



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Máster

Diseño mecánico y computacional de estructuras porosas
para hueso

Mechanical and computational design of porous
structures for bone

Autor/es

Luis Falcón Mateo

Director/es

María Ángeles Pérez Ansón

Alberto Cuadrado Hernández

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2024/2025

Resumen

Existen muchos problemas óseos que pueden afectar al normal funcionamiento de la estructura ósea. Los tratamientos actuales presentan limitaciones en cuanto a estabilidad, funcionalidad, durabilidad y, sobre todo, respecto a la capacidad osteointegradora y regenerativa de los implantes con el hueso. Esta coyuntura ha supuesto un reto que ha propiciado la búsqueda de nuevas soluciones que permitan integrar en un mismo sistema la función de soporte mecánico junto con la capacidad regenerativa de tejidos. El desarrollo de estructuras porosas permite la reconstrucción del tejido óseo actuando en combinación de otros sistemas de osteosíntesis convencionales.

El objetivo de este Trabajo Final de Master (TFM) es el de desarrollar una herramienta computacional para diseñar estructuras porosas que nos dé los requerimientos mecánicos para flexión y torsión.

Los objetos de estudio son diferentes estructuras porosas giroideas, fabricadas a partir de fabricación aditiva, que han sido estudiadas y ensayadas de forma experimental en un estudio previo, y de las que partimos de sus geometrías 3D hechas a partir de modelado CAD. A partir de éstos, se les aplica un tratamiento de mallado, haciendo uso del software de optimización de diseño, 3-Matic Research (Materialise, Lovaina, Bélgica), para poder hacer compatible los archivos con la herramienta computacional, Abaqus (Dassault Systèmes Simulia Corp, Providence, USA), que es el software que se usa para la simulación de los ensayos de flexión y torsión, haciendo uso del método de elementos finitos (FEA).

Durante la realización de las simulaciones, los ensayos de flexión presentaron muchas complicaciones en la convergencia de los cálculos, en cambio, los ensayos de torsión fueron más sencillos de llevar a cabo.

Finalmente, cuando ya se obtuvieron los resultados, se realizaron comparaciones entre los comportamientos mecánicos obtenidos en las simulaciones, con los comportamientos mecánicos obtenidos de manera experimental, y se obtuvieron grandes discrepancias entre ambos, siendo las simulaciones superiores a los experimentales, por lo que se ajustaron las propiedades del material simulado para obtener un comportamiento que se asemejara más al obtenido de forma experimental. De esta forma se pudo evidenciar la pérdida de propiedades mecánicas que sufren las estructuras porosas al ser extruidas por fabricación aditiva.

Abstract

Many bone-related problems can affect the normal functioning of the skeletal structure. Current treatments have limitations in terms of stability, functionality, durability, and especially regarding the osteointegrative and regenerative capacity of implants with bone. This situation has posed a challenge that has driven the search for new solutions to integrate mechanical support with tissue regenerative capacity within a single system. The development of porous structures allows for the reconstruction of bone tissue in combination with other conventional osteosynthesis systems.

The aim of this Master's Thesis (TFM) is to develop a computational tool to design porous structures that meet mechanical requirements for bending and torsion.

The objects of study are different gyroid porous structures, fabricated using additive manufacturing, which were experimentally studied in a previous study. These structures were based on their 3D geometries created via CAD modeling. These geometries underwent meshing treatment using the design optimization software 3-Matic Research (Materialise, Leuven, Belgium) to make the files compatible with the computational tool Abaqus (Dassault Systèmes Simulia Corp, Providence, USA), which is used for simulating bending and torsion tests through finite element analysis (FEA).

During the simulations, bending tests faced significant challenges in achieving convergence, whereas torsion tests were easier to set up.

Finally, once the results were obtained, comparisons were made between the mechanical behaviors observed in the simulations and those from experimental tests. Large discrepancies were found, with simulations showing superior results to the experimental ones. Consequently, the material properties in the simulations were adjusted to better match the experimentally obtained behaviors. This highlighted the mechanical property loss experienced by porous structures when extruded through additive manufacturing.

Índice

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Huesos	1
1.3 Andamios	3
1.4 Superficie Mínima Triplemente Periódica (TPMS)	4
1.5 Materiales para los andamios	6
1.6 Objetivo del trabajo	7
2. METODOLOGÍA	8
2.1 Diseño de estructuras TPMS giroideas	8
2.2 Modelo de elementos finitos	11
2.2.1 Mallado	11
2.2.2 Material simulado	12
2.2.3 Condiciones de contorno y cargas	14
2.3 Ensayos experimentales	17
2.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS	21
3. RESULTADOS	23
3.1 Resultados de las simulaciones	23
3.2 Comparación comportamiento experimental vs simulado	34
4. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS	41
4.1 Conclusiones	41
4.2 Líneas futuras	42
5. BIBLIOGRAFÍA	43
6. ANEXOS	47
6.1 Comparación del comportamiento experimental vs propiedades teóricas vs propiedades finales	47
6.2 Representaciones gráficas de los problemas obtenidos en las simulaciones de flexión	53

Índice de figuras

Figura 1. Diferencia entre zona esponjosa y zona cortical del hueso. Adaptado de [4]	2
Figura 2. Comportamiento biomecánico de los dos tipos de hueso [5].....	2
Figura 3. Elementos claves en la ingeniería de tejidos [8]	3
Figura 4. Estructura hueso trabecular. Adaptada de [14,15]	4
Figura 5. Tipos de estructuras TPMS. a) Primitiva; b) Diamante; c) IWP; d) Giroidea [22]	5
Figura 6. Ejemplo de estructura porosa hecha por fabricación aditiva [28]	6
Figura 7. a) Estructura giroide normal; b) Probeta giroide normal para torsión; c) Probeta giroide normal para flexión	9
Figura 8. a) Estructura giroide deformada; b) Probeta giroide deformada para torsión; c) Probeta giroide deformada para flexión.....	9
Figura 9. a) Estructura giroide Sheet 69 (S69G); b) Probeta giroide Sheet 69 para torsión; c) Probeta giroide Sheet 69 para flexión	10
Figura 10. a) Estructura giroide Sheet 69 Perf. (S69GP); b) Probeta giroide Sheet 69 Perf. para torsión; c) Probeta giroide Sheet 69 Perf. para flexión	10
Figura 11. a) Estructura giroide Sheet 72 (S72G); b) Probeta giroide Sheet 72 para torsión; c) Probeta giroide Sheet 72 para flexión	10
Figura 12. a) Estructura giroide Sheet 72 Perf.(S72GP); b) Probeta giroide Sheet 72 Perf. para torsión; c) Probeta giroide Sheet 72 Perf. para flexión	10
Figura 13. Método para el cálculo del inicio de fractura [38].....	13
Figura 14. Método de obtención de la distancia hasta la rotura [38]	14
Figura 15. Condiciones de contorno para simular el ensayo de torsión.	15
Figura 16. Ejemplo de ensayo de flexión	16
Figura 17. Zona de contacto elemento de carga del ensayo de flexión	16
Figura 18. Zonas de contactos elementos de apoyo del ensayo de flexión	17
Figura 19. Probetas de torsión. a) NG b) DG c) S69G d) S69GP e) S72G f) S72GP.....	18
Figura 20. Probetas de flexión. a) NG b) DG c) S69G d) S69GP e) S72G f) S72GP.....	18
Figura 21. Máquina de ensayos "TEM/500/MA"	19
Figura 22. Placa de características de la máquina de ensayos"TEM/500/MA"	19
Figura 23. Ejemplo ensayo de torsión experimental	19
Figura 24. Máquina de ensayos "MEM-101/20A-SDC".....	20
Figura 25. Placa de características de la máquina de ensayos "MEM-101/20A.SDC"	20
Figura 26. Ejemplo ensayo de flexión experimental	20
Figura 27. Tensiones de Von Mises (MPa) obtenidas en la simulación del ensayo de torsión. a) NG b) DG c) S69G d) S69GP e) S72G f) S72GP.....	24
Figura 28. Tensiones de Von Mises (MPa) obtenidas en la simulación del ensayo de torsión, sección transversal de la estructura. a) NG b) DG c) S69G d) S69GP e) S72G f) S72GP.....	25
Figura 29. Parámetro de deformación plástica del modelo de daño dúctil (DUCTCRT). a) NG b) DG c) S69G d) S69GP e) S72G f) S72GP	26
Figura 30. Parámetro de deformación plástica del modelo de daño dúctil (DUCTCRT), sección transversal de la estructura. a) NG b) DG c) S69G d) S69GP e) S72G f) S72GP	27
Figura 31. Gráfica Tensión-Deformación de las simulaciones de torsión.....	28
Figura 32. Tensiones de Von Mises (MPa) obtenidos en la simulación del ensayo de torsión. a) NG b) DG c) S69G d) S69GP e) S72G f) S72GP	29
Figura 33. Tensiones de Von Mises (MPa) obtenidos en la simulación del ensayo de flexión, sección transversal de la estructura. a) NG b) DG c) S69G d) S69GP e) S72G f) S72GP.....	30

Figura 34. Parámetro de deformación plástica del modelo de daño dúctil (DUCTCRT). a) NG b) DG c) S69G d) S69GP e) S72G f) S72GP	32
Figura 35. Parámetro de deformación plástica del modelo de daño dúctil (DUCTCRT), sección transversal de la estructura. a) NG b) DG c) S69G d) S69GP e) S72G f) S72GP	32
Figura 36. Gráfica Tensión-Deformación de las simulaciones de flexión	33
Figura 37. Comparación entre comportamiento experimental vs simulado en ensayos de torsión. NG; S69G; S72G.....	34
Figura 38. Comparación entre comportamiento experimental vs simulado en ensayos de torsión. DG; S69GP; S72GP.....	35
Figura 39. Comportamientos experimentales vs simulados de los ensayos de torsión del artículo Timercan et al 2023 [45]	37
Figura 40. Comparación entre comportamiento experimental vs simulado en ensayos de flexión. NG; S69G; S72G	37
Figura 41. Comparación entre comportamiento experimental vs simulado en ensayos de torsión. DG; S69GP; S72GP.....	38
Figura 42. Gráfica de comparación del comportamiento experimental vs propiedades teóricas vs propiedades finales del ensayo de torsión en la estructura NG	47
Figura 43. Gráfica de comparación del comportamiento experimental vs propiedades teóricas vs propiedades finales del ensayo de torsión en la estructura DG	47
Figura 44. Gráfica de comparación del comportamiento experimental vs propiedades teóricas vs propiedades finales del ensayo de torsión en la estructura S69G.....	48
Figura 45. Gráfica de comparación del comportamiento experimental vs propiedades teóricas vs propiedades finales del ensayo de torsión en la estructura S69GP.....	48
Figura 46. Gráfica de comparación del comportamiento experimental vs propiedades teóricas vs propiedades finales del ensayo de torsión en la estructura S72G.....	49
Figura 47. Gráfica de comparación del comportamiento experimental vs propiedades teóricas vs propiedades finales del ensayo de torsión en la estructura S72GP.....	49
Figura 48. Gráfica de comparación del comportamiento experimental vs propiedades teóricas vs propiedades finales del ensayo de flexión en la estructura NG	50
Figura 49. Gráfica de comparación del comportamiento experimental vs propiedades teóricas vs propiedades finales del ensayo de flexión en la estructura DG.....	50
Figura 50. Gráfica de comparación del comportamiento experimental vs propiedades teóricas vs propiedades finales del ensayo de flexión en la estructura S69G	51
Figura 51. Gráfica de comparación del comportamiento experimental vs propiedades teóricas vs propiedades finales del ensayo de flexión en la estructura S69GP	51
Figura 52. Gráfica de comparación del comportamiento experimental vs propiedades teóricas vs propiedades finales del ensayo de flexión en la estructura S72G	52
Figura 53. Gráfica de comparación del comportamiento experimental vs propiedades teóricas vs propiedades finales del ensayo de flexión en la estructura S72GP	52
Figura 54. Ejemplo de desplazamiento trasero durante ensayo de flexión perspectiva diagonal	53
Figura 55. Ejemplo de desplazamiento trasero durante ensayo de flexión perspectiva lateral ..	53
Figura 56. Ejemplo de desplazamiento lateral en ensayo de flexión perspectiva frontal	54
Figura 57. Ejemplo de giro de la probeta desde la perspectiva frontal	54

Índice de tablas

Tabla 1. Resultados de los ensayos de Chenglong et al 2021 [30]	7
Tabla 2. Información de las probetas de torsión	11
Tabla 3. Información de las probetas de flexión	11
Tabla 4. Inicio de fractura de cada probeta para el ensayo de torsión.....	13
Tabla 5. Inicio de fractura de cada probeta para el ensayo de flexión.....	13
Tabla 6. Distancia hasta la rotura de cada probeta para el ensayo de torsión.....	14
Tabla 7. Distancia hasta la rotura de cada probeta para el ensayo de flexión.....	14
Tabla 8. Errores relativos entre el comportamiento experimental y simulado de los ensayos de torsión	35
Tabla 9. Resultados ensayos de torsión de Naghavi et al 2022	36
Tabla 10. Errores relativos entre el comportamiento experimental y simulado de los ensayos de flexión	38
Tabla 11. Resultados ensayos de flexión de Naghavi et al 2022	39

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Existen muchos problemas óseos que pueden afectar el normal funcionamiento de la estructura ósea. Dichos problemas pueden deberse a malformaciones esqueléticas, resecciones tumorales, traumatismos graves o, simplemente, a patologías asociadas al envejecimiento de la población. Los tratamientos actuales presentan limitaciones en cuanto a estabilidad, funcionalidad, durabilidad y, sobre todo, respecto a la capacidad osteointegradora y regenerativa de los implantes con el hueso. Esta coyuntura ha representado un reto, lo que ha motivado la búsqueda de nuevas soluciones que integren en un mismo sistema la función de soporte mecánico con la capacidad regenerativa de los tejidos.

Dentro del tratamiento quirúrgico de grandes defectos segmentarios en huesos largos sometidos a carga (ya sea por una resección tumoral, pseudoartrosis o no uniones), se emplean diferentes técnicas, como el desarrollo de estructuras porosas fabricadas mediante fabricación aditiva, que permiten la reconstrucción del tejido óseo, actuando en combinación con otros sistemas de osteosíntesis convencionales.

Este estudio es la continuación de una investigación sobre estructuras porosas giroideas. Estas estructuras tridimensionales son de gran interés en el ámbito biomédico, ya que su geometría porosa, obtenida a través de una combinación periódica de superficies mínimas, guarda una notable semejanza con la estructura del hueso trabecular. Existen diferentes tipos de superficies mínimas periódicas, y en este caso el enfoque se centra en el tipo giroide, caracterizado por la ausencia de líneas rectas y simetrías planas. Este tipo de estructura favorece una distribución homogénea de tensiones y un comportamiento mecánico similar al del hueso esponjoso. Los objetos de estudio en este trabajo han sido analizados experimentalmente bajo condiciones de flexión y torsión. Dicho estudio fue llevado a cabo en el laboratorio de Biomecánica de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, y la información está recogida en el Trabajo de Fin de Grado titulado “Ensayos mecánicos de flexión y torsión sobre estructuras porosas destinadas a la cirugía regenerativa” [1].

1.2 Huesos

Los huesos se definen como cada uno de los órganos duros que en su conjunto forman el esqueleto. Al ser órganos, están formados por varios tipos de tejidos, siendo el tejido óseo su constituyente principal, que es un tipo de tejido conectivo que se caracteriza por su rigidez y su gran resistencia [2].

Las funciones del sistema esquelético son [3]:

- Soporte de los tejidos blandos.
- Protección de las estructuras delicadas.
- Actúan como palancas en las que se insertan los músculos para permitir movimientos.
- Depósito de sales minerales.
- Producción de células sanguíneas, que tiene lugar en la médula ósea.

A pesar de su apariencia homogénea y sólida, los huesos tienen poros que contienen células vivas y vasos sanguíneos, y dependiendo de la cantidad de poros, se distinguen dos zonas del hueso: la esponjosa o trabecular (muchos poros y en el interior), y la compacta o cortical (pocos poros y en el exterior) (Figura 1) [3].



Figura 1. Diferencia entre zona esponjosa y zona cortical del hueso. Adaptado de [4]

Las diferencias morfológicas de las zonas del hueso hacen que el comportamiento biomecánico, frente a las cargas mecánicas, sea distinto según donde se aplique, de forma que la zona más compacta presenta una mayor flexibilidad, y por contraparte, la zona más porosa tiene una mayor capacidad de deformación (Figura 2) [5].

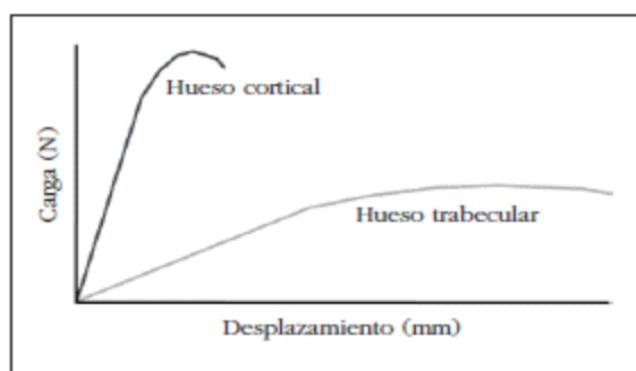


Figura 2. Comportamiento biomecánico de los dos tipos de hueso [5]

Unas de las propiedades más características e importantes de los huesos es su capacidad de autoregenerarse. Los huesos pueden sufrir daños significativos causados por fracturas, tumores o trastornos que, dependiendo de su gravedad, hacer que la propiedad autoregenerativa no sea suficiente para conseguir restaurar todo el tejido dañado. Es a partir de estos problemas que surgió la medicina regenerativa [6].

