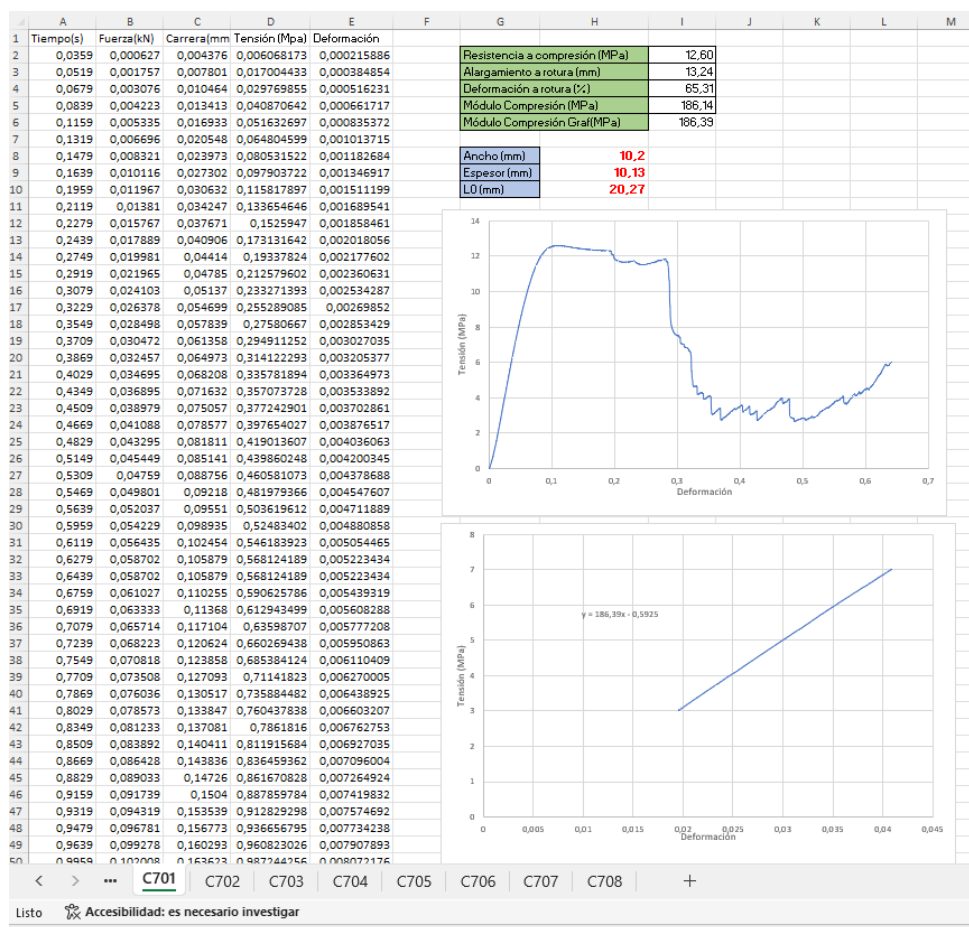


Figura 12 Ejemplo ensayo. Compresión – Probeta 1 (porosidad 70 %).

Resultados numéricos y curvas tensión-deformación

Las tres primeras columnas de cada ensayo recogen los datos directamente obtenidos durante el ensayo. A partir de estas medidas experimentales, se calcularon los valores de tensión y deformación, que figuran en las dos últimas columnas. La tensión se calculó dividiendo la fuerza entre el área inicial de la sección transversal, mientras que la deformación se obtuvo como el cociente entre la carrera y la longitud inicial de la probeta.

4.3.2 ENSAYOS A FATIGA

Para estudiar el comportamiento a fatiga del material, se han realizado ensayos exclusivamente en probetas de compresión. Aunque las dimensiones individuales de las muestras fueron medidas con calibre digital, se observó que las variaciones eran poco significativas, por lo que se decidió trabajar con una dimensión estándar de 20 mm de altura y sección cuadrada de 10 mm × 10 mm en todos los análisis.

Los ensayos a fatiga se han llevado a cabo con una máquina servoelectrónica Instron ElectroPuls, con la capacidad de aplicar cargas cíclicas bajo control de fuerza. La máquina se configuró para detener automáticamente el ensayo al alcanzar el límite de 1 millón de ciclos, considerado como referencia de no rotura en este estudio.



*Figura 13 Máquina servoelectrónica Instron ElectroPuls
utilizada para los ensayos a fatiga*

El control del ensayo se realizó mediante el software WaveMatrix, empleado en todos los ensayos de fatiga para definir los parámetros de carga, registrar los datos y monitorear en tiempo real el progreso del ensayo.

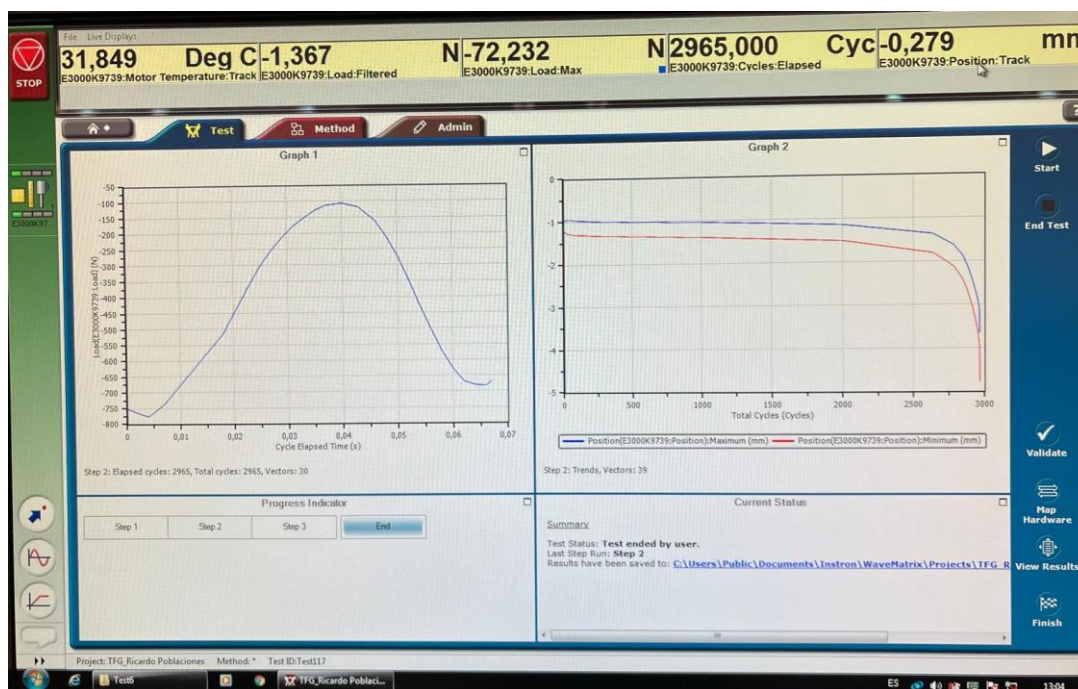


Figura 14 Captura de pantalla de la interfaz del programa WaveMatrix, utilizado para registrar y controlar los ensayos de fatiga realizados con la máquina Instron ElectroPuls

Se han seguido dos enfoques distintos para caracterizar la resistencia a fatiga del material: Wöhler y Weibull.