La medicina regenerativa tiene dos objetivos principales que son: la regeneración del tejido dañado, y el restablecimiento de la función normal del órgano. Dentro de esta rama hay diferentes técnicas que se pueden utilizar, pero en lo que concierne a este trabajo nos centraremos en la ingeniería de tejidos.

La ingeniería de tejidos consiste en cultivar células en una matriz tridimensional enriquecidas con factores de crecimiento, en donde estas células pueden proliferar y así posteriormente el tejido artificial desarrollado se trasplanta al órgano receptor (Figura 3) [7].

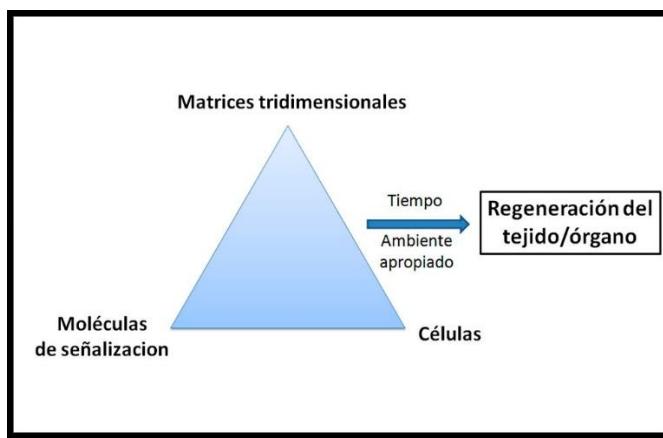


Figura 3. Elementos claves en la ingeniería de tejidos [8]

1.3 Andamios

Las matrices tridimensionales, también conocidas como andamios, o scaffolds en inglés, son estructuras que proporcionan a las células el apoyo necesario para su proliferación e interactúan con éstas durante todo el proceso de regeneración del tejido, proporcionando, junto a las moléculas de señalización, un ambiente y arquitectura similares al tejido óseo [9].

En los últimos años, el uso de andamios para la regeneración de tejidos ha ganado una mayor popularidad, impulsado por el desarrollo de nuevas técnicas para la construcción de matrices tridimensionales. Estas innovaciones permiten obtener diseños más complejos y precisos, lo que supone un avance significativo. Esto es especialmente importante dado que el objetivo principal en el diseño y fabricación de un andamio es replicar de manera fiel la matriz extracelular (MEC) del tejido que se va a reemplazar o modificar. Conseguir una mayor fidelidad en esta imitación es clave para promover una adecuada regeneración y funcionalidad del tejido [10].

En el caso de este trabajo, nos centramos en los andamios destinados para la ingeniería de tejidos óseos, de forma que, para que sean adecuados para el tejido en cuestión, han de cumplir tantos criterios biológicos como criterios estructurales. Dentro de los biológicos la matriz tiene que ser: biocompatible, biodegradable, bioactiva y no tóxica, además de fomentar tanto la adhesión, como la diferenciación y proliferación celular [11].

Por otro lado, desde un punto de vista estructural, la matriz tridimensional tiene que ser capaz de replicar el comportamiento mecánico del hueso para evitar que el andamio genere un efecto de apantallamiento mecánico. Además, es fundamental que promueva la osteoinducción, osteoconductividad y angiogénesis, propiedades que están directamente relacionadas con la porosidad, tamaño del poro, interconectividad de los poros y sobre todo con la topografía de la superficie [12].

Por último, una característica muy importante, que se debe tener en cuenta en el caso de andamios para tejido óseo, es la heterogeneidad del comportamiento mecánico entre la zona trabecular y la cortical del hueso, característica que complica la selección de un material que consiga replicarla, pero sobre todo la recreación de un tipo de estructura que sea capaz de imitar la estructura trabecular (Figura 4) [13].

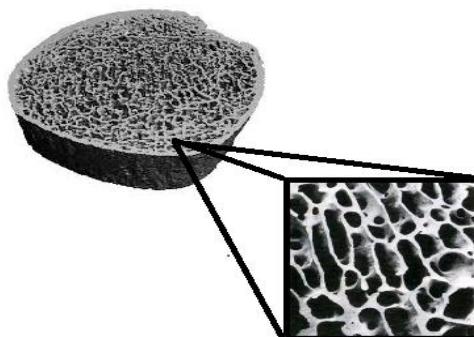


Figura 4. Estructura hueso trabecular. Adaptada de [14,15]

1.4 Superficie Mínima Triplemente Periódica (TPMS)

Las estructuras porosas destinadas para el tejido óseo tienen que afrontar grandes problemas, como la anteriormente nombrada arquitectura del hueso trabecular, así como los asociados a los procesos biológicos del tejido, como el proceso de regeneración. Se necesita de un ambiente mecánicamente estable, además de permitir que todas las células y moléculas involucradas en el proceso de reparación del tejido puedan realizar sus funciones esenciales. Con los avances y el desarrollo de la fabricación aditiva, surge un tipo de andamio, basado en estructuras de Superficie Mínima Triplemente Periódica (TPMS), como una muy buena opción para afrontar estas estructuras [16]. TPMS hace referencia a las superficies mínimas de periodicidad triple que son

matemáticamente estructuras definidas que se repiten en tres dimensiones sin ninguna línea recta y tampoco simetrías planas [17].

Este tipo de superficie están formados por celdas unitarias (Figura 5) cuyas características y escala de longitud permiten controlar sus propiedades mecánicas y físicas, pudiendo recrearlas de forma más precisa gracias a los avances en las técnicas de fabricación aditiva [18].

La posibilidad de tener la capacidad de controlar dichas propiedades permite poder combatir con unos de los mayores problemas al introducir un andamio en el tejido óseo, el apantallamiento o “stress shielding”. Este fenómeno se produce cuando el hueso no recibe las tensiones necesarias, debido a que el implante tiene mayor módulo de elasticidad que el tejido óseo y se va absorbiendo debido a la ausencia de estímulos mecánicos en el hueso. Con estas estructuras se consigue distribuir las tensiones mecánicas en el hueso consiguiendo que se reduzca la pérdida de masa ósea [19].

Otra ventaja de estos tipos de superficies es que, con el control de la celda unitaria, se puede conseguir cumplir con los requisitos geométricos, mecánicos y biológicos para que pueda crecer tejido nuevo dentro de las propias estructuras, uno de los principales motivos de la característica porosidad que presentan [20]. Para conseguirlo se necesita, en términos generales, de una zona central altamente conectada para que las células migren, proliferen y con una gran área superficial para que crezca un tejido fuerte. Por otro lado, no se pueden descuidar las propiedades mecánicas necesarias para soportar las cargas mientras se va formando el nuevo tejido [21].

Existen diferentes tipos de estructuras TPMS, entre los más comunes encontramos primitiva, diamante, IWP y giroidea (Figura 5) [22].

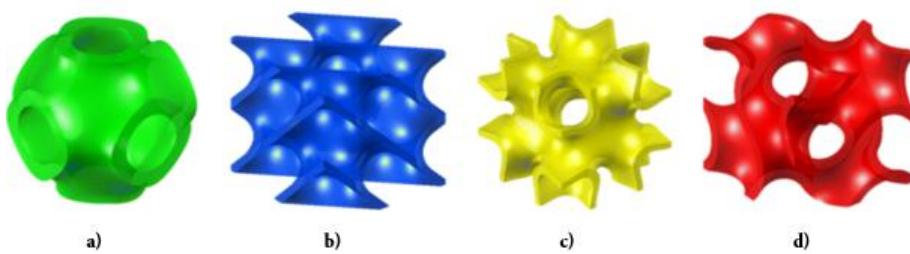


Figura 5. Tipos de estructuras TPMS. a) Primitiva; b) Diamante; c) IWP; d) Giroidea [22]

En este trabajo los objetos de estudio están hecho a partir de giroides, dicha estructura se obtiene a partir de la siguiente ecuación [23]:

$$\sin X \cos Y + \sin Y \cos Z + \cos X \sin Z = C$$

Ecuación 1. Ecuación para la obtención de un giroide

Para generar distintos tipos de estructuras giroides, partimos de la misma ecuación mencionada anteriormente, cambiando los valores asignados a las variables X, Y y Z, lo que nos permite obtener una variedad de tipos de estructuras giroides.

1.5 Materiales para los andamios

En el ámbito biomédico, hay cuatro grupos de materiales que reciben el nombre de “biomateriales”, debido a sus buenas propiedades de compatibilidad con el organismo del ser humano, estos materiales son: polímeros, metales, cerámicas y compuestos [24]. En este estudio, nos centramos en los metales, concretamente en la aleación de titanio Ti-6Al-4V, material con el que están fabricadas las estructuras porosas. Esta aleación es ampliamente utilizada en el estudio de andamios para tejido óseo debido a sus excelentes propiedades biológicas y, especialmente, a sus destacadas propiedades mecánicas, entre las que se incluyen una alta resistencia a la corrosión, baja densidad y notable resistencia mecánica. Sin embargo, estas propiedades mecánicas tan favorables pueden alterar el estado tensional del tejido óseo circundante y favorecer el fenómeno conocido como “Stress Shielding” o “Apantallamiento de Tensiones” [25].

Otro aspecto importante para el uso de este material, que aún con sus buenas propiedades, es compatible con el uso de técnicas de fabricación aditiva, pudiendo obtener una precisión muy alta en la creación de piezas [26]. La fabricación aditiva es la creación de piezas mediante la adición de material capa a capa realizado a partir de la información de un modelo tridimensional [27]. Dentro de este método, en el caso de los andamios, las técnicas que más se usan son: fusión por haz de electrones (Electron Beam Melting, EBM) y la fusión por láser (Selective Laser Melting, SLM) porque son capaces de obtener material metálico altamente poroso consiguiendo una continuidad entre los poros (Figura 6) [28].



Figura 6. Ejemplo de estructura porosa hecha por fabricación aditiva [28]

Hay que destacar que el método de fabricación puede alterar las propiedades mecánicas finales, esto se puede ver evidenciado en diferentes investigaciones, tal y como se describe en el artículo *Huixin et al. 2019* [29], en el que se han desarrollado estructuras porosas giroideas de Ti-6Al-4V

con SLM, y remarcan que la porosidad y la irregularidad de la creación de la estructura afecta de manera directa al comportamiento mecánico reduciendo sus propiedades.

Por otro lado, en el estudio realizado por *Chenglong et al 2021* [30] cuantifican el módulo de Young y límite elástico entre estructuras porosas de Ti-6Al-4V hechas por SLM, y las mismas estructuras simuladas por el método de elementos finitos (MEF). De forma que observan discrepancias (Tabla 1) entre los valores, y lo consideran un fenómeno normal cuando se comparan los ensayos de manera experimental y simulada con este tipo de estructura, en este caso, en ensayos de compresión. Las estructuras de este estudio tienen poros en forma elíptica, pero se estudian diferentes variaciones:

- **SU** = El lado largo de los poros está orientado horizontalmente.
- **SA** = Una fila de poros están orientados verticalmente, y en la siguiente fila están orientados horizontalmente, y así de forma sucesiva.
- **SP** = El área de los poros va en aumento desde la primera fila de la parte superior hasta la parte inferior de la estructura.
- **SAP** = Una fila de poros orientados 45° grados, y en la siguiente fila están orientados 45° grados hacia el otro lado, y así de forma sucesiva.

Tabla 1. Resultados de los ensayos de *Chenglong et al 2021* [30]

	SU	SA	SP	SAP
Módulo de Young en simulación (GPa)	3.51	3.62	3.84	3.98
Módulo de Young en experimental (GPa)	2.7 ± 0.19	2.9 ± 0.21	2.0 ± 0.19	2.9 ± 0.23
Límite de fluencia en simulación (MPa)	103.36	107.48	104.25	121.62
Límite de fluencia en experimental (MPa)	105 ± 3.6	116 ± 4.9	115 ± 4.1	129 ± 6.7

1.6 Objetivo del trabajo

El objetivo de este Trabajo Final de Máster (TFM) es el de desarrollar una herramienta computacional para diseñar estructuras porosas que nos de los requerimientos mecánicos para torsión y flexión. En concreto, se definen los siguientes objetivos específicos:

- Caracterización computacional del comportamiento a torsión y flexión de seis estructuras porosas.
- Comparar el comportamiento mecánico obtenido, en cada una de las anteriores estructuras, con el logrado en los ensayos experimentales, de forma que podamos validar la herramienta.
- Analizar las posibles discrepancias entre los resultados experimentales y computacionales.

2. METODOLOGÍA

2.1 Diseño de estructuras TPMS giroideas

En este TFM se van a estudiar seis tipos de estructuras TPMS. Todos estos tipos de estructuras se derivan de una superficie mínima, la giroide. Para cada tipo de estructura, se utiliza una variación específica de la fórmula principal de dicha superficie mínima. Dentro de estas estructuras, existen dos enfoques principales para crear una estructura sólida, según se detalla a continuación [31]:

- **TPMS-sólida.** Un enfoque que consiste en considerar el volumen de la superficie mínima como la base del sólido. Tiende a ser más densa y con poros más pequeños, similar al hueso. Se le suele nombrar como estructura “TPMS-sólida”.
- **TPMS-lámina.** El otro enfoque consiste en desplazar la superficie mínima a lo largo del eje normal, con el fin de crear una doble capa o lámina, generando como una pared fina. Es una estructura más ligera y con poros más grandes. Se le conoce como estructura “TPMS-lámina”.

Para cada tipo de estructura que se estudia, se diseñan dos modelos diferentes, cada uno adaptado a un tipo de ensayo mecánico: uno destinado específicamente al ensayo de torsión y otro al ensayo de flexión.

La caracterización de las estructuras porosas sigue las normativas ISO 21920-2:2021 e ISO 21920-3:2021, las cuales actualizan y reemplazan las normas derogadas ISO 4288:1996 e ISO 4287:1997, respectivamente. Estas normas establecen los requisitos para la evaluación de parámetros de textura superficial y topografía [32,33].

En este estudio, las estructuras TPMS-sólidas incluyen la Giroide Normal y la Giroide Deformada. La principal diferencia entre ambas radica en la forma del poro: mientras que en la Giroide Normal el poro es esférico, en la Giroide Deformada el poro es elipsoidal, con el radio mayor en la dirección vertical (Figura 7 y 8) [34].

A continuación, se mostrarán las ecuaciones correspondientes a estos dos tipos de estructura TPMS-sólida, así como los modelos utilizados para cada ensayo [35]:

- Giroide Normal (NG)

$$F(x, y, z) = \cos x \sin y + \cos y \sin z + \cos z \sin x + 0.05 (\cos(2x) \cos(2y) + \cos(2y) \cos(2z) + \cos(2z) \cos(2x)) + \text{factor de espesor}$$

Ecuación 2. Ecuación para la obtención de una Giroide Normal

- Giroide Deformada (DG)

$$\begin{aligned}
 F(x, y, z) = & \cos x \sin y + \cos y \sin(z/2) + \cos(z/2) \sin x \\
 & + 0.05 (\cos(2x) \cos(2y) + \cos(2y) \cos(2z) + \cos(2z) \cos(2x)) \\
 & + \text{factor de espesor}
 \end{aligned}$$

Ecuación 3. Ecuación para la obtención de una Giroide Deformada



Figura 7. a) Estructura giroide normal; b) Probeta giroide normal para torsión; c) Probeta giroide normal para flexión

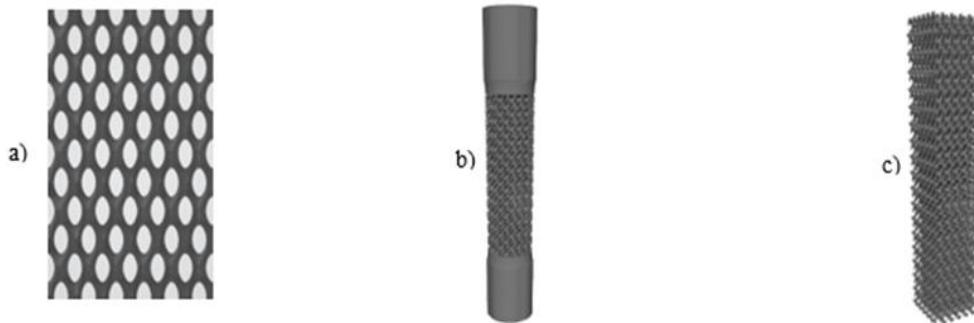


Figura 8. a) Estructura giroide deformada; b) Probeta giroide deformada para torsión; c) Probeta giroide deformada para flexión

Por otro lado, las estructuras TPMS-lámina son la Giroide Sheet y la Giroide Sheet Perf. (de perforada). Si bien ambas presentan variaciones en la porosidad, básicamente corresponden a dos tipos de TPMS-lámina. La única diferencia significativa entre ellas es que las Giroide Sheets Perf. incluyen una serie de agujeros o perforaciones en las paredes. Estas perforaciones se añadieron con el objetivo de aumentar la flexibilidad de la estructura y mejorar su permeabilidad [35]. De estos dos tipos de probetas se han estudiado las porosidades: 69% y 72%. Las estructuras giroideas anteriores tienen un 84% de porosidad aproximadamente.