4.3.2.1 ENSAYOS WÖHLER

En primer lugar, a partir del valor medio de la resistencia a compresión obtenido en los ensayos estáticos, se realizaron 36 ensayos con una frecuencia constante de 15 Hz. Las pruebas se diseñaron para trabajar a cuatro porcentajes distintos del valor medio de resistencia a compresión: 80 %, 70 %, 50 % y 40 %, para cada uno de los tres niveles de porosidad (50 %, 60 % y 70 %).

Specimen	Strength	%	Stress	Stress	Frequenc	thickness	width(m)	Fmin (N)	Fmax (N)	F (absolut value)	END POINT (N)	Amplitud (N)	File name
SCH_D_50_1	24,14	0,8	1,9312	19,312	20	10	10	193,12	1931,2		1062,16	869,04	Test47
SCH_D_50_2	24,14	0,8	1,9312	19,312	20	10	10	193,12	1931,2		1062,16	869,04	Test48
SCH_D_50_3	24,14	0,8	1,9312	19,312	20	10	10	193,12	1931,2		1062,16	869,04	Test49
SCH_D_50_4	24,14	0,7	1,6898	16,898	20	10	10	168,98	1689,8		929,39	760,41	Test 41
SCH_D_50_5	24,14	0,7	1,6898	16,898	20	10	10	168,98	1689,8		929,39	760,41	Test 42
SCH_D_50_6	24,14	0,7	1,6898	16,898	20	10	10	168,98	1689,8		929,39	760,41	Test 43
SCH_D_50_7	24,14	0,5	1,207	12,07	20	10	10	120,7	1207		663,85	543,15	Test 44
SCH_D_50_8	24,14	0,5	1,207	12,07	20	10	10	120,7	1207		663,85	543,15	Test 45
SCH_D_50_9	24,14	0,5	1,207	12,07	20	10	10	120,7	1207		663,85	543,15	Test 46
SCH_D_50_10	24,14	0,4	0,9656	9,656	20	10	10	96,56	965,6		531,08	434,52	Test 50
SCH_D_50_11	24,14	0,4	0,9656	9,656	20	10	10	96,56	965,6		531,08	434,52	Test 40
SCH_D_50_12	24,14	0,4	0,9656	9,656	20	10	10	96,56	965,6		531,08	434,52	Test9

Figura 15 Ejemplo de tabla de datos para los ensayos de fatiga según el método de Wohler en probetas con un 50 % de porosidad

A modo de ejemplo, en esta tabla se recogen los datos de entrada utilizados para realizar los ensayos de fatiga correspondientes al 50 % de porosidad. En amarillo se destaca el valor de resistencia a compresión media, obtenido previamente en los ensayos estáticos. Este dato sirve como base para calcular las tensiones aplicadas en los ensayos de Wohler. En azul se indican los porcentajes seleccionados (80 %, 70 %, 50 % y 40 %) sobre dicha resistencia, representando los niveles de carga utilizados. Las celdas en blanco corresponden a cálculos intermedios realizados a partir de dichos porcentajes, incluyendo tensiones, fuerzas máximas y mínimas, y otras variables necesarias. Finalmente, aparecen los valores de carga máxima, mínima, punto de corte y amplitud que fueron introducidos en el software de la máquina de ensayos para ejecutar los ciclos de carga.

El objetivo de esta serie de ensayos es representar la vida útil de las probetas en función del número de ciclos hasta rotura, generando así las curvas características de Wöhler (S-N) para cada caso.

4.3.2.2 ENSAYOS WEIBULL

Para los ensayos Weibull se llevaron a cabo 32 ensayos de fatiga utilizando el enfoque estadístico de Weibull, manteniendo también la frecuencia constante de 15 Hz. En este caso, se trabajó con:

- 11 probetas con un 50 % de porosidad
- 12 probetas con un 60 % de porosidad
- 9 probetas con un 70 % de porosidad

Para los tres grupos se aplicó una tensión máxima constante de 8 MPa, valor escogido como referencia común para todos los ensayos Weibull. Se decidió utilizar esta tensión máxima ya que se estima que es la tensión que soportaría la scaffold situada en una tibia de un paciente con un peso medio de 70 kg mientras camina. Se mantuvo también la geometría estándar de $10 \times 10 \times 20$ mm. Cada probeta fue sometida a carga cíclica hasta su fallo, registrando el número de ciclos soportado en cada caso.

Specimen	Strength	%	Stress	Stress	Frequenc	thickness	width(m)	Fmin (N)	Fmax (N)	F (absolut value)	END POINT (N)	Amplitud (N)	File name
SCH_D_60_1	8	100%	0,8	8	20	10	10	80	800		440	360	Test91
SCH_D_60_2	8	100%	0,8	8	20	10	10	80	800		440	360	Test108
SCH_D_60_3	8	100%	0,8	8	20	10	10	80	800		440	360	Test109
SCH_D_60_4	8	100%	0,8	8	20	10	10	80	800		440	360	Test 116
SCH_D_60_5	8	100%	0,8	8	20	10	10	80	800		440	360	Test 117
SCH_D_60_6	8	100%	0,8	8	20	10	10	80	800		440	360	Test 118
SCH_D_60_7	8	100%	0,8	8	20	10	10	80	800		440	360	Test 119
SCH_D_60_8	8	100%	0,8	8	20	10	10	80	800		440	360	Test 120
SCH_D_60_9	8	100%	0,8	8	20	10	10	80	800		440	360	Test 121
SCH_D_60_10	8	100%	0,8	8	20	10	10	80	800		440	360	Test 122
SCH_D_60_11	8	100%	0,8	8	20	10	10	80	800		440	360	Test 123
SCH_D_60_12	8	100%	0,8	8	20	10	10	80	800		440	360	Test 124

Figura 16 Ejemplo de tabla de datos de entrada para el análisis de Weibull correspondiente a los ensayos a fatiga de las probetas con un 60 % de porosidad

Como ejemplo, en la Figura 16 se muestra la tabla utilizada para introducir los resultados del grupo con 60 % de porosidad. En ella, el valor de resistencia a compresión (columna amarilla) se fijó en 8 MPa, el porcentaje de carga aplicada aparece en azul (100 %), y el resto de las columnas recogen los cálculos necesarios y las variables a introducir en la plantilla de análisis. Este mismo procedimiento se repitió para los otros dos grupos, manteniendo siempre las mismas condiciones de carga y geometría.