A continuación, se mostrarán las ecuaciones correspondientes a estos tipos de estructura TPMS-lámina, así como los modelos utilizados para cada ensayo [35]:

➤ Giroide Sheet

$$F(x, y, z) = \cos x \sin y + \cos y \sin z + \cos z \sin x + \text{factor de espesor}$$

Ecuación 4. Ecuación para la obtención de una Giroide Sheet y Giroide Sheet Perf.

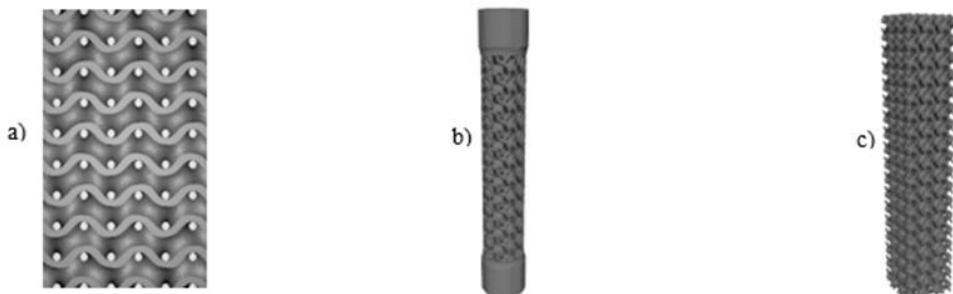


Figura 9. a) Estructura giroide Sheet 69 (S69G); b) Probeta giroide Sheet 69 para torsión; c) Probeta giroide Sheet 69 para flexión

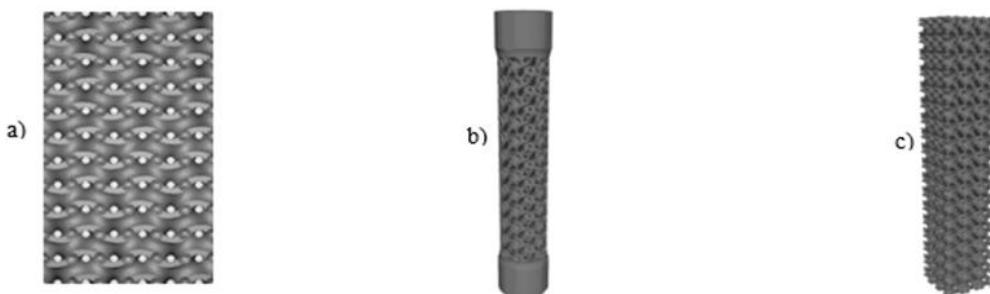


Figura 10. a) Estructura giroide Sheet 69 Perf. (S69GP); b) Probeta giroide Sheet 69 Perf. para torsión; c) Probeta giroide Sheet 69 Perf. para flexión

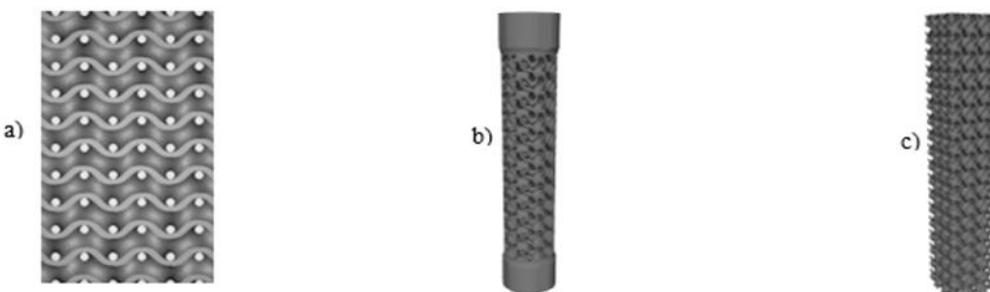


Figura 11. a) Estructura giroide Sheet 72 (S72G); b) Probeta giroide Sheet 72 para torsión; c) Probeta giroide Sheet 72 para flexión

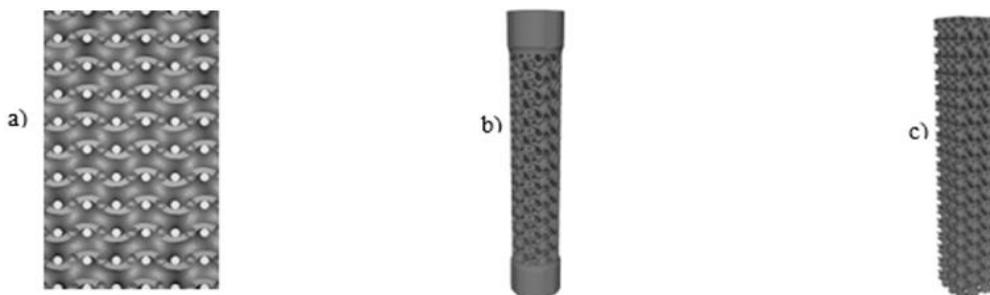


Figura 12. a) Estructura giroide Sheet 72 Perf. (S72GP); b) Probeta giroide Sheet 72 Perf. para torsión; c) Probeta giroide Sheet 72 Perf. para flexión

Por otro lado, al enfocarnos en las características geométricas de las probetas, es importante destacar que estas influyen directamente en su comportamiento mecánico. Por esta razón, resulta

esencial conocer con exactitud sus dimensiones, para que posteriormente se puedan comparar las estructuras entre sí. Los parámetros geométricos más relevantes son los siguientes:

Tabla 2. Información de las probetas de torsión

Tipos	Denominación	Porosidad	Diámetro de la sección (mm)	Longitud zona porosa (mm)
Giroide Normal	NG	84,0%	13,0	48
Giroide Deformada	DG	85,0%	10,0	39
Giroide Sheet	S69G	69,0%	8,4	31
	S72G	72,0%	9,5	38
Giroide Sheet Perf	S69GP	69,0%	8,4	31
	S72GP	72,0%	9,5	38

Tabla 3. Información de las probetas de flexión

Tipos	Denominación	Porosidad	Arista de la sección (mm)	Longitud entre apoyos (mm)
Giroide Normal	NG	84,0%	12,0	50
Giroide Deformada	DG	85,0%	9,8	50
Giroide Sheet	S69G	69,0%	8,4	40
	S72G	72,0%	9,5	40
Giroide Sheet Perf	S69GP	69,0%	8,4	40
	S72GP	72,0%	9,5	40

2.2 Modelo de elementos finitos

Para la creación del modelo de elementos finitos se parte de los archivos, “STL”, creados en el apartado 2.1. Son un tipo de formato de archivo informático de diseño asistido por computador (CAD) que define la geometría de los objetos 3D [36]. Este formato de archivo se puede observar desde la figura 7 hasta la figura 12, en las que el objeto central es el archivo STL para flexión, y el objeto de la derecha es el archivo STL para torsión. Es importante señalar que los archivos empleados son los mismos que se utilizaron para la impresión 3D de las estructuras.

2.2.1 Mallado

El primer paso para obtener el modelo de elementos finitos, es realizar un mallado a todos los archivos STL. Un mallado hace referencia al proceso que permite dividir una estructura en un conjunto de elementos finitos que pueden ser analizados de forma independiente [37]. En este

estudio se ha realizado el proceso de mallado con la herramienta 3-Matic Research (Materialise, Lovaina, Bélgica) en el que se utilizó un elemento tetraédrico de 4 nodos (C3D4) como aproximación lineal, y un tamaño de elemento con un balance adecuado entre precisión y tiempo de cálculo. No se han utilizado elementos con aproximación cuadrática (C3D10) por el incremento que suponen en grados de libertad, y por lo tanto, de coste computacional. La cantidad de elementos de mallado utilizados, tanto para las estructuras de torsión, como para las estructuras de flexión, oscilan entre los 650.000 - 950.000 elementos.

2.2.2 Material simulado

Con las estructuras malladas, se introducen en el software de elementos finitos Abaqus (Dassault Systèmes Simulia Corp, Providence, USA), en el que se desarrollará la confección de ambas simulaciones y en las cuáles se utilizó un análisis estático no lineal debido a la complejidad del comportamiento del material propuesto.

El material de los andamios se ha modelado con un comportamiento elasto-plástico con las siguientes características:

- Módulo de Young: 65 GPa
- Coeficiente de Poisson: 0,3
- Límite elástico: 600 MPa
- Resistencia máxima: 700 MPa

Además de las propiedades exclusivas del material, se implementó el modelo de daño dúctil intrínseco de Abaqus, con el fin de representar el proceso de degradación del material bajo cargas extremas. Es un modelo que permite recrear bien el comportamiento experimental, ya que las probetas se ensayaran hasta rotura. Los parámetros para incorporar este daño estructural son los siguientes [38]:

- Estado triaxial de tensiones: en el caso de la torsión es -1 y en flexión 1
- Velocidad de ensayo: en ambos tipos de ensayo se usó $0,01 \text{ s}^{-1}$
- Inicio de fractura: valor dependiente del ensayo experimental (ver tabla 4 y 5)

Este parámetro se saca a partir de las curvas experimentales, siguiendo las gráficas de la figura 13. En la gráfica se puede observar como a partir de la pendiente de la zona elástica, o módulo de Young, se saca la distancia de inicio de fractura, trasladando esa pendiente hasta el punto de máxima tensión de la curva, y tomando el punto que corta con el eje horizontal como valor del parámetro. La gráfica de referencia pertenece al estudio de *Wagner et al 2021* [38]. Para ambos tipos de ensayos, el valor del parámetro es adimensional.

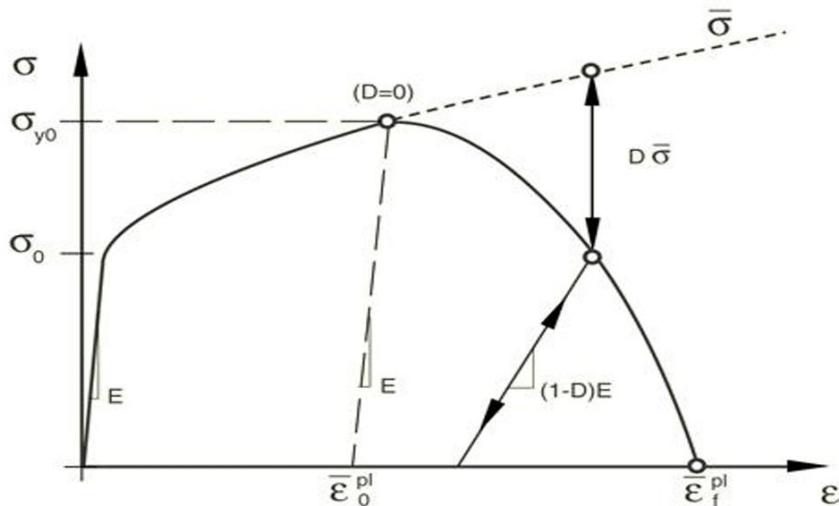


Figura 13. Método para el cálculo del inicio de fractura [38].

Tabla 4. Inicio de fractura de cada probeta para el ensayo de torsión

Torsión						
Probeta	NG	DG	S69G	S69GP	S72G	S72GP
Inicio de fractura	0,01	0,02	0,05	0,05	0,05	0,05

Tabla 5. Inicio de fractura de cada probeta para el ensayo de flexión

Flexión						
Probeta	NG	DG	S69G	S69GP	S72G	S72GP
Inicio de fractura	0,15	0,15	0,20	0,20	0,20	0,20

- Distancia hasta la rotura: valor dependiente del ensayo experimental

Este parámetro es complementario con el anterior, inicio de fractura, debido a que corresponde a la distancia desde el punto inicio de fractura, hasta la rotura total de la pieza. En la siguiente gráfica, figura 14, se puede observar de manera más clara, la distancia que corresponde este parámetro [38]. Este parámetro es orientativo, debido a que solo afecta al comportamiento posterior al límite de rotura del material, y en este estudio se comparan las estructuras hasta el límite de rotura.

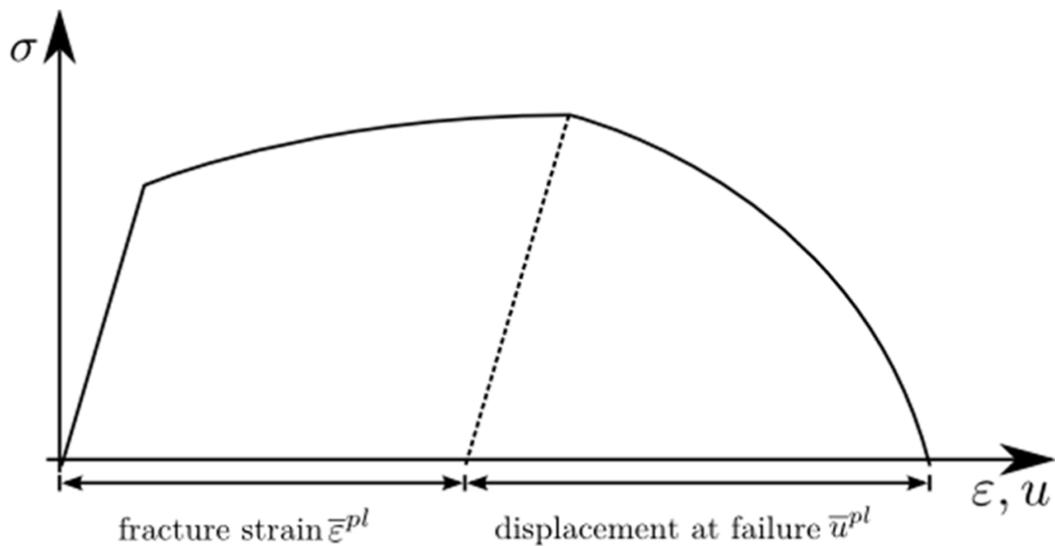


Figura 14. Método de obtención de la distancia hasta la rotura [38]

Tabla 6. Distancia hasta la rotura de cada probeta para el ensayo de torsión

Torsión						
Probeta	NG	DG	S69G	S69GP	S72G	S72GP
Inicio de fractura (mm)	0,20	0,20	0,40	0,40	0,40	0,40

Tabla 7. Distancia hasta la rotura de cada probeta para el ensayo de flexión

Flexión						
Probeta	NG	DG	S69G	S69GP	S72G	S72GP
Inicio de fractura (mm)	0,40	0,40	0,50	0,50	0,50	0,50

2.2.3 Condiciones de contorno y cargas

En la actualidad no existe ninguna norma ISO o UNE que regule los ensayos de flexión y torsión en estructuras porosas, por lo que se sigue la norma internacional que establece unas pautas sobre dichos ensayos para que se tenga un respaldo a la hora de la realización de estos. Para el ensayo de flexión se sigue la norma ASTM C1674, y para torsión se sigue la norma ASTM E 143 [39,40].

A continuación, se mostrarán las condiciones de contorno y cargas para cada ensayo.

➤ Torsión

El ensayo de torsión es más sencillo que el de flexión, ya que no requiere el uso de elementos auxiliares y no hay que simular el contacto. En este caso, se impone una condición de empotramiento en uno de los extremos lisos de la estructura, lo que significa, que dicho extremo no puede desplazarse ni rotar en ninguno de los tres ejes. En el extremo opuesto, se aplica un control en el desplazamiento (rad), una rotación en el eje Z, que induce el efecto de torsión. La magnitud del giro aplicado corresponde al valor del giro aplicado en el ensayo experimental, así como se indica en la tabla 6 (Figura 15).

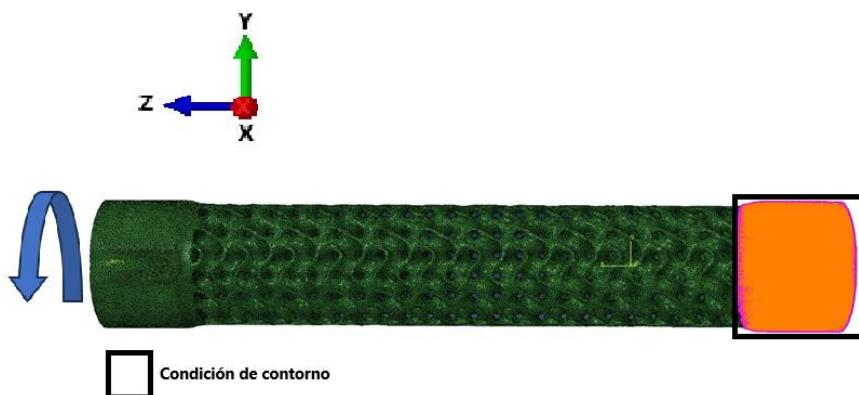


Figura 15. Condiciones de contorno para simular el ensayo de torsión.

➤ Flexión

El ensayo de flexión que se simuló es el de tres puntos, dos puntos de apoyo y un punto donde se aplica la carga (Figura 16). El punto en el que se aplica la carga es el centro geométrico de la estructura, y se aplica haciendo uso de un elemento auxiliar de forma cilíndrica. En el caso de los apoyos, como se indica en la tabla 3, están separados entre sí una cierta distancia, cuya mediatrix es el centro geométrico de la estructura, de esta forma se encuentran a una misma distancia del punto de carga (Figura 16). Aclarar que la distancia de los apoyos es la misma que en los ensayos experimentales.

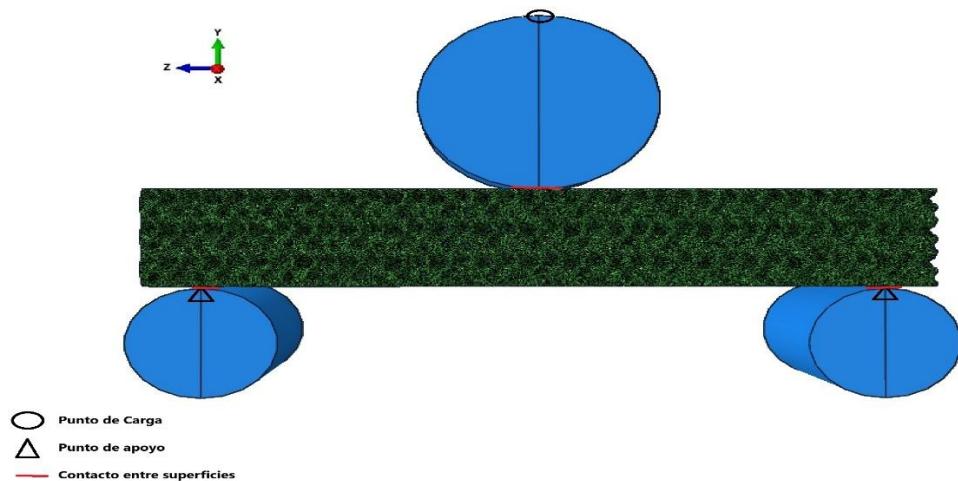


Figura 16. Ejemplo de ensayo de flexión

Los elementos auxiliares que se observan en la figura 16, se utilizaron para recrear el ensayo de flexión de la forma más fidedigna posible, utilizando las mismas formas geométricas que en el ensayo experimental correspondiente. Para que dichos elementos, interactúen con la estructura porosa, hubo que añadirles un contacto con dicha estructura (Figura 17 y 18). El contacto que se añadió fue “surface-to-surface” con un coeficiente de fricción tangencial bajo, puesto que las superficies son lisas y no tienen mucha fricción entre sí. El valor arbitrario utilizado es 0,15 [41].

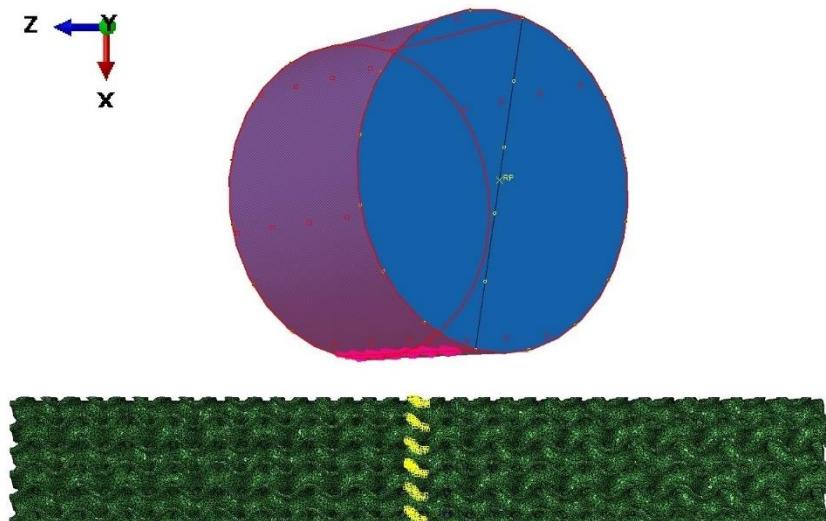


Figura 17. Zona de contacto elemento de carga del ensayo de flexión

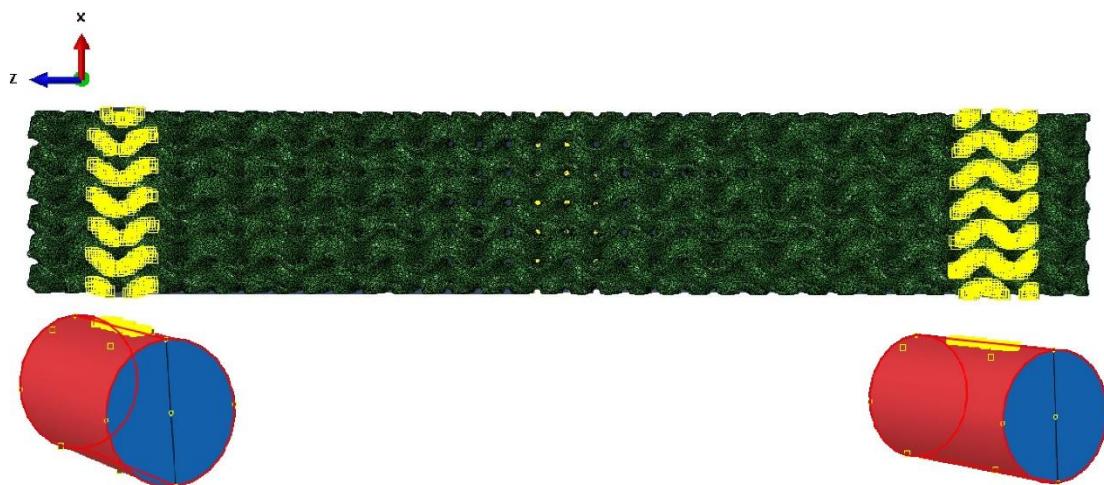


Figura 18. Zonas de contactos elementos de apoyo del ensayo de flexión

Por otro lado, es importante indicar las condiciones impuestas a cada uno de estos elementos auxiliares. Al elemento que aplicará la carga, se le impuso un control en el desplazamiento (mm), haciendo que únicamente se pueda desplazar en el eje Y. La magnitud de desplazamiento aplicado corresponde al valor del desplazamiento aplicado en el ensayo experimental, así como se indica en la tabla 7 (Figura 16). Con respecto a los elementos de apoyos, se les imponen una condición de “Encastre” o “Empotramiento” que significa que tienen una restricción total del movimiento, por lo que se quedan inmóviles con respecto a todos los ejes.

2.3 Ensayos experimentales

En este Trabajo Fin de Máster, como ya se ha comentado en el apartado de antecedentes, es una continuación de un estudio realizado en el grupo de investigación Biomaterials and Biomechanics Research Group del departamento de Biomecánica de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Dicho estudio es sobre la caracterización mecánica de diferentes tipos de estructuras porosas giroideas destinadas a la cirugía regenerativa, y la información precedente, a este estudio, está recogida en el Trabajo de Fin de Grado titulado “Ensayos mecánicos de flexión y torsión sobre estructuras porosas destinadas a la cirugía regenerativa” [1].

Las probetas porosas fueron creadas por el Instituto Tecnológico de Canarias (ITC) con una máquina de fusión selectiva por láser (Selective Laser Melting, SLM), utilizando polvos metálicos de Ti-6Al-4V. Las propiedades mecánicas teóricas de este material son las siguientes [42,43,44]:

- Módulo de Young: 110 GPa
- Coeficiente de Poisson: 0,33
- Límite elástico: 950 MPa
- Límite de rotura: 1200-1500 MPa

Las probetas en cuestión se muestran en la Figura 19 y Figura 20:

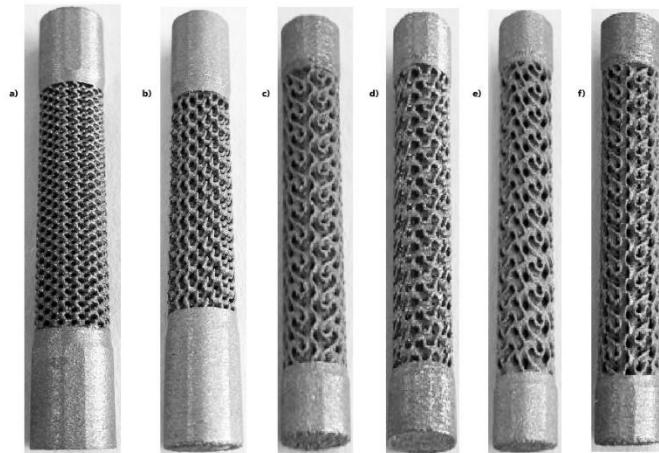


Figura 19. Probetas de torsión. a) NG b) DG c) S69G d) S69GP e) S72G f) S72GP

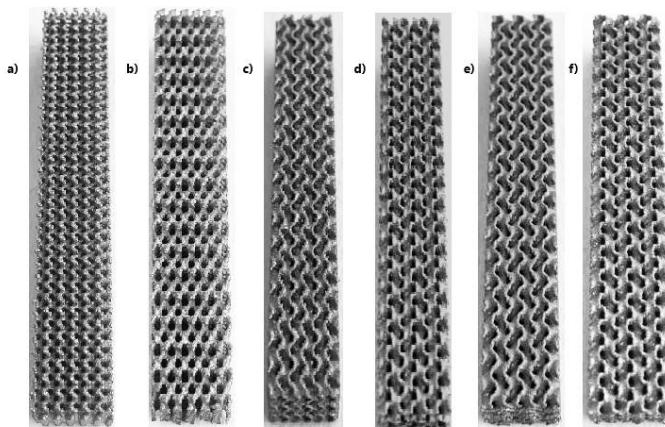


Figura 20. Probetas de flexión. a) NG b) DG c) S69G d) S69GP e) S72G f) S72GP

Los ensayos se realizan en el laboratorio del departamento de Biomecánica de la ULPGC, cuyas máquinas de ensayos fueron las siguientes [1]:

➤ Torsión

Máquina de los ensayos de torsión, sistema de ensayos S.L. modelo “TEM/500/MA”. Es una máquina destinada únicamente a torsión (Figura 21 y Figura 22).



Figura 21. Máquina de ensayos "TEM/500/MA"



Figura 22. Placa de características de la máquina de ensayos "TEM/500/MA"

El ensayo de torsión no requiere de una preparación tan detallada como en el de flexión, ya que las probetas están diseñadas con una zona específica para ser acopladas en la máquina. Hay que asegurarse que la probeta esté bien fijada en las mordazas para evitar deslizamientos (Figura 23).

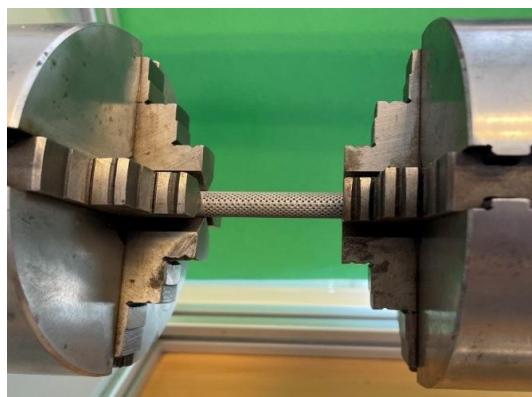


Figura 23. Ejemplo ensayo de torsión experimental

➤ Flexión

Máquina de los ensayos de flexión, Microtest máquina de ensayos, modelo "MEM-101/20A-SDC" (Figura 24 y Figura 25).



Figura 24. Máquina de ensayos "MEM-101/20A-SDC"



Figura 25. Placa de características de la máquina de ensayos "MEM-101/20A-SDC"

En el ensayo, se usó un soporte ajustable por las diferencias de tamaño entre las probetas, de forma que se pueda medir con presición las distancia entre los apoyos para los cálculos posteriores. La máquina aplicaba la fuerza mediante un rodillo, y para evitar daños en la superficie porosa de las probetas, se colocó un trozo de madera, entre el rodillo y la probeta, para permitir una distribución más homogénea de la carga, evitando roturas parciales y garantizando que el ensayo se completara de manera exitosa (Figura 26). Esta pieza de madera no se ha incorporado a las simulaciones al no disponer información del material de la misma.



Figura 26. Ejemplo ensayo de flexión experimental

Para cada modelo de estructura analizada, se utilizaron un total de seis probetas, distribuidas en tres para torsión y tres para flexión. Se hicieron varios ensayos para obtener un valor medio representativo para cada ensayo, minimizando los posibles errores experimentales que se puedan cometer durante el desarrollo de los mismos, de esta forma se obtiene una mayor fiabilidad en los resultados.

Los resultados obtenidos en los ensayos experimentales se mostrarán junto con los resultados de las simulaciones en el capítulo correspondiente. De forma

2.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para el análisis y el tratamiento de las simulaciones se han tomado, en el caso de torsión, los parámetros: desplazamiento rotacional (eje Z) y el momento de reacción (eje Z). Y, por otro lado, en el caso de la flexión, los parámetros: desplazamiento vertical (Eje Y) y fuerza de reacción (Eje Y). Estos parámetros se tomaron en los nodos en los que se aplicaban dichas condiciones de contorno y se exportaron a Excel (Versión 2022, Microsoft, Redmond WASH).

Para poder comparar las estructuras entre sí, se pasaron todos los resultados a tensión-deformación, obteniendo dichos parámetros a través de las siguientes fórmulas [41]:

- Torsión

- Tensión (σ)

$$\sigma = \frac{RM \times r}{(\frac{\pi}{2} \times r^4)}$$

RM: es el momento de reacción, en Newton milímetros

r: es el radio de la sección transversal de la estructura, en milímetros

- Deformación (ϵ)

$$\epsilon = \frac{UR \times r}{L}$$

UR: es el desplazamiento de giro, en radianes

r: es el radio de la sección transversal de la estructura, en milímetros

L: es la longitud de la estructura, en milímetros

- Flexión

- Tensión (σ)

$$\sigma = \frac{3 \times RF \times La}{2 \times I^3}$$

La: distancia entre apoyos

RF: es la fuerza de reacción, en Newtons

I: es la arista de la sección, en milímetros

- Deformación (ε)

$$\varepsilon = \frac{U}{l}$$

U: es el desplazamiento vertical, en milímetros

l: es la arista de la sección, en milímetros

3. RESULTADOS

En este capítulo se van a mostrar y comentar los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas, pero previamente a eso, hay que aclarar que, durante la realización de este estudio, hubo discrepancias con respecto a las propiedades del material utilizado.

Como se expone en el capítulo 2 (apartados 2.2 y 2.3), las propiedades teóricas y finales utilizadas en este estudio son diferentes. Esta diferencia se debe a que inicialmente, las propiedades teóricas del material no coincidían con los resultados experimentales. Esto generó discrepancias significativas en las simulaciones, lo que nos llevó a ajustar las propiedades hasta alcanzar valores más consistentes, tanto en los ensayos de torsión como en los de flexión (Anexos). Las diferencias eran muy grandes, por lo que hubo que replantearse que las propiedades introducidas, eran muy superiores a las que en realidad le correspondía al material de la simulación.

A partir de esos valores incongruentes, se comenzó a determinar las propiedades correspondientes al material, que reflejaba una mayor similitud con los ensayos experimentales, tanto en flexión como en torsión, hasta que se obtuvieron las propiedades que se han indicado en capítulos anteriores (Sección 2.2). Los resultados anómalos que nos han llevado a tomar esta decisión, se aportarán en los anexos del documento.

Tras haber aclarado las discrepancias entre las propiedades del material simulado, con el experimental, se expondrán los resultados obtenidos en las simulaciones.

3.1 Resultados de las simulaciones

- Torsión

A continuación, se muestra la representación gráfica de los resultados obtenidos en las simulaciones correspondientes a los ensayos de torsión. En las siguientes imágenes se muestran los valores de tensión de Von Mises, expresados en MPa, para las diferentes estructuras analizadas. En la primera de ella se ven las estructuras completas, figura 27, y en la segunda imagen se ven las estructuras habiéndoles hecho un corte transversal a la sección, figura 28.

Se puede observar, en la figura 27, que las estructuras clasificadas dentro de las TPMS-láminas tienen muchas zonas sometidas a la tensión máxima de la escala (700 MPa), especialmente las S69G y S72G. En cambio, las estructuras clasificadas como TPMS-sólidas, tienen muchas zonas por debajo de la tensión máxima, siendo la NG la que tiene la menor cantidad de zonas en tensión máxima.