El objetivo final de estos ensayos fue estudiar la fiabilidad del material frente a cargas cíclicas constantes, analizando la dispersión en el número de ciclos a fallo entre muestras sometidas a las mismas condiciones. A partir de estos datos, se aplicó la distribución de Weibull como herramienta estadística para estimar la probabilidad de fallo en función del número de ciclos.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en los ensayos mecánicos realizados, tanto estáticos como a fatiga. Se han organizado por tipo de ensayo y por tipo de carga (tracción o compresión), mostrando en cada caso los valores numéricos y las gráficas más representativas. El objetivo es facilitar la comparación entre los distintos niveles de porosidad y analizar cómo este parámetro afecta al comportamiento y a las propiedades de la geometría.

5.1 ENSAYOS ESTÁTICOS

5.1.1 RESULTADOS A TRACCIÓN

A continuación, se muestran los resultados de los ensayos a tracción. Para cada grupo de porosidad (50 %, 60 % y 70 %), se ha recopilado la información en una tabla resumen y se han generado tres gráficas comparativas: resistencia a tracción, deformación a rotura y módulo de Young. Estas variables permiten evaluar el comportamiento mecánico en función de la porosidad.

50% Porosidad					60% Porosidad					70% Porosidad				
	Resistencia a tracción (MPa)	Alargamiento a rotura (mm)	Deformación a rotura (%)	Módulo Young (MPa)		Resistencia a tracción (MPa)	Alargamiento a rotura (mm)	Deformación a rotura (%)	Módulo Young (MPa)		Resistencia a tracción (MPa)	Alargamiento a rotura (mm)	Deformación a rotura (%)	Módulo Young (MPa)
Sample 1	14,05	2,66	8,84	333,31	Sample 1	10,83	2,62	8,71	271,23	Sample 1	7,18	5,13	16,59	185,40
Sample 2	15,12	3,32	10,87	347,12	Sample 2	11,72	2,54	8,38	291,23	Sample 2	7,56	3,26	10,65	185,73
Sample 3	14,64	2,25	7,43	358,71	Sample 3	10,67	2,01	6,63	278,06	Sample 3	7,94	2,54	8,35	207,69
Sample 4	14,62	2,83	9,37	351,25	Sample 4	11,15	2,10	6,91	280,29	Sample 4	7,03	5,04	10,67	198,56
Sample 5	14,90	2,06	6,78	357,31	Sample 5	11,55	3,14	10,30	292,28	Sample 5	7,65	1,71	5,61	216,90
Sample 6	14,44	2,38	7,81	364,49	Sample 6	11,01	2,80	9,20	274,06	Sample 6	6,97	2,34	7,66	192,66
Sample 7	14,33	2,10	6,93	350,47	Sample 7	10,76	2,26	7,51	263,99	Sample 7	7,22	2,01	6,57	195,91
Sample 8	14,56	1,99	6,61	337,54						Sample 8	7,16	2,03	6,63	198,02
Media	14,58	2,45	8,08	350,03	Media	11,10	2,50	8,24	278,74	Media	7,34	3,01	9,09	197,61
Desviación estandar	0,33	0,46	1,50	10,58	Desviación estandar	0,40	0,40	1,31	10,31	Desviación estandar	0,34	1,36	3,55	10,64

Tabla 3 Resultados individuales de los ensayos a tracción para los tres niveles de porosidad, incluyendo la media y la desviación estándar para cada parámetro

Gráficas comparativas

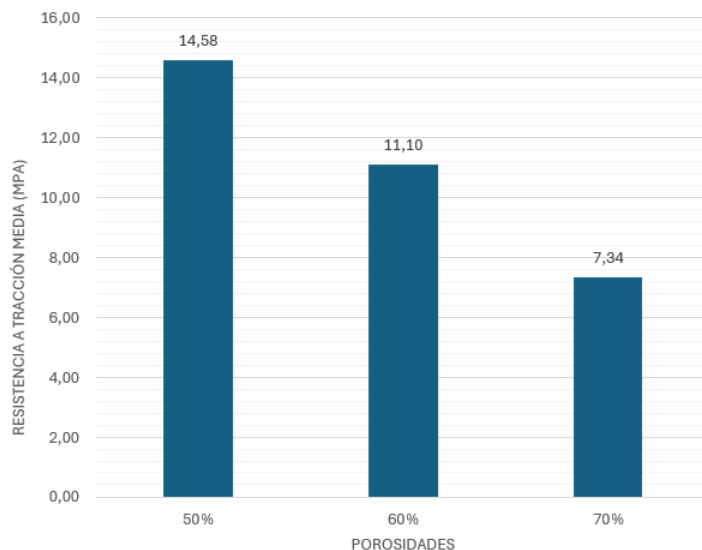


Figura 17 Comparativa de la resistencia a tracción media para cada grupo de porosidad

Esta gráfica permite ver de forma directa cómo la resistencia a tracción se reduce al aumentar la porosidad. El descenso es progresivo y evidente, lo que refleja la pérdida de capacidad del material para resistir esfuerzos sin romperse.

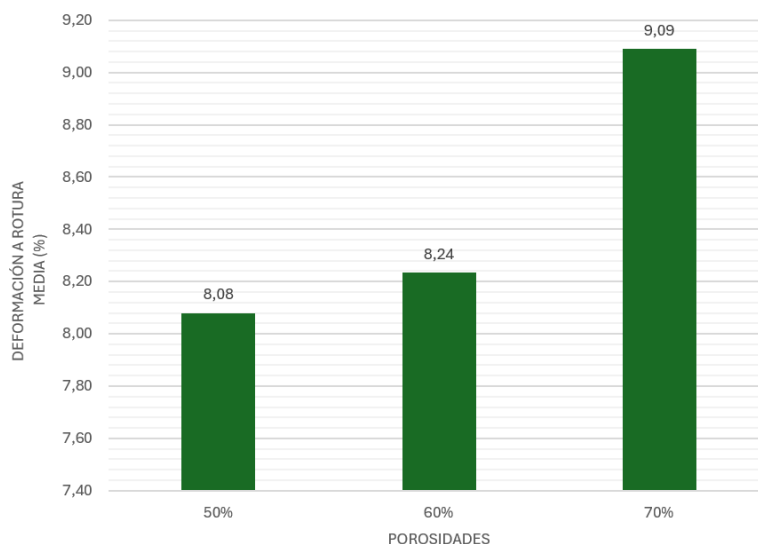


Figura 18 Comparativa de la deformación a rotura media (%)

En este caso se ve que cuanto mayor es la porosidad, más se deforman las probetas antes de romperse. Esto tiene sentido porque al tener más huecos, el material puede 'ceder' un poco más, aunque eso también hace que pierda resistencia.

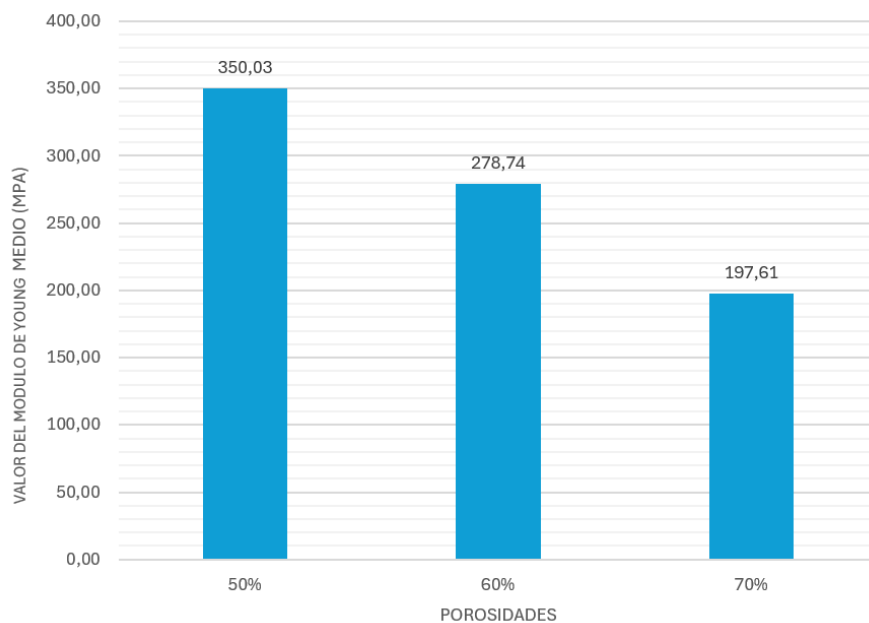


Figura 19 Comparativa del módulo de Young medio para cada grupo

El módulo de Young, que mide la rigidez del material, también baja a medida que aumenta la porosidad. Esta caída indica que el material se vuelve menos rígido, lo que es coherente con la menor densidad estructural introducida en los diseños.

5.1.2 RESULTADOS A COMPRESIÓN

A continuación, se muestran los resultados de los ensayos a compresión. Para cada grupo de porosidad (50 %, 60 % y 70 %), se ha recopilado la información en una tabla resumen y se han generado tres gráficas comparativas: resistencia a compresión, deformación a rotura y módulo de compresión. Estas variables permiten evaluar el comportamiento mecánico en función de la porosidad.

50% Porosidad					60% Porosidad					70% Porosidad				
	Resistencia a compresión (MPa)	Acortamiento a rotura (mm)	Deformación a rotura (%)	Módulo de Compresión (MPa)		Resistencia a compresión (MPa)	Acortamiento a rotura (mm)	Deformación a rotura (%)	Módulo de Compresión (MPa)		Resistencia a compresión (MPa)	Acortamiento a rotura (mm)	Deformación a rotura (%)	Módulo de Compresión (MPa)
Sample 1	23,43	6,92	34,10	244,99	Sample 1	18,32	6,97	34,35	223,87	Sample 1	12,60	13,24	65,31	186,27
Sample 2	25,14	7,21	35,58	260,65	Sample 2	17,50	6,37	31,41	226,36	Sample 2	12,57	5,98	29,49	178,80
Sample 3	23,83	6,73	33,20	262,20	Sample 3	17,58	7,46	36,79	230,41	Sample 3	12,42	15,89	78,25	185,92
Sample 4	24,94	6,30	31,14	270,52	Sample 4	18,55	6,82	33,75	260,60	Sample 4	12,82	6,33	31,14	191,31
Sample 5	24,01	6,55	32,30	262,41	Sample 5	19,13	7,02	34,72	262,18	Sample 5	12,33	8,65	42,58	183,56
Sample 6	22,85	6,26	30,89	287,10	Sample 6	17,92	6,74	33,27	239,26	Sample 6	13,17	6,63	32,75	197,89
Sample 7	24,78	6,50	32,13	272,87	Sample 7	18,31	8,38	41,35	221,32	Sample 7	12,03	4,22	20,86	172,00
					Sample 8	17,87	5,90	29,14	250,80	Sample 8	12,67	5,26	25,93	172,47
Media	24,139	6,637	32,763	265,820	Media	18,149	6,956	34,348	239,350	Media	12,578	8,275	40,790	183,528
Desviación estandar	0,849	0,340	1,668	12,975	Desviación estandar	0,541	0,739	3,634	16,549	Desviación estandar	0,339	4,143	20,395	8,923

Tabla 4 Resultados obtenidos en los ensayos de compresión para cada grupo de porosidad

En la tabla se resumen los valores individuales y medios obtenidos para cada muestra, incluyendo resistencia a compresión, acortamiento a rotura, deformación y módulo elástico. También se muestra la desviación estándar en cada caso.

En general, los valores medios obtenidos reflejan la misma tendencia observada en tracción: al aumentar la porosidad, se reduce notablemente la resistencia del material y su rigidez, mientras que la deformación tiende a aumentar. En este caso, como la geometría de las probetas es la misma, los comportamientos son bastante similares entre compresión y tracción, lo cual da coherencia a los resultados. La desviación estándar se mantiene razonablemente baja en todos los parámetros.

Gráficas comparativas

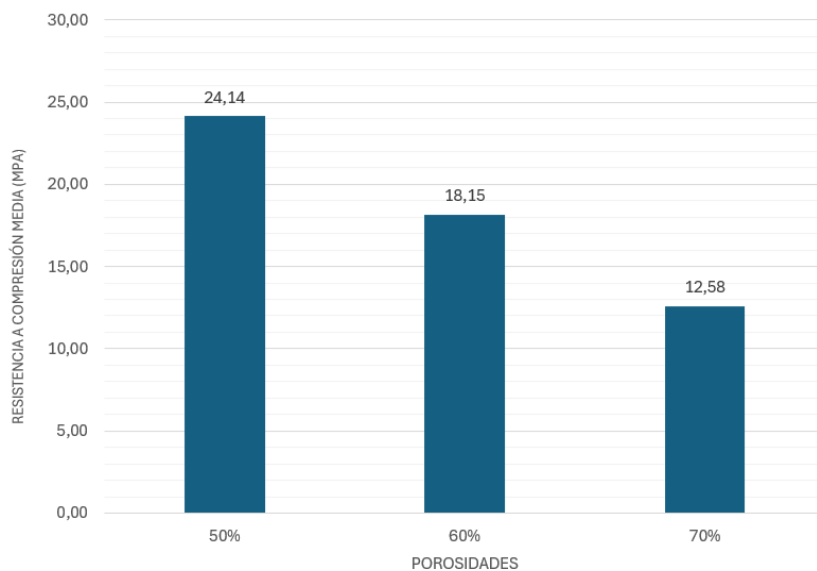


Figura 20 Comparativa de la resistencia media a compresión según la porosidad del material

La resistencia cae de forma clara al aumentar la porosidad. El grupo del 50 % llega a superar los 24 MPa, mientras que el de 70 % apenas supera los 12 MPa. Esto se debe a que, con más huecos, la sección efectiva que resiste la carga es menor.