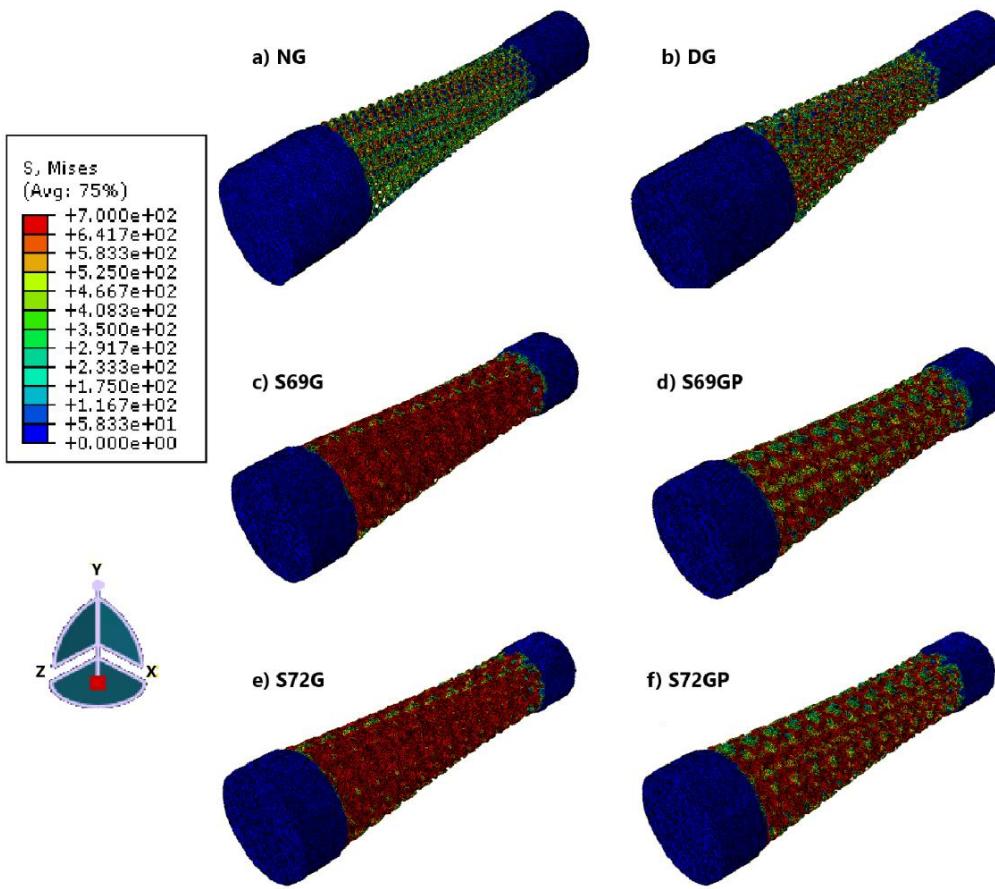


Figura 27. Tensiones de Von Mises (MPa) obtenidas en la simulación del ensayo de torsión. a) NG b) DG c) S69G d) S69GP e) S72G f) S72GP

A partir de la sección transversal de la estructura (figura 28), se reafirman las apreciaciones acerca de que las estructuras TPMS-láminas, tienen muchas zonas a tensión máxima, ya no solo en la superficie exterior, sino de forma volumétrica. Además, se puede observar de forma más clara, que la estructura que soporta menos tensiones es la NG.

Por otro lado, se puede observar que hay un patrón acerca de las zonas que se encuentran expuestas a más tensión, que se repite en todas las estructuras, pero sobre todo se aprecia más en las TPMS-sólidas. Este patrón muestra que las tensiones van de forma progresiva desde el exterior hacia el interior de la estructura, siendo siempre la zona con menor tensión la central.

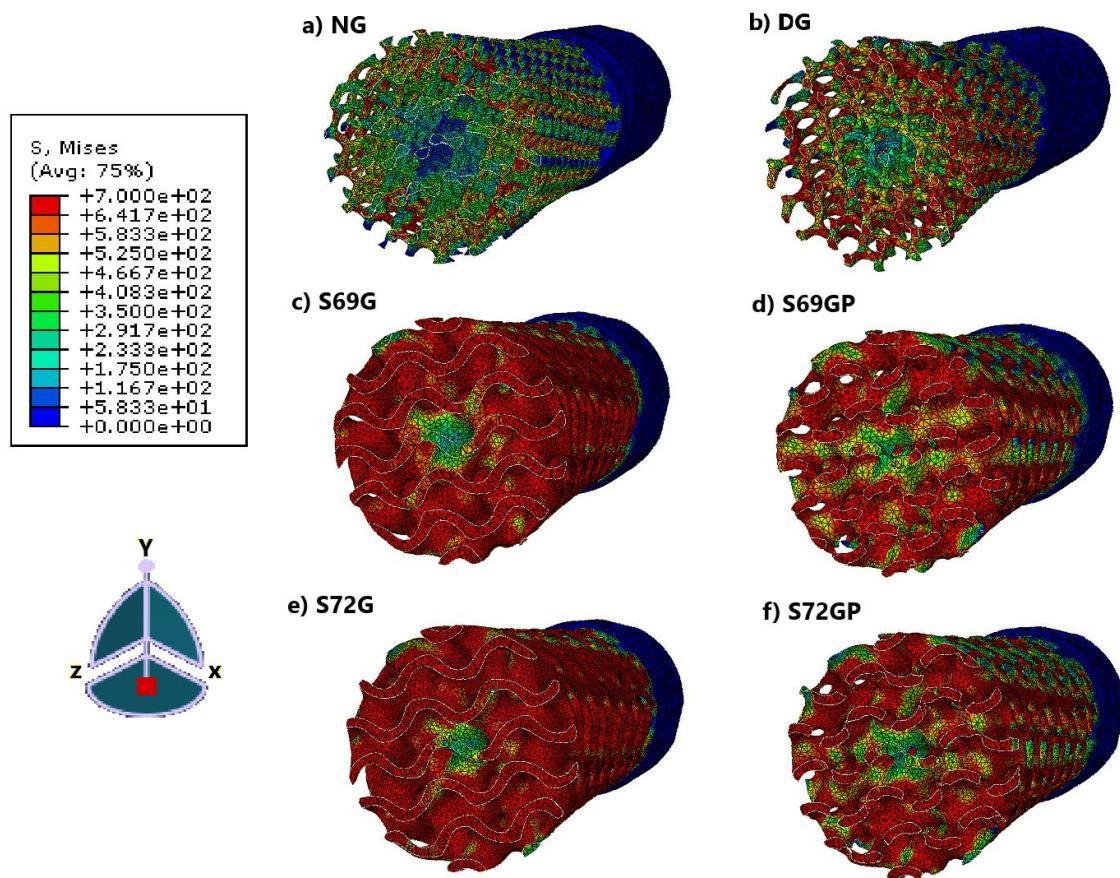


Figura 28. Tensiones de Von Mises (MPa) obtenidas en la simulación del ensayo de torsión, sección transversal de la estructura. a) NG b) DG c) S69G d) S69GP e) S72G f) S72GP

Para poder observar las deformaciones plásticas que han sufrido las estructuras, se va a mostrar los valores obtenidos del parámetro correspondiente al criterio del inicio del daño, que en este caso es el criterio de inicio de daño dúctil (DUCTCRT), debido a que es el que se corresponde al modelo de daño utilizado en este estudio. Este daño se obtiene a partir del comportamiento plástico del material y del valor del inicio de fractura que se ha puesto.

En la figura 29, como era de esperar a partir de lo observado en las tensiones de Von Mises, las estructuras TPMS-sólidas son las que muestran menores zonas dentro del rango de deformación plástica, siendo la NG la que menos, aunque alcanza el límite de rotura. Por otro lado, dentro de las estructuras TPMS-láminas, son las Sheet Perforadas, las que mayores cantidades de zonas de deformación plástica máxima presentan, aunque eso se puede apreciar más en la figura 30, donde se observan las secciones transversales de las estructuras.

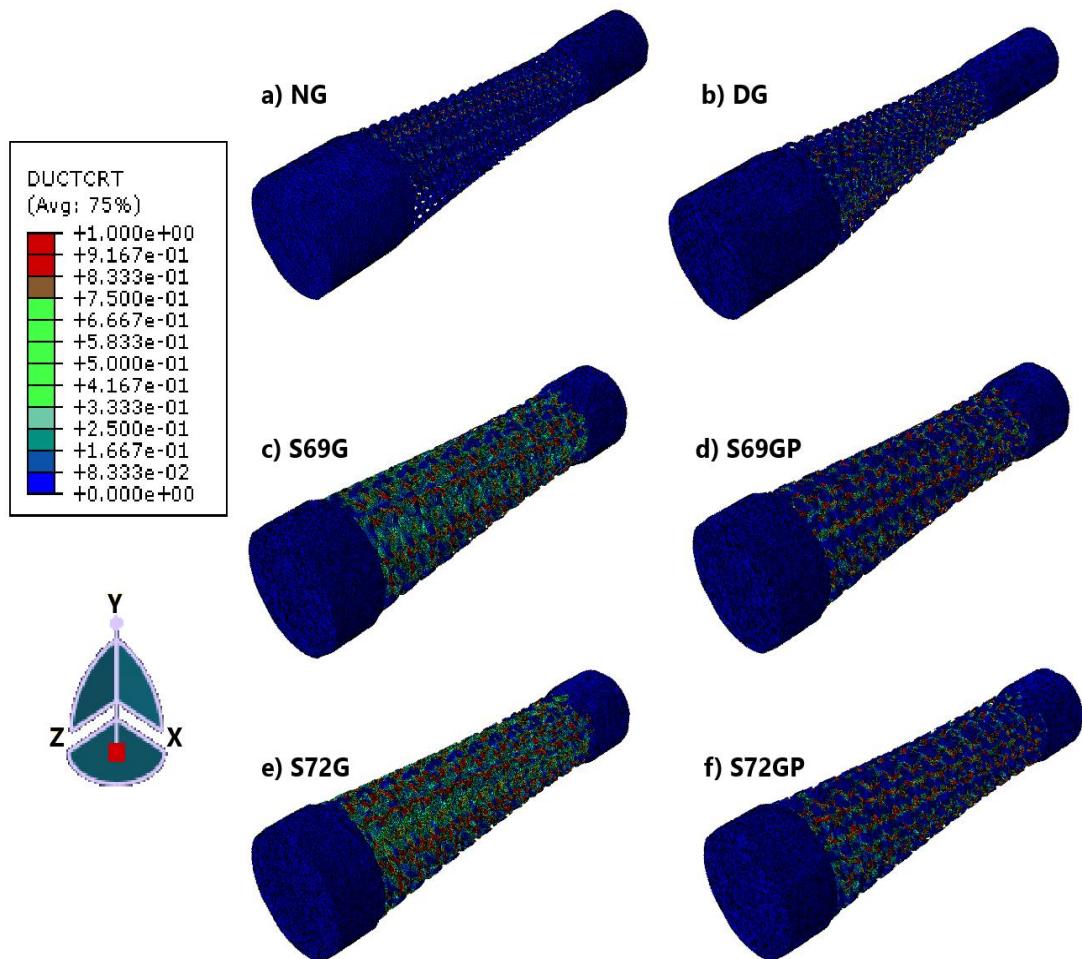


Figura 29. Parámetro de deformación plástica del modelo de daño dúctil (DUCTCRT). a) NG b) DG c) S69G d) S69GP e) S72G f) S72GP

En la figura 30, se aprecia de forma más clara la distribución del daño en cada estructura. En la NG el daño es muy puntual, casi inexistente, y concentrado en el exterior, quedándose la zona central carente de daño, pero en el daño puntual se observa que llega a alcanzar deformaciones plásticas máximas. A su vez, la DG si presenta un anillo exterior de sección con más cantidades de daño acumulado, aunque manteniendo esa zona central con casi ningún daño.

Mientras tanto, en el caso de la S69G y la S72G, se aprecia que muchas más zonas con daño acumulado, éstas también están concentradas en el exterior de la sección, pero el radio de la parte central sin daño, es mucho más pequeño que en los dos casos anteriores. También se puede apreciar que hay una mayor cantidad de daño con deformación plástica máxima.

Por último, las estructuras S69GP y S72GP, presentan menos cantidades de zonas con daño acumulado, en comparación de sus homónimas estructuras Sheet, pero se aprecia una mayor cantidad de zonas con deformaciones plásticas máximas, e incluso estas estructuras son las que

muestran mayor profundidad del daño, siendo la zona sin daño de la parte central de la sección mucho más pequeña.

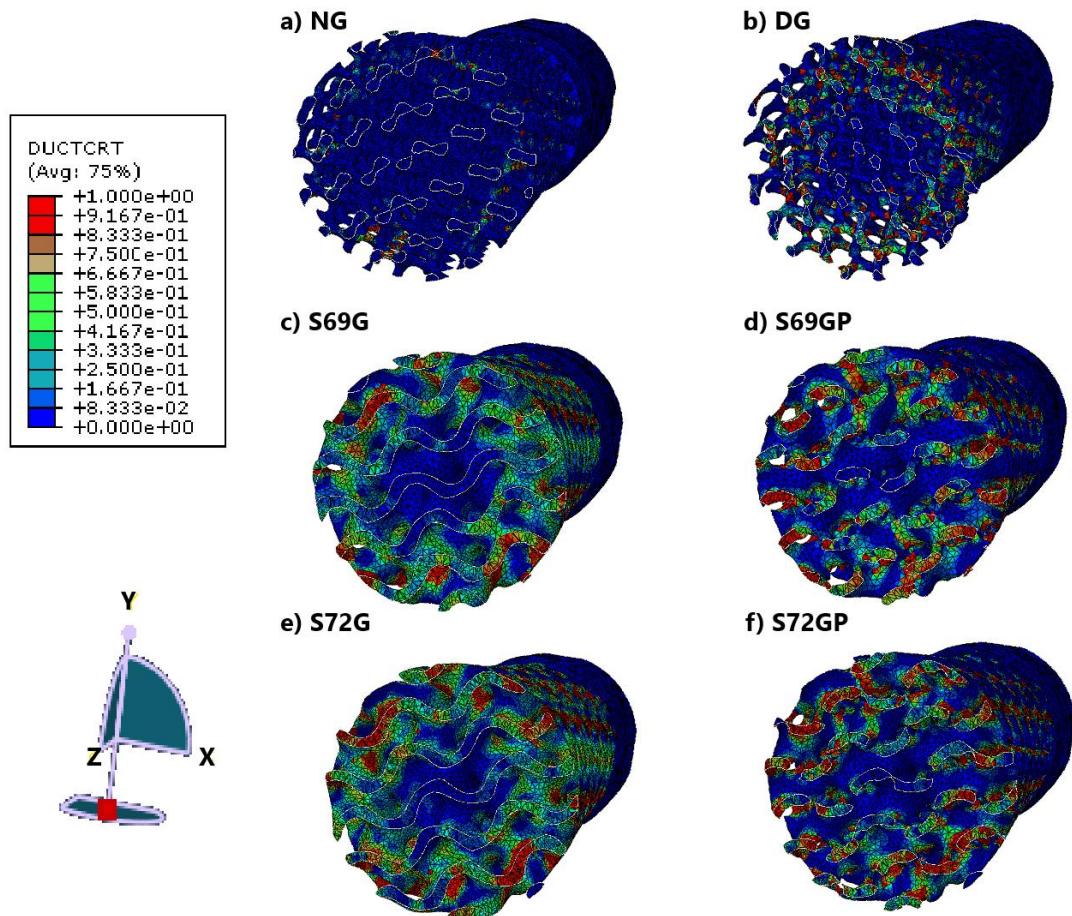


Figura 30. Parámetro de deformación plástica del modelo de daño dúctil (DUCTCRT), sección transversal de la estructura. a) NG b) DG c) S69G d) S69GP e) S72G f) S72GP

Para poder analizar de manera más objetiva el comportamiento entre las estructuras, se generó una gráfica Tensión-Deformación, utilizando las fórmulas y parámetros que se nombran en el capítulo anterior, en la que se observan todas las líneas de comportamiento de las probetas (Figura 31).

En esta gráfica se puede observar a simple vista una gran diferencia de comportamiento entre las estructuras NG (azul oscuro) y DG (verde), con respecto a las variaciones Sheet Gyroid. Además, se aprecia un patrón entre las TPMS-láminas, puesto que las que son Sheet normales, tienen un comportamiento muy parecido entre sí, y las Sheet perforadas también. Estos comportamientos son parecidos a lo que se ha podido observar con anterioridad en los resultados.

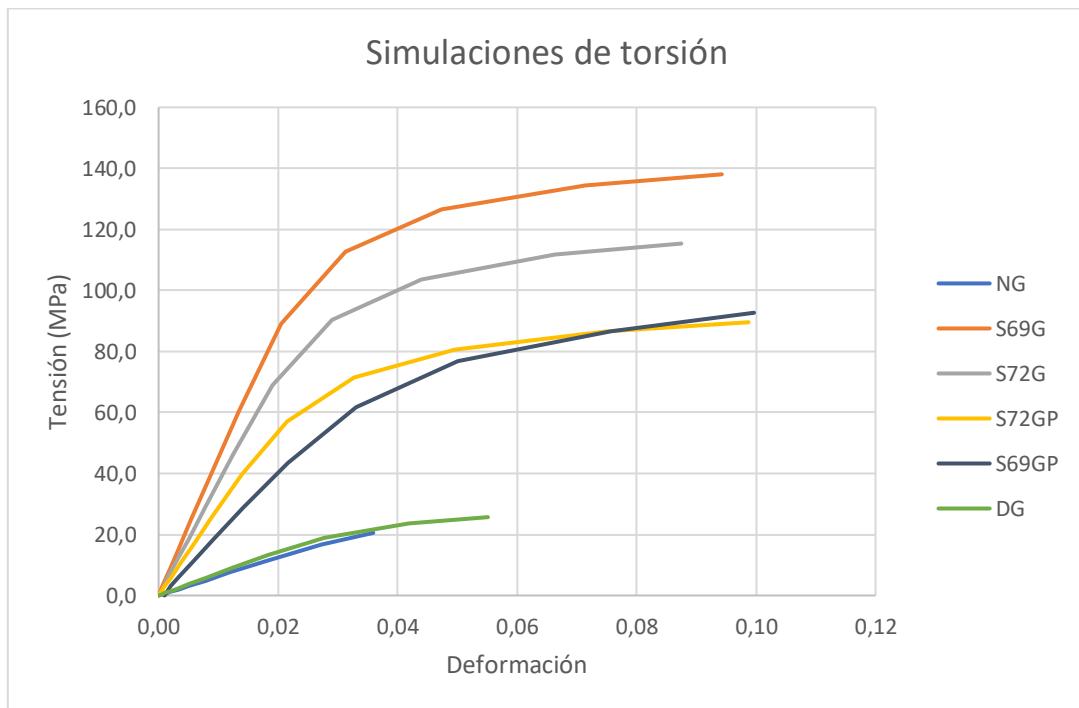


Figura 31. Gráfica Tensión-Deformación de las simulaciones de torsión

Se puede contrastar con la gráfica, como las estructuras que menos tensiones presentaban en el mapa de tensiones (NG y DG), son las que más abajo quedan. Además, también son las estructuras que menos cantidades de daño acumulado presentaban, por lo que se en la gráfica se puede apreciar que son las que menos deformaciones tienen, siendo éstas mucho más frágiles que las otras.