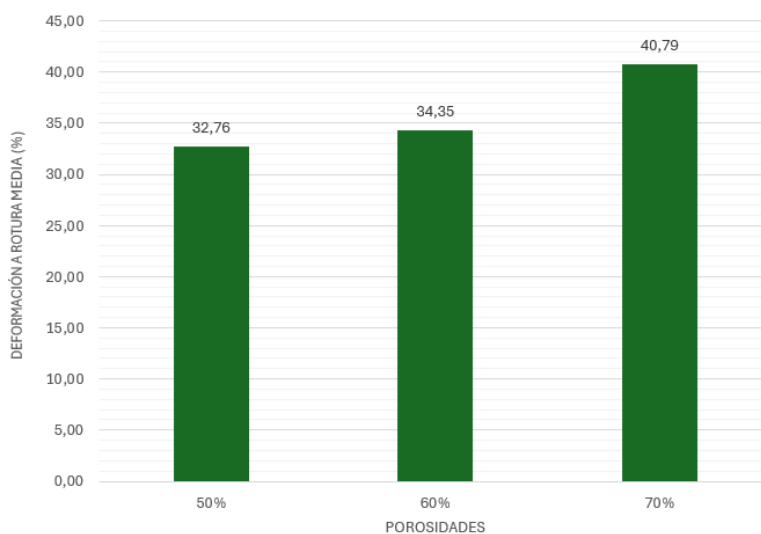


Figura 21 Deformación media a rotura en los ensayos de compresión

Las probetas con más porosidad aguantan más deformación antes de romperse. Esto puede deberse a que los huecos permiten que el material reparta mejor los esfuerzos antes de fallar. Al igual que en los ensayos a tracción.

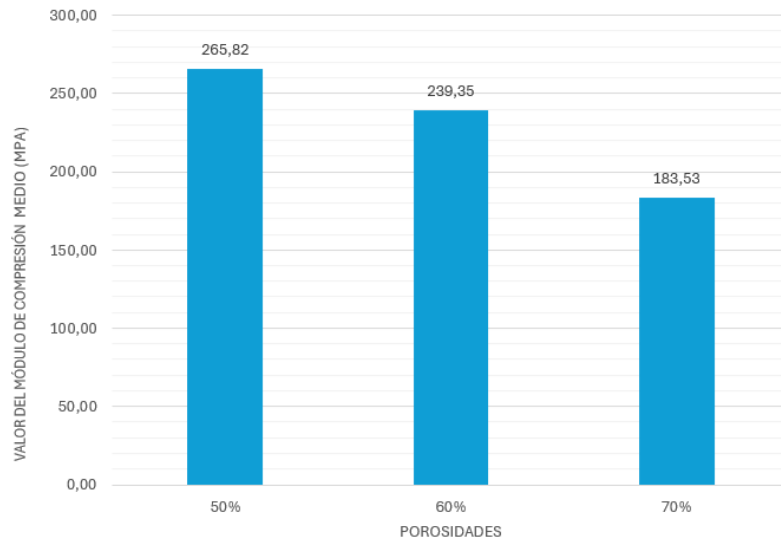


Figura 22 Comparativa del módulo de compresión medio (MPa) para los distintos niveles de porosidad

El módulo elástico disminuye con la porosidad. El grupo del 70 % tiene un valor mucho menor que los otros dos, lo que muestra claramente la pérdida de rigidez del material con más huecos.

5.2 ENSAYOS A FATIGA

5.2.1 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE WÖHLER

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en los ensayos a fatiga, agrupados según el nivel de porosidad. Para cada grupo se ha representado la evolución del número de ciclos a fallo en función de la tensión máxima aplicada, generando las curvas de Wöhler suavizadas a partir de los datos experimentales.

Specimen	Strength static test (Mpa)	%	Stress max (MPa)	F (absolut value) END POINT (N)	Amplitud (N)	NºCycles	File name
SCH (80deg - 90min)							
SCH_D_50_1	24,14	0,8	19,312	1062,16	869,04	674	Test47
SCH_D_50_2	24,14	0,8	19,312	1062,16	869,04	581	Test48
SCH_D_50_3	24,14	0,8	19,312	1062,16	869,04	649	Test49
SCH_D_50_4	24,14	0,7	16,898	929,39	760,41	956	Test 41
SCH_D_50_5	24,14	0,7	16,898	929,39	760,41	896	Test 42
SCH_D_50_6	24,14	0,7	16,898	929,39	760,41	876	Test 43
SCH_D_50_7	24,14	0,5	12,07	663,85	543,15	4873	Test 44
SCH_D_50_8	24,14	0,5	12,07	663,85	543,15	4215	Test 45
SCH_D_50_9	24,14	0,5	12,07	663,85	543,15	5058	Test 46
SCH_D_50_10	24,14	0,4	9,656	531,08	434,52	1000000	Test 50
SCH_D_50_11	24,14	0,4	9,656	531,08	434,52	1000000	Test 40
SCH_D_50_12	24,14	0,4	9,656	531,08	434,52	1000000	Test9
SCH_D_60_1	18,15	0,8	14,52	798,6	653,4	312	Test 67
SCH_D_60_2	18,15	0,8	14,52	798,6	653,4	196	Test 68
SCH_D_60_3	18,15	0,8	14,52	798,6	653,4	205	Test 69
SCH_D_60_4	18,15	0,7	12,705	698,775	571,725	496	Test 70
SCH_D_60_5	18,15	0,7	12,705	698,775	571,725	415	Test 71
SCH_D_60_6	18,15	0,7	12,705	698,775	571,725	545	Test 72
SCH_D_60_7	18,15	0,5	9,075	499,125	408,375	1300	Test 63
SCH_D_60_8	18,15	0,5	9,075	499,125	408,375	1758	Test 62
SCH_D_60_9	18,15	0,5	9,075	499,125	408,375	1498	Test61
SCH_D_60_10	18,15	0,4	7,26	399,3	326,7	6750	Test 64
SCH_D_60_11	18,15	0,4	7,26	399,3	326,7	5719	Test 65
SCH_D_60_12	18,15	0,4	7,26	399,3	326,7	7394	Test 66
SCH_D_70_1	12,58	0,8	10,064	553,52	452,88	843	Test8
SCH_D_70_2	12,58	0,8	10,064	553,52	452,88	678	Test51
SCH_D_70_3	12,58	0,8	10,064	553,52	452,88	711	Test52
SCH_D_70_4	12,58	0,7	8,806	484,33	396,27	1186	Test 27
SCH_D_70_5	12,58	0,7	8,806	484,33	396,27	1383	Test53
SCH_D_70_6	12,58	0,7	8,806	484,33	396,27	1189	Test54
SCH_D_70_7	12,58	0,5	6,29	345,95	283,05	13772	Test 55
SCH_D_70_8	12,58	0,5	6,29	345,95	283,05	12150	Test 56
SCH_D_70_9	12,58	0,5	6,29	345,95	283,05	31707	Test 60
SCH_D_70_10	12,58	0,4	5,032	276,76	226,44	1000000	Test 57
SCH_D_70_11	12,58	0,4	5,032	276,76	226,44	1000000	Test58
SCH_D_70_12	12,58	0,4	5,032	276,76	226,44	1000000	Test59

Tabla 5 Datos empleados en la construcción de las curvas Wöhler

La tabla recoge los resultados individuales de los ensayos, incluyendo el porcentaje de carga aplicado, la tensión máxima correspondiente, el número de ciclos a fallo alcanzado y los parámetros intermedios necesarios para construir las curvas de Wöhler. Esta información permite analizar la evolución de la resistencia a fatiga en función de la porosidad de cada grupo.

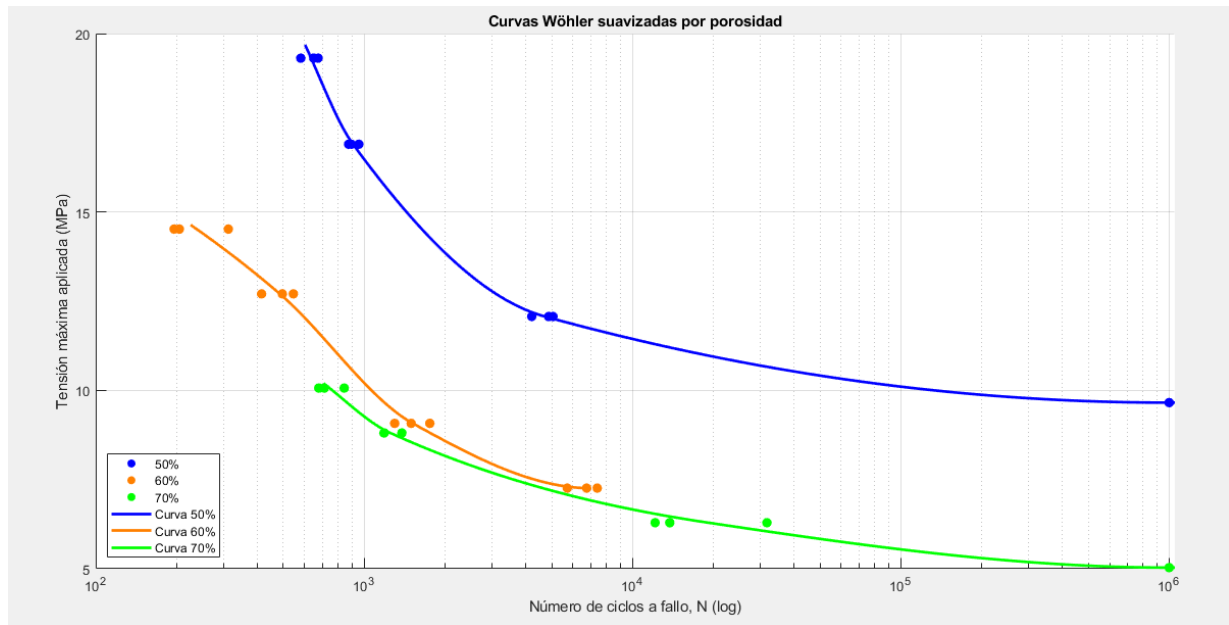


Figura 23 Curvas Wöhler suavizadas para los tres niveles de porosidad

En la gráfica se representa la tensión máxima aplicada frente al número de ciclos a fallo, en escala logarítmica. Cada curva suavizada, generada con MATLAB, muestra el comportamiento de los tres niveles de porosidad analizados, permitiendo visualizar la evolución de la resistencia a fatiga del material con mayor claridad.

Llama especialmente la atención que las probetas con 70 % de porosidad presentan un rendimiento a fatiga muy similar a las de 60 %, lo cual no encaja con la tendencia esperada. Una posible explicación es el tiempo transcurrido entre la fabricación y los ensayos: mientras que las probetas del 50 % y 70 % se testearon poco después del post-curado, las del 60 % estuvieron almacenadas durante más tiempo, lo que podría haber provocado cierta degradación del material. Esta hipótesis cobra más fuerza tras los ensayos de Weibull, donde se observaron resultados en la misma línea que los de este grupo de 60 % en Wöhler.

5.2.2 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE WEIBULL

Para completar el estudio del comportamiento a fatiga, se aplicó el modelo estadístico de Weibull. Este tipo de análisis permite describir la fiabilidad del material en función del número de ciclos a fallo, aportando una visión más completa que los ensayos convencionales. Aunque las matemáticas que hay detrás del modelo son bastante complejas, aquí se va a presentar de forma sencilla y enfocada en los resultados más relevantes.

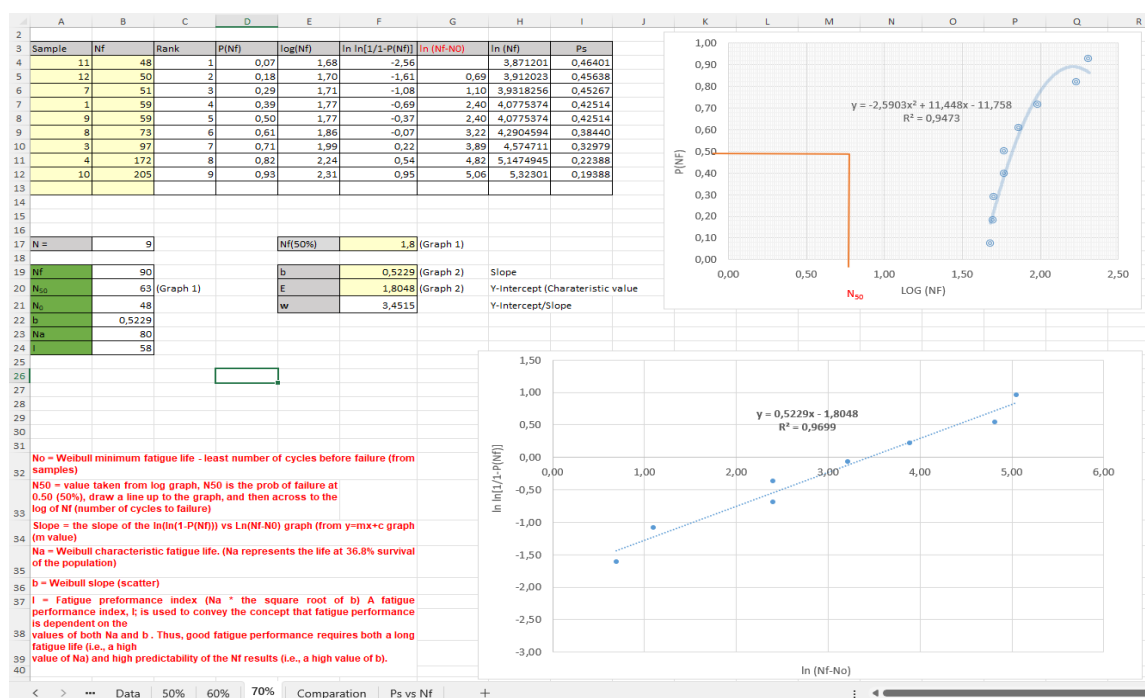


Figura 24 Cálculos realizados con Excel para obtener los parámetros del modelo de Weibull en el grupo de 70 % de porosidad