Por otro lado, todas las estructuras Sheet Gyroid, presentan un comportamiento mucho más dúctil, presentando una buena resistencia a la torsión. Dentro de estas estructuras, como se ha comentado previamente, las TPMS-láminas que son iguales, pero de distinta porosidad, presentan un comportamiento similar, siendo las Sheet Gyroid, las que mejores propiedades presentan.

Entre estas dos, S69G y S72G, se observa una clara diferencia, siendo la S69G la que mejores propiedades mecánicas presenta, comportamiento que se puede prever, debido a que, al tener menos porosidad, tiene una mayor densidad del material y ayuda a poder resistir mejor el ensayo de torsión.

Por otro lado, en el caso de las probetas S69GP y S72GP, el comportamiento es inverso a lo largo de la mayoría de la curva, siendo la S72GP la que mayor resistencia presenta en la zona elástica y parte de la plástica. Aun así, es la S69GP la que mejores propiedades mecánicas presenta, pero la diferencia es muy pequeña.

En resumen, con estos resultados, se puede observar como con las simulaciones se han obtenido valores coherentes y razonables, observándose las diferencias entre los tipos de TPMS, así como la lógica de comportamiento entre sí, que más adelante se podrá verificar con el comportamiento experimental.

- Flexión

Como en el caso de la torsión, se va a mostrar la representación gráfica de los resultados obtenidos en las simulaciones correspondiente a los ensayos de flexión, utilizando la tensión de Von Mises para comparar (Figura 32 y Figura 33).

Antes de mostrar los resultados gráficos, hay que aclarar que a la hora de poder simular y recrear el ensayo de flexión de tres puntos, se presentaron muchos problemas para poder hacer converger las simulaciones debido a la presencia de varias superficies de contacto que suponían una alta no linealidad del problema, y una vez calculados, se obtenían desplazamientos incoherentes de la estructura (Anexos). Se manifestaron problemas que no se pudieron solucionar sin tener que involucrar las condiciones del ensayo, por lo que hubo que añadir unas condiciones de contorno en los extremos de las probetas para que la probeta no se desplazara en los ejes del plano perpendicular a la dirección en la que se aplica la carga (Eje X y Eje Z).

Estos problemas de desplazamiento ilógicos de la probeta (Anexos) no se pudieron solucionar de otra forma, por lo que en las imágenes a continuación (Figura 32 y 33) se observará como las probetas presentan tensión en los extremos debido a esa restricción de movimiento impuesta.

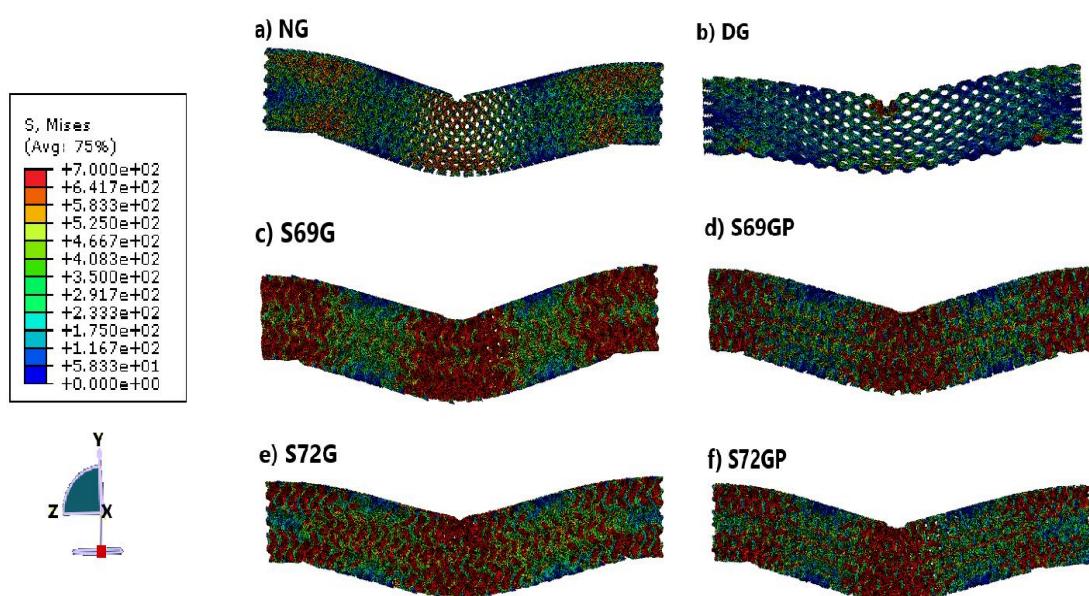


Figura 32. Tensiones de Von Mises (MPa) obtenidos en la simulación del ensayo de torsión. a) NG b) DG c) S69G d) S69GP e) S72G f) S72GP

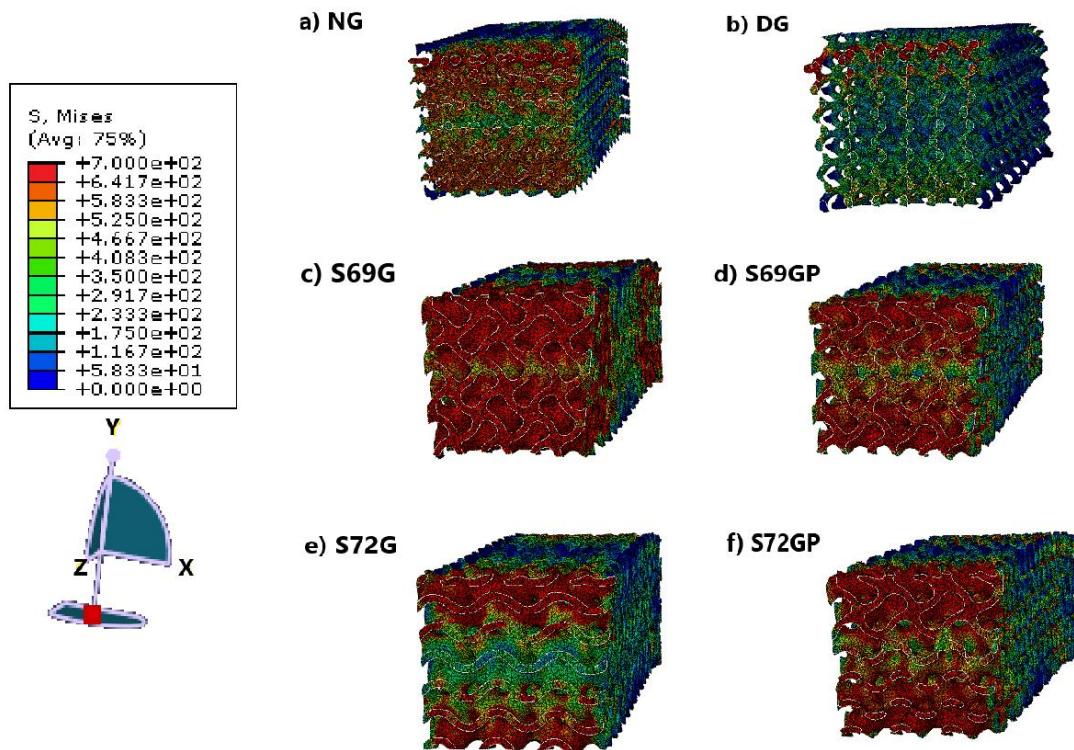


Figura 33. Tensiones de Von Mises (MPa) obtenidos en la simulación del ensayo de flexión, sección transversal de la estructura. a) NG b) DG c) S69G d) S69GP e) S72G f) S72GP

Como se puede apreciar, de manera general, en todas las estructuras se remarca que la zona más crítica es la parte central, siendo ésta la zona más crítica del ensayo. Se puede observar que las estructuras TPMS-láminas son las que más zonas de tensiones máximas presentan (700 MPa), en cambio las TPMS-sólidas, destacando sobre todo la DG, presentan muchas menos zonas de tensiones máximas.

La estructura DG, es la que presenta unas zonas de tensión máxima muy concentradas en las superficies de contacto con los elementos auxiliares, solo siendo esas zonas las que resisten tensiones elevadas, comportamiento muy diferente al de las demás estructuras. En la figura 33, se puede observar, como la zona superior de la sección central de esta estructura, alcanza la tensión de rotura de manera muy localizada, pareciendo que el tipo de estructura cede antes los contactos de los elementos, no pudiendo transmitir bien las cargas y haciendo que esas zonas se comporten como concentradores de tensiones.

Por otro lado, la estructura NG, aun siendo del mismo tipo de TPMS, formado por trabéculas, si presenta una transmisión de la tensión, de manera más distribuida por toda la estructura. Aun así, en esta estructura las zonas de tensión máxima siguen siendo reducidas, concentradas en las zonas de contacto con los elementos auxiliares, pero manifestando muchas más zonas dentro del comportamiento plástico.

Con respecto a las estructuras TPMS-láminas, en estas se observan unos comportamientos muy similares, observándose tensiones máximas en la zona central, y en los extremos, debido a las condiciones impuestas en éstos. Con las imágenes de la figura 32, se puede observar que no hay muchas diferencias entre los comportamientos que muestran estas estructuras, dejando claro las zonas con más tensiones críticas.

Las secciones transversales, figura 33, sí se puede observar diferencias mucho más significativas entre las estructuras tipo Sheet. La S69G es la que presenta mayor cantidad de tensión crítica en la sección transversal de la zona central, siendo la estructura con mayor profundidad de tensión máxima de la zona exterior a la interior de la sección. Por otro lado, la S72G, no tiene la misma cantidad de profundidad de la tensión crítica, ésta se mantiene en los extremos, dejando la zona central con menor tensión.

En el caso de la S69GP y la S72GP, las tensiones que resisten, son muy similares entre sí, teniendo ambas, la misma proporción de tensiones críticas, como de tensiones no críticas, en la sección transversal. Así, como la S69G, presentan mucha profundidad, en la sección transversal, de la tensión dentro del rango de comportamiento plástico.

En todos los casos se puede observar, así como pasaba en torsión, el patrón que sigue la tensión es desde la zona exterior hacia la interior de la estructura.

Como en el caso de la torsión, se van a mostrar las deformaciones plásticas que han sufrido las estructuras utilizando el criterio de inicio de daño dúctil (DUCTCRT).

Con las deformaciones plásticas que se observan en la figura 34 y 35, se pueden observar las zonas que más daño han acumulado, y como es la zona central la que tiene los valores más altos en todos los casos, excepto en la DG, que es la única que tiene las zonas de acumulación de daño localizadas en las zonas donde hace contacto con los elementos auxiliares.

En el caso de la DG, se puede observar de forma más precisa, como las zonas de contacto con los elementos auxiliares, son las únicas que entran en deformación plástica, e incluso llegan a alcanzar el límite de rotura del material. Por otro lado, la NG, tiene una similitud con la DG, siendo las únicas zonas de deformación plástica máxima, las que hacen contacto con los elementos auxiliares. En cambio, en el caso de la NG, tiene más zonas dentro del rango de deformación plástica, concentradas en los extremos de la sección transversal, que son las zonas con más esfuerzos de flexión.

Con respecto a las estructuras TPMS-láminas, se observa, en la figura 34, que la zona central es la más crítica, porque es donde más daño total acumulado hay, aunque también se destaca el daño acumulado en los extremos, pero la cantidad es inferior, sobre todo en la S72G y la S72GP.

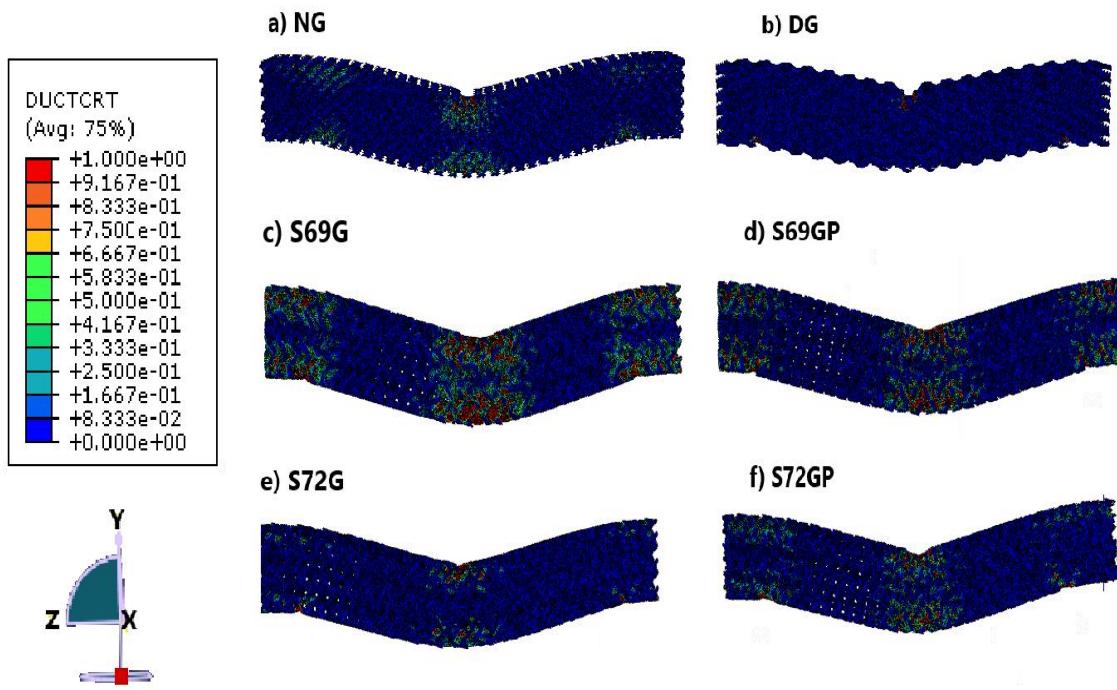


Figura 34. Parámetro de deformación plástica del modelo de daño dúctil (DUCTCRT). a) NG b) DG c) S69G d) S69GP e) S72G f) S72GP

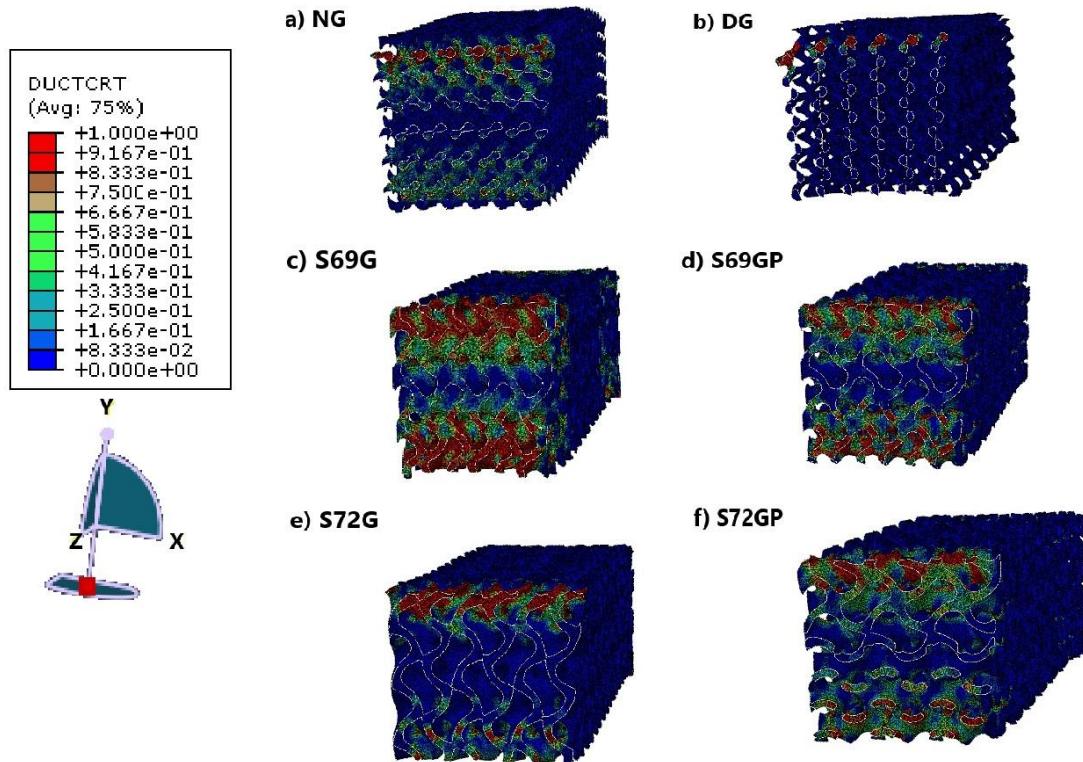


Figura 35. Parámetro de deformación plástica del modelo de daño dúctil (DUCTCRT), sección transversal de la estructura. a) NG b) DG c) S69G d) S69GP e) S72G f) S72GP

En los cuatro casos, se observa de forma clara que la zona más crítica son los extremos de la sección transversal central, que, de forma lógica, son los que se encuentran a mayor esfuerzo de flexión, además excepto en la S72G, que es la porción de área sin daño es mucho más grande, siendo la parte superior más crítica que la inferior.