Los cálculos se realizaron con una plantilla de Excel diseñada específicamente para este tipo de análisis. Para cada grupo de porosidad, se introdujeron los valores de ciclos a fallo registrados a 8 MPa (como ya se explicó en el capítulo 4) y, a partir de ahí, se calcularon los principales parámetros del modelo: el número mínimo de ciclos a fallo (N_0), la vida característica (N_a), que representa el número de ciclos a fallo esperado para un 63,2 % de probetas, la vida para una probabilidad del 50 % de fallo (N_{50}), el parámetro de forma (b) y el índice de rendimiento a fatiga (I). Además, se incluyeron gráficas que ayudan a ver mejor cómo se comportan los datos y qué diferencias hay entre los distintos grupos.

Antes de pasar al análisis de resultados, es importante destacar que la media no es una medida adecuada en este tipo de ensayos. Como se ve en la siguiente tabla, el grupo de 50 % de porosidad tiene una desviación estándar muy alta, lo que distorsiona la interpretación del valor medio. Por eso, Weibull resulta especialmente útil, ya que se centra en la probabilidad de fallo, no en un único valor medio.

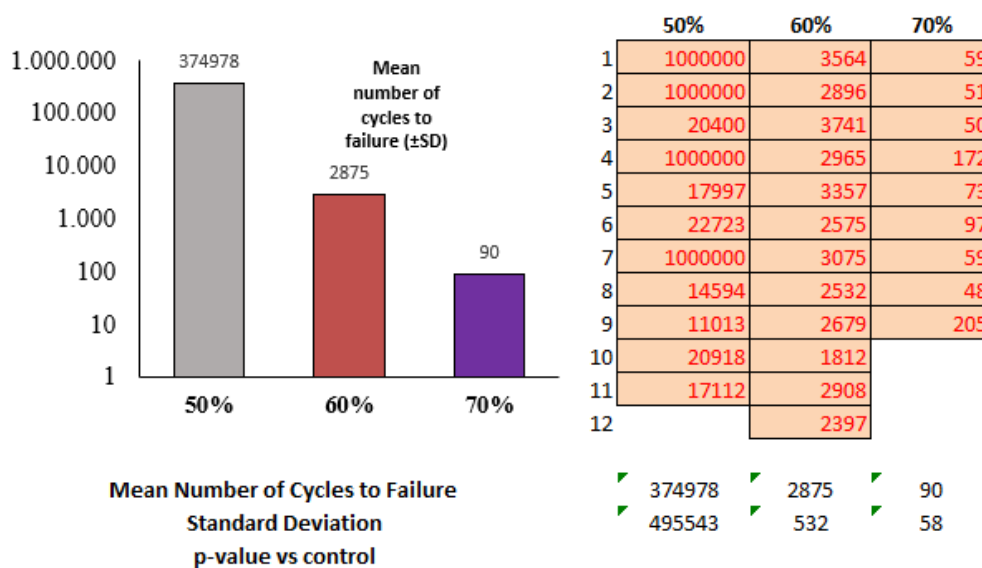


Figura 25 Numero de ciclos a fallo individuales a 8 MPa y cálculo de la media y desviación estándar para cada grupo

	50%	60%	70%
Nf	374978	2875	90
N50	22909	2904	63
N0	11013	1812	48
b	0,305	2,373	0,523
Na	152777	3056	80
I	84360	4708	58

N₀ – número mínimo de ciclos a fallo
N₅₀ – ciclos para una probabilidad de fallo del 50 %
Na – vida característica (supervivencia del 36,8 %)
b – pendiente o parámetro de forma
I – índice de rendimiento a fatiga, que combina Na y b

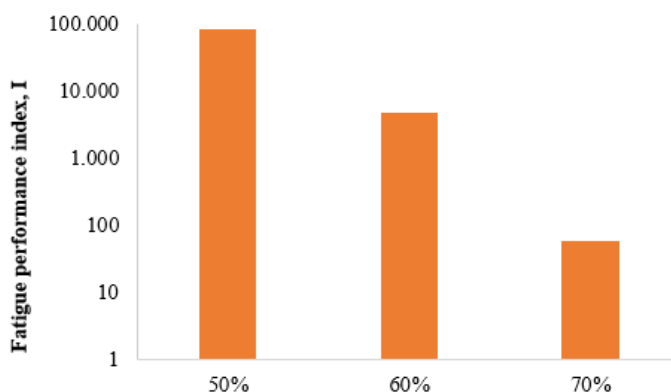


Figura 26 Comparativa de parámetros de Weibull y representación gráfica del índice de rendimiento a fatiga para cada porosidad

Además del índice de rendimiento a fatiga (I), que combina tanto la vida característica (N_a) como la pendiente (b), también es interesante fijarse por separado en la pendiente. En cuanto a I , se ve claramente en la gráfica que el grupo con 50 % de porosidad tiene el mejor resultado, con lo que podríamos suponer que tiene un buen comportamiento a fatiga. El grupo con 60 % se queda en una posición intermedia, mientras que el de 70 % cae bastante. Por otro lado, si nos fijamos en el valor de b , el grupo del 60 % es el que presenta menor dispersión, ya que tiene la pendiente más alta. En cambio, en el grupo del 50 %, a pesar de obtener los mejores resultados, el valor de b es bajo, lo que indica que sus resultados son muy irregulares. El grupo del 70 % combina baja pendiente y baja vida a fatiga, por lo que es el que peor se comporta en este análisis.

Por último, se muestran las curvas de probabilidad de supervivencia. Estas curvas reflejan la probabilidad de que una muestra aguante un determinado número de ciclos antes de romperse. Como cabía esperar, el grupo con menor porosidad es el que más probabilidad de supervivencia tiene a medida que aumentan los ciclos, mientras que el de mayor porosidad tiene una caída muy temprana. Estas curvas ayudan a visualizar la fiabilidad global del material.