Relacionado con lo observado en las tensiones de Von Mises, la estructura S69G es la que más profundidad del daño máximo acumulado tiene, y la que presenta la mayor homogeneidad en la exposición al esfuerzo entre la parte superior e inferior de la sección central.

Así como con las simulaciones de torsión, para comparar los comportamientos obtenidos, se generó una gráfica Tensión-Deformación, en la que se observa de manera más clara y precisa los comportamientos obtenidos (Figura 36):

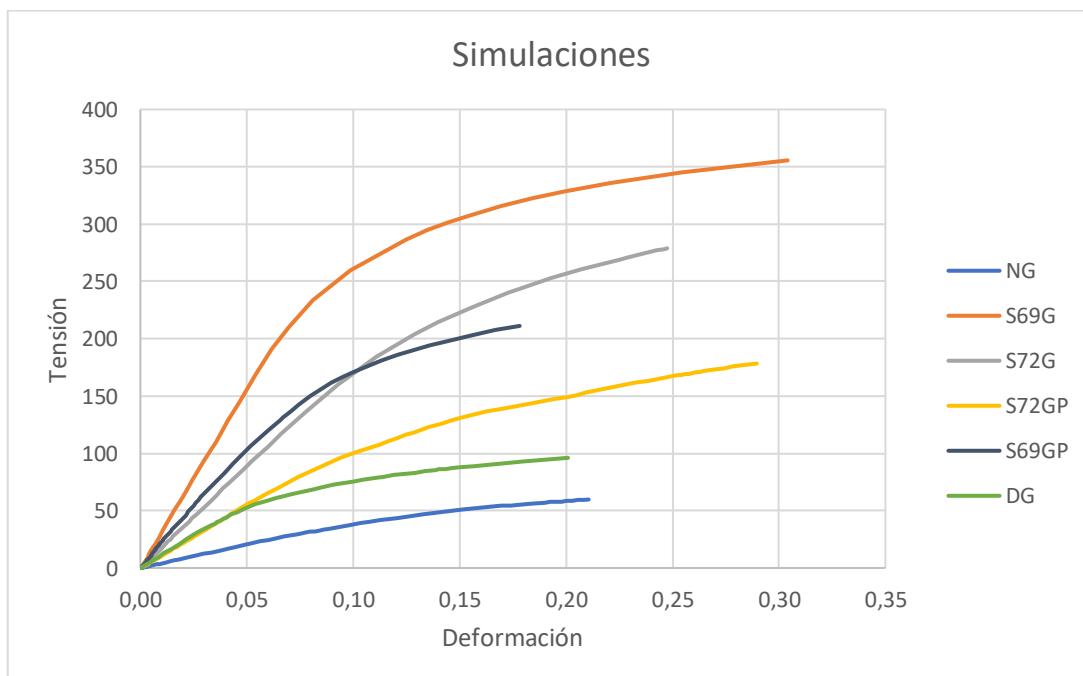


Figura 36. Gráfica Tensión-Deformación de las simulaciones de flexión

En la gráfica se puede observar un patrón muy similar entre los comportamientos de las estructuras al observado en el ensayo de torsión, pero hay una diferencia grande con respecto a los valores de tensión y deformación que presentan. En el caso de la flexión, las tensiones que soportan son muy superiores a las que soportan en torsión, por lo que las estructuras presentan unas resistencias mucho mejores a este esfuerzo. Además, ya no solo las tensiones son superiores, sino que las deformaciones que muestran, también son mucho más grandes, siendo estructuras mucho más flexibles a flexión que a torsión.

Las estructuras TPMS-sólidas siguen siendo las estructuras con peor comportamiento, aunque en este caso tienen un comportamiento mucho más dúctil. La diferencia entre NG y DG es más

acentuada, siendo la DG la que presenta una mayor resistencia a la flexión. La propiedad de comportamiento frágil, que presentaban en el caso de la torsión, aquí es más mucho más dúctil.

Centrándonos en las estructuras TPMS-lámina, se observa a primera vista como el comportamiento entre las estructuras es muy similar al de torsión, siendo las Sheet normales las que mejor comportamiento tienen, siendo la estructura S69G la que mejor resistencia a flexión presenta. El que muestren un comportamiento superior se prevé debido a la mayor proporción de material que tienen, que ayuda a resistir mejor el esfuerzo de flexión.

En este caso, las diferencias de las estructuras S72G y S72GP con sus homónimas son mucho más elevadas, teniendo éstas un módulo de Young inferior, que en ningún momento de la curva llegan a cruzarse, comportamiento que si se aprecia en el comportamiento de torsión.

En resumen, con estos resultados, se puede apreciar que las estructuras se comportan mejor a flexión que a torsión, y que se sigue manteniendo que las TPMS-láminas, tienen mejores propiedades mecánicas que las TPMS-sólidas. Aun teniendo que añadir unas condiciones adicionales al ensayo, se ha podido obtener unos comportamientos muy representativos de las estructuras frente a la flexión.

3.2 Comparación comportamiento experimental vs simulado

En este apartado se van a mostrar las comparaciones entre el comportamiento obtenido experimentalmente, frente al comportamiento obtenido mediante simulación computacional.

- Torsión

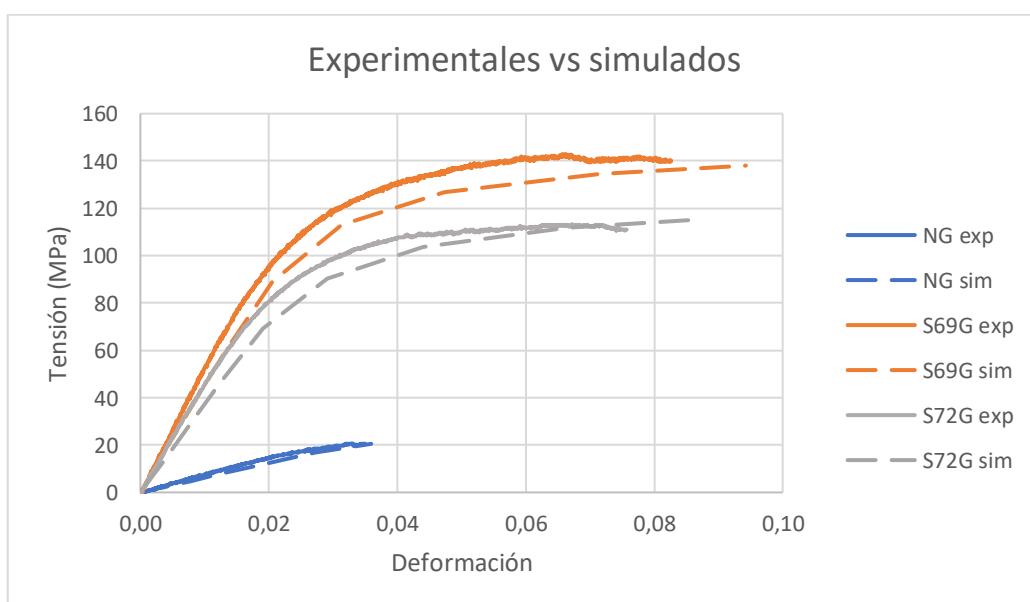


Figura 37. Comparación entre comportamiento experimental vs simulado en ensayos de torsión. NG; S69G; S72G

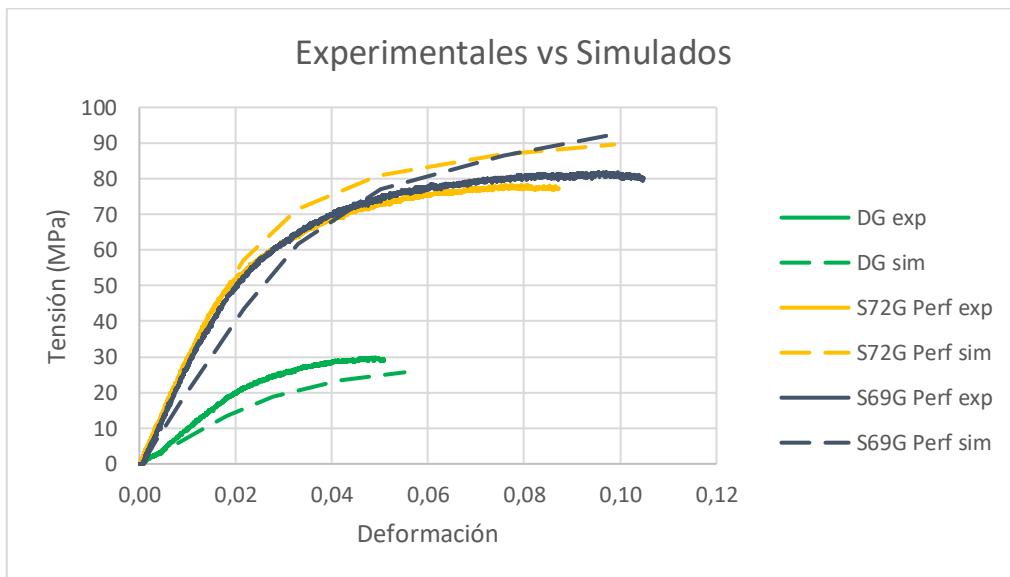


Figura 38. Comparación entre comportamiento experimental vs simulado en ensayos de torsión. DG; S69GP; S72GP

En ambas gráficas, figura 37 y 38, se puede observar que los comportamientos son muy similares en todos los casos, siendo en 5 de ellos (NG, DG, S69G, S72G y S72GP) el mismo patrón en ambas curvas. En el caso restante (S69GP), el patrón de la curva simulada tiene una zona elástica menos rígida, pero por la zona del límite elástico, se cruzan ambas curvas y pasa a ser la curva experimental inferior a la simulada.

A simple vista se puede observar, que la curva experimental es superior a la simulada, que denota que el Módulo de Young es superior, excepto en el caso de la estructura S72GP, que la zona elástica es idéntica, Módulo de Young similar, y es solo a partir de la zona plástica, cuando se observa la diferencia entre las curvas, de forma que la discrepancia está en el comportamiento introducido a partir del límite elástico.

Las gráficas ayudan de forma visual a observar que los comportamientos no son dispares entre sí, pero para poder obtener unos valores cuantitativos que ayuden a valorar de forma más objetiva la similitud entre ambos comportamientos, se va a mostrar una tabla con los errores relativos entre los comportamientos de las diferentes estructuras (Tabla 8).

Tabla 8. Errores relativos entre el comportamiento experimental y simulado de los ensayos de torsión

ERRORES RELATIVOS (%)					
NG	DG	S69G	S69GP	S72G	S72GP
13,05	21,72	6,67	11,20	7,44	8,96

A partir de estos valores, se puede observar que las estructuras TPMS-lámina son las que más han podido recrear el comportamiento experimental, siendo la S69G la que mejor simula el comportamiento experimental con solo un 6,67% de error.

Por otro lado, las estructuras NG y DG, sobretodo la DG, si se alejan un poco más de la experimental, en comparación a las otras, pero sigue estando dentro de un margen razonable y justificable de error relativo. Esta consideración es apoyada en estudios como *Naghavi et al 2022* [41], en el que se realiza la misma investigación que en este estudio, con estructuras TPMS giroides y diamantes, hechas con Ti-6Al-4V, aunque ellos usaron el método de fabricación aditiva EBM, y en este caso se ha usado el SLM, y también compararon el comportamiento experimental con el simulado. En el caso concreto de la torsión, el rango de los valores obtenidos de errores relativos, comprendía entre 14%-26% (Tabla 9).

Tabla 9. Resultados ensayos de torsión de *Naghavi et al 2022*

Test	Sample Name	Young's Modulus (GPa)			Yield Stress (MPa)		
		Experimental	Simulation	% Error	Experimental	Simulation	% Error
Torsion	G800	4.16	4.96	19%	-	171	-
	G1000	3.48	4.00	15%	-	140	-
	D900	4.80	6.04	26%	-	205	-
	D1100	4.23	4.81	14%	-	164	-
	Cortical Bone	3.1-3.7	-	-	49-98	-	-

Por otro lado, otro estudio, *Timercan et al 2023* [45], realiza otro estudio de comportamiento mecánico de estructuras porosas destinadas para implantes biomédicos, del tipo diamante y giroide. Entre los ensayos que se analizan, realizan el de torsión, y hace una comparación entre lo obtenido experimentalmente con lo obtenido en la simulación. En este estudio indican que los valores del material que han introducido, en la simulación, son los teóricos, propiedades que en nuestro estudio se tuvieron que cambiar debido a las grandes diferencias que se observaban.

En las siguientes gráficas (Figura 39) se puede observar que las curvas simuladas son superiores a las experimentales, caso contrario que en nuestras simulaciones, que hemos indicado que son inferiores. Esta diferencia de tendencia se atribuye a las variaciones entre las propiedades del material introducidas, en la simulación, entre ambos estudios.

Visualmente se observa una similitud con las gráficas que se han obtenido en el estudio del presente trabajo, incluso en este trabajo se han obtenido mejores resultados. El rango de errores que obtuvieron en el artículo *Timercan et al 2023* [45] fue entre 14%-36%.

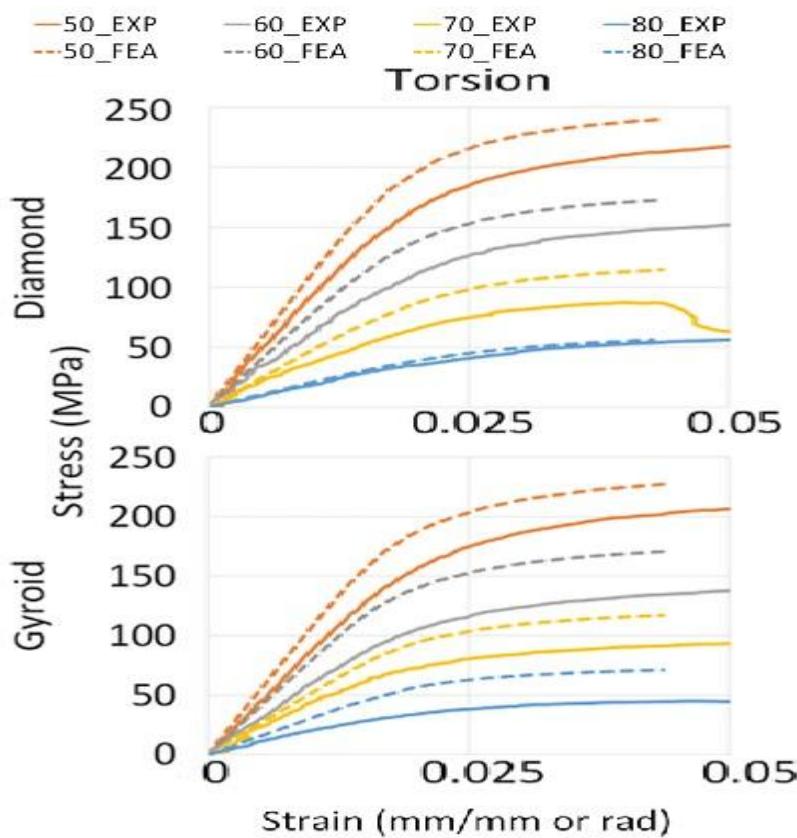


Figura 39. Comportamientos experimentales vs simulados de los ensayos de torsión del artículo Timercan et al 2023 [45]

- Flexión

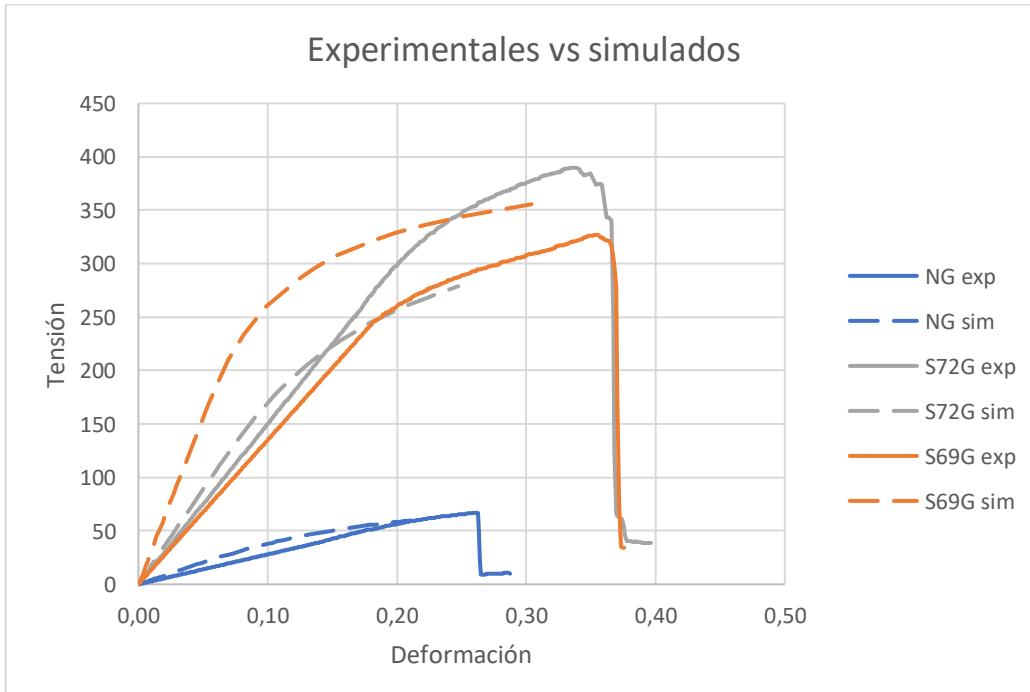


Figura 40. Comparación entre comportamiento experimental vs simulado en ensayos de flexión. NG; S69G; S72G

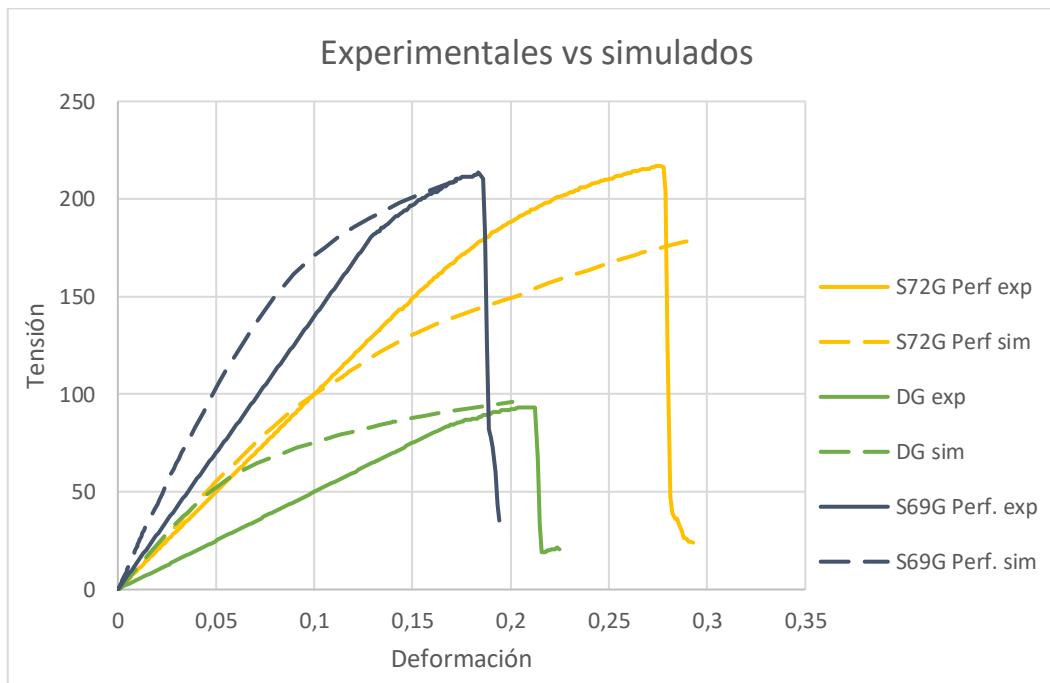


Figura 41. Comparación entre comportamiento experimental vs simulado en ensayos de torsión. DG; S69GP; S72GP

En las gráficas de flexión, se puede observar que las diferencias entre comportamientos son más grandes que en torsión, de manera visual se aprecia que no siguen el patrón de forma tan semejante, pero que aun así se han obtenido comportamientos parecidos.

Hay solo una estructura que tiene un comportamiento elástico muy similar al experimental, que es la S72GP, las demás presentan un comportamiento elástico más rígido, en la simulación que en el experimental. Este fenómeno es inverso a los ensayos de torsión, ya que en esos casos era el comportamiento simulado el que tenía menor rígidez.

Las estructuras S69G y S72G son en las que muestran mayor diferencia, en comparación con las demás. Aun así, para poder analizar de forma más precisa las comparaciones, se van a mostrar los errores relativos en cada caso (Tabla 10).

Tabla 10. Errores relativos entre el comportamiento experimental y simulado de los ensayos de flexión

ERRORES RELATIVOS (%)					
NG	DG	S69G	S69GP	S72G	S72GP
16,28	30,45	31,43	19,09	21,50	12,52

El rango de errores obtenidos es mucho más elevado que en torsión, aspecto que con las gráficas ya se podía apreciar. El primer motivo por el que los errores en flexión son más grandes, es debido a la complejidad del ensayo. En la flexión se necesita de elementos auxiliares para poder recrear la flexión de tres puntos, aspecto que aumenta la dificultad de la simulación, por el hecho de tener

que añadir el contacto entre esos elementos y la probeta, además, el cálculo de la simulación también se vuelve más complejo, por lo que conlleva a más riesgo de errores, que cómo se ha indicado anteriormente, se han encontrado muchos durante la realización de este estudio, tanto posterior al cálculo, como cuando se está efectuando el cálculo.

Centrándonos en los resultados obtenidos, las estructuras con mayores errores son la DG y la S69G, con bastante diferencia con las demás, por contraparte, las que menores errores tienen son la NG y la S72GP, de forma que en el caso de la flexión no se pueden diferenciar los errores en TPMS-lámina y TPMS-sólido, ya que son estructuras de ambos tipos la que presentan los mejores y peores resultados. Además, fijándonos en los pares de estructuras, solo las estructuras tipo Sheet Perforada son las que tienen unos resultados más similares, siendo los otros casos más dispares.

Aun teniendo un rango de error más elevado (12,52% - 31,43%) debido a lo comentado anteriormente con respecto a la complejidad del ensayo, los defectos en la fabricación estructuras porosas, y los cambios en las propiedades del material base en el proceso de impresión, estos resultados se encuentran en un rango lógico. Esta afirmación la podemos apoyar, como en el caso de la torsión, con el estudio *Naghavi et al 2022* [41] que como en este caso, obtuvo un rango de valores de error mucho más amplio que en los ensayos de torsión. A continuación, se muestra la tabla donde se muestran los errores obtenidos en el estudio en cuestión (Tabla 11):

Tabla 11. Resultados ensayos de flexión de *Naghavi et al 2022*

Test	Sample Name	Young's Modulus (GPa)			Yield Stress (MPa)		
		Experimental	Simulation	% Error	Experimental	Simulation	% Error
Three-point bending	G800	6.41	6.32	2%	335	296	12%
	G1000	3.21	5.00	56%	147	242	65%
	D900	7.06	7.68	9%	350	358	2%
	D1100	5.07	6.37	26%	234	287	23%
	Cortical Bone	3-15	-	-	45-270	-	-

Se puede observar que obtuvieron valores mucho más precisos, incluso llegando a valores de 2% de error relativo, pero que también obtuvieron valores mucho más elevados, como 65%.

A continuación, una vez analizadas las semejanzas entre las curvas experimentales y las curvas simuladas de ambos ensayos, y habiendo contrastados los errores obtenidos, con estudios que han realizado investigaciones similares, se han podido contrastar diferentes causas que afectan a las propiedades mecánicas de las estructuras.

La mayoría de estudios coinciden que el método de fabricación, aun siendo unos de los métodos más utilizados en el ámbito biomédico para este tipo de estructura y material, incluso con una precisión y versatilidad tan elevada [28], genera irregularidades e incertidumbres a la hora de poder extruir estructuras tan complejas como son las estructuras porosas, que necesitan de mucha precisión para poder reconstruir la interconectividad entre poros tan pequeños. Debido a esas

imprecisiones que se generan en el proceso de fabricación, como ya se ha argumentado varias veces en este trabajo, no se consigue obtener la forma estructural deseada afectando al comportamiento de éstas [29,30,41,45]. Un ejemplo de esas imprecisiones, puede ser la generación de microporos o pequeños vacíos que afectan a la homogeneidad de la estructura, generando zonas de mayor concentración de tensiones, como se indica en el estudio de *Sun et al 2024* [46].

Hay estudios, como el de *McGregor et al 2021* [47], que analizan los parámetros involucrados en el proceso de extrusión, tanto para EBM como SLM, y cómo de importantes son éstos a la hora de generar la presencia de irregularidades en la forma, rugosidad, defectos en los poros, etc ... Destacan como principales factores la orientación de la impresión, velocidad de extrusión y la energía utilizada y, además, remarcan que si la combinación de los parámetros no es la adecuada, la transferencia de propiedades mecánicas del material primario, no es ideal, por lo que el material extruido no consigue replicar exactamente el comportamiento del material primario.

Otro, *Pérez-Sánchez et al 2018* [48], analizan de manera más concreta el efecto que tiene la orientación de la extrusión en la rugosidad y transmisión de propiedades mecánicas del material primario al extruido. Realizan extrusiones a 45° y 90°, obteniendo mejores propiedades mecánicas en las extruidas de forma vertical que las extruidas de forma oblicua, demostrando que las propiedades mecánicas se ven afectadas por la orientación de las fibras, además de que, en ambos casos, observaron una disminución de la resistencia a fatiga del material, en un ensayo de flexión. Simularon de forma simultánea los ensayos de flexión, con el método de elementos finitos, en los que pudieron realizar una reconstrucción de la rugosidad de los modelos experimentales, pero no consiguieron replicar los defectos internos, y observaron diferencias en el comportamiento mecánico entre ambos ensayos, tanto en el ensayo de fatiga como en el de flexión estático.

Contrastando con estos estudios, anteriormente comentados, se puede justificar el cambio de propiedades introducidas en el material simulado de este estudio, teniendo que reducir tanto su comportamiento elástico, como plástico, para poder obtener un comportamiento similar al obtenido experimentalmente.

4. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

4.1 Conclusiones

En este trabajo se han obtenido resultados computacionales, mediante análisis por elementos finitos (FEA) para reproducir los ensayos experimentales previamente realizados por el departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, recogido en el Trabajo de Fin de Grado (TFG) titulado “Ensayos Mecánicos De Flexión y Torsión Sobre Estructuras Porosas Destinadas A La Cirugía Regenerativa”. Estos resultados proporcionaron un punto de partida y referencia, para poder validar la herramienta computacional como alternativa para diseñar estructuras porosas con los requerimientos mecánicos para torsión y flexión que nos den. A partir de los resultados obtenidos, se han sacado las siguientes conclusiones con respecto al estudio realizado:

- Las diferencias entre las propiedades del material base, con el material simulado, vienen dadas por varios motivos. El primer motivo se debe a la impresión de la estructura, que aun siendo, el Selective Laser Melting, un método muy preciso para controlar los requisitos microscópicos que requieren los tamaños de los poros, genera irregularidades que afectan de manera directa al comportamiento mecánico, haciendo que se reduzcan las propiedades de la estructura porosa imprimida.

El siguiente motivo, relacionado también con el método de fabricación, es que los parámetros que se usan para la impresión 3D (SLM) pueden modificar de manera directa las propiedades mecánicas del material que se imprime, siendo un factor muy importante, las condiciones en las que se realizan las extrusiones de este tipo de estructura y material. Es por eso, que las propiedades del material base son muy superiores a las propiedades utilizadas en las simulaciones, que son las propiedades con las que se han obtenido mayor similitud con las experimentales.

- La complejidad asociada a la recreación del ensayo de flexión, tanto experimentalmente como computacionalmente, se refleja directamente en la variabilidad de los resultados obtenidos.

Además, dicha complejidad computacional, fomenta la aparición de una mayor cantidad de problemas para converger el cálculo de la simulación.

- El ensayo de torsión permite alcanzar un nivel de precisión significativamente alto al ser más sencillo de ejecutar, tanto por la parte experimental como la computacional.
- Ambos tipos de grupos TPMS (láminas y sólidos) reflejan un mejor comportamiento a la flexión, que, a la torsión, pero son las TPMS-láminas las que demuestran tener mejor comportamiento en ambos tipos de esfuerzos, siendo muy superiores a las TPMS-sólida.

Destacar que la porosidad entre los tipos de TPMS es diferente, siendo para las TPMS-sólida entre 84-85%, y para las TPMS-lámina por debajo del 75%.

Dentro de las TPMS-láminas, las estructuras tipo Sheet normales, son las que mejor comportamiento mecánico tienen en ambos ensayos.

- A partir de este estudio se demuestra que el uso de análisis por elementos finitos (FEA) puede ser de gran ayuda para ayudar en el diseño de nuevas estructuras, ya que permite estimar las propiedades mecánicas de las estructuras con precisión.

4.2 Líneas futuras

Una vez realizado el estudio, la principal limitación encontrada ha sido la recreación del ensayo de flexión, y la cantidad de coste computacional necesario para poder obtener los resultados de este ensayo. En el caso de la torsión el tiempo oscila entre 5-9 minutos, obteniendo un tamaño de archivo alrededor de 1 Gigabyte (GB), pero en el caso de la flexión, el tiempo oscila entre 2-5 horas, llegando a obtener tamaños de archivos de 13 GB, con un mínimo de 5 GB. De forma que, para futuras investigaciones, se propone realizar un estudio previo sobre posibles alternativas de recreación del ensayo de flexión, que consigan replicar el mismo comportamiento. Se proponen posibles alternativas:

- Realizar el ensayo aplicando simetría en la mitad de la estructura.
- Estudiar la influencia de los elementos de apoyo, y valorar la opción de sustituirlos, aplicando la condición de contorno directamente en los nodos de la estructura.

Estas alternativas se proponen buscando reducir el gasto computacional, el tiempo que se necesita para que se complete el cálculo, y reducir la cantidad de posibles problemas que se puedan manifestar.

Por otro lado, considerando posibles avances del estudio en futuras investigaciones, se propone ampliar el uso de esta herramienta computacional para evaluar diferentes esfuerzos mecánicos y propiedades fundamentales de las estructuras destinadas a la cirugía regenerativa, tales como tracción, compresión, o permeabilidad. Esto permitiría corroborar la validez de esta herramienta en una variedad de ensayos básicos.

Una vez validada la herramienta para caracterizar todas las propiedades de una estructura, sería posible realizar un estudio computacional sobre el comportamiento de dicha estructura dentro de un hueso, y comprobar así la viabilidad de la estructura en su propósito final.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Falcón Mateo, L. (2023). *Ensayos Mecánicos De Flexión Y Torsión Sobre Estructuras Porosas Destinadas A La Cirugía Regenerativa* (Bachelor's thesis).
- [2] Martín, F. J. V., & Coordinador, J. (2014). *Manual del residente de COT de la SECOT*. Sociedad Española de Cirugía Ortopédica y Traumatología.
- [3] Tresguerres, J., Villanúa, M. A., & Lopez, A. (2009). *Anatomía y fisiología del cuerpo humano*. Mc Graw Hill.
- [4] Ríos-Díaz, J., Hevilla, F. L., Martínez-Payá, J. J., Cortés, M. P., & del Baño Aledo, M. E. (2008). *Arquitectura y organización interna del hueso ante la aplicación de diferentes estímulos mecánicos*. *Fisioterapia*, 30(4), 194-203.
- [5] Caeiro, J. R., González, P., & Gude, D. (2013). Biomecánica y hueso (y II): ensayos en los distintos niveles jerárquicos del hueso y técnicas alternativas para la determinación de la resistencia ósea. *Revista de osteoporosis y metabolismo mineral*, 5(2), 99-108.
- [6] Barreto, J. F. A. (2009). Regeneración ósea a través de la ingeniería de tejidos: una introducción. *RET. Revista de Estudios Transdisciplinarios*, 1(2), 98-109.
- [7] Serrato Ochoa, D., Aguilar, R. N., & Méndez, A. A. Ingeniería de tejidos. Una nueva disciplina en medicina regenerativa Tissue engineering. A new discipline in regenerative medicine.
- [8] Martin-Piedra, A., & Martin-Piedra, L. (2019). Matrices para Ingeniería del tejido óseo.
- [9] Estrada, C., Paz, A. C., & López, L. E. (2006). Ingeniería de tejido óseo: consideraciones básicas. *Revista EIA*, (5), 93-100.
- [10] Restrepo, S., Ocampo, S., Ramírez, J. A., Paucar, C., & García, C. (2017, December). Mechanical properties of ceramic structures based on Triply Periodic Minimal Surface (TPMS) processed by 3D printing. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 935, No. 1, p. 012036). IOP Publishing.
- [11] Velasco Peña, M. A., & Garzón Alvarado, D. A. (2010). Implantes Scaffolds para regeneración ósea.: Materiales, técnicas y modelado mediante sistemas de reacción-difusión. *Revista Cubana de Investigaciones Biomédicas*, 29(1), 0-0.
- [12] Zadpoor, A. A. (2015). Bone tissue regeneration: the role of scaffold geometry. *Biomaterials science*, 3(2), 231-245.
- [13] Gude, D., González, P., & Caeiro, J. R. (2013). Biomecánica y hueso (I): Conceptos básicos y ensayos mecánicos clásicos. *Revista de Osteoporosis y Metabolismo Mineral*, 5(1), 43-50.
- [14] *Osteoporosis II: Ninguna fractura es trivial ni en niños ni en adultos, pero las hay más sospechosas que otras.* (2015, 10 marzo). Dr. Miguel Ángel Guagnelli Mtz. <https://endocrinologopediatria.mx