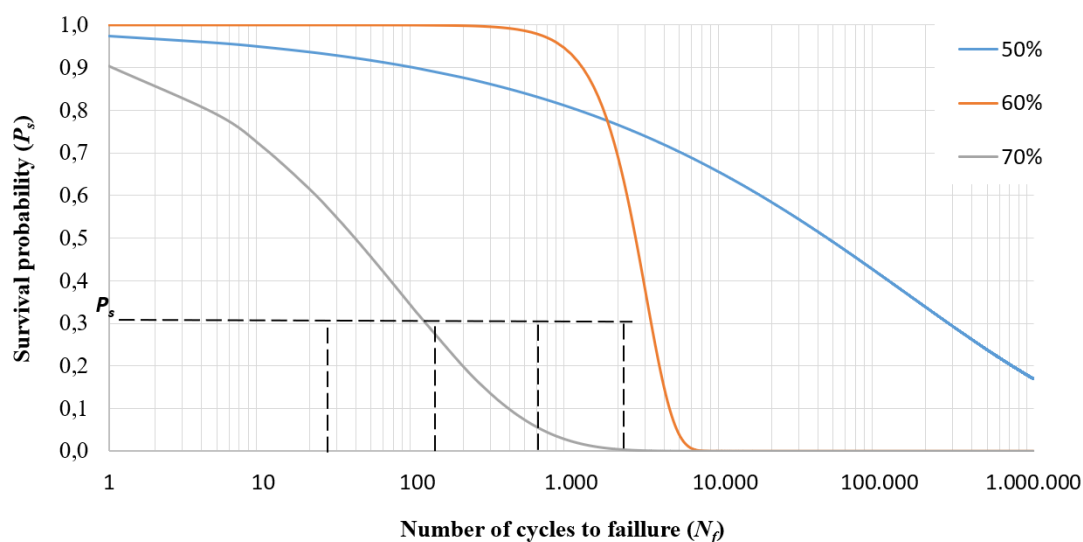


Figura 27 Curvas de probabilidad de supervivencia obtenidas a partir de los parámetros de Weibull para los tres niveles de porosidad

6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

6.1 CONCLUSIONES

A lo largo de este trabajo se ha estudiado el comportamiento mecánico de estructuras tipo Schwarz D impresas en 3D con diferentes niveles de porosidad (50 %, 60 % y 70 %), centrándose tanto en su respuesta ante cargas estáticas como en condiciones de fatiga.

En los ensayos estáticos, los resultados han sido consistentes: al aumentar la porosidad, se ha observado una disminución general en la resistencia, el módulo de Young y el módulo de compresión. En cambio, la deformación a rotura ha aumentado ligeramente con la porosidad, lo que indica que los materiales más porosos, aunque menos resistentes, son algo más deformables antes de romperse. Esto ha ocurrido tanto en tracción como en compresión, lo que refuerza la validez de los resultados.

En cuanto a los ensayos a fatiga, se han seguido dos enfoques: Wöhler y Weibull. Las curvas de Wöhler muestran una anomalía en el grupo del 70 % de porosidad, que presenta un comportamiento muy similar al de 60 %, algo que choca con la lógica y lo esperado. Una posible explicación es que las probetas del 60 % se ensayaron tiempo después del post-curado, mientras que las de 50 % y 70 % se ensayaron prácticamente al momento. En cuanto a Weibull, los resultados siguen la lógica esperada: el grupo del 50 % aparece como el más resistente a fatiga. Sin embargo, aunque su índice de rendimiento (I) es el más alto, el parámetro de forma (b) es muy bajo, lo que indica una alta dispersión en los datos. Esto deja la duda de si realmente compensa esa aparente ventaja en vida útil cuando la fiabilidad es tan baja. Aun así, el análisis ha sido completo y ha permitido extraer conclusiones relevantes, aunque sin entrar en profundidad en la base matemática del modelo.

6.2 TRABAJOS FUTUROS

A partir de este estudio, surgen varias líneas de trabajo interesantes:

1. Comparación con otras geometrías tipo lattice: Un compañero ha desarrollado el mismo proyecto utilizando estructuras Gyroid en lugar de Schwarz D. Comparar los resultados de ambos estudios permitiría entender mejor cómo influye la geometría interna en el comportamiento mecánico del material, especialmente en condiciones de carga cíclica.
2. Ampliar el análisis de fatiga a tracción y compresión: Este trabajo se ha centrado únicamente en fatiga a compresión. Un estudio más completo debería incluir también ensayos a tracción y un análisis más profundo del modelo de Weibull, comparando su fiabilidad con respecto a los resultados obtenidos por el método de Wöhler.
3. Estudio del envejecimiento de las probetas: Se ha detectado que el tiempo transcurrido entre la fabricación y el ensayo puede influir en las propiedades del material. Sería interesante realizar un estudio específico sobre cómo evoluciona el comportamiento mecánico de las probetas en función del tiempo, evaluando si existen pérdidas de rendimiento o cambios significativos tras ciertos días o semanas de almacenamiento.

7. BIBLIOGRAFÍA

1. Polo-Corrales L, Latorre-Esteves M, Ramirez-Vick JE. Scaffold Design for Bone Regeneration. *J Nanosci Nanotechnol*. 1 de enero de 2014;14(1):15-56.
2. Abbasi N, Hamlet S, Love RM, Nguyen NT. Porous scaffolds for bone regeneration. *J Sci Adv Mater Devices*. marzo de 2020;5(1):1-9.
3. Zhang D, Wu X, Chen J, Lin K. The development of collagen based composite scaffolds for bone regeneration. *Bioact Mater*. marzo de 2018;3(1):129-38.
4. Liu B, Wang H, Zhang N, Zhang M, Cheng CK. Femoral Stems With Porous Lattice Structures: A Review. *Front Bioeng Biotechnol* [Internet]. 17 de noviembre de 2021 [citado 22 de julio de 2025];9. Disponible en: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fbioe.2021.772539/full>
5. Kantaros A, Piromalis D. Fabricating Lattice Structures via 3D Printing: The Case of Porous Bio-Engineered Scaffolds. *Appl Mech*. 25 de mayo de 2021;2(2):289-302.
6. Mora S, Pugno NM, Misseroni D. 3D printed architected lattice structures by material jetting. *Mater Today*. octubre de 2022;59:107-32.
7. Maines EM, Porwal MK, Ellison CJ, Reineke TM. Sustainable advances in SLA/DLP 3D printing materials and processes. *Green Chem*. 2021;23(18):6863-97.
8. Pan C, Han Y, Lu J. Design and Optimization of Lattice Structures: A Review. *Appl Sci*. 13 de septiembre de 2020;10(18):6374.
9. Marco M, Belda R, Miguélez MH, Giner E. Numerical analysis of mechanical behaviour of lattice and porous structures. *Compos Struct*. abril de 2021;261:113292.
10. Benedetti M, Du Plessis A, Ritchie RO, Dallago M, Razavi N, Berto F. Architected cellular materials: A review on their mechanical properties towards fatigue-tolerant design and fabrication. *Mater Sci Eng R Rep*. abril de 2021;144:100606.
11. Formlabs. (2021). Propiedades técnicas de la resina Clear V4. Formlabs. Obtenido de <https://formlabs.com/materials/compare/?compare=P&compare=RS-CFG-GPCL-04&compare=->
12. Dynamism. (2021). Formlabs Resin – Clear V4. Obtenido de <https://www.dynamism.com/formlabs/formlabs-resin-clearv4.html>
13. Formlabs. (2021). Impresora 3D Form 3L: impresión de gran formato. Formlabs. Obtenido de <https://formlabs.com/es/3d-printers/form-3l/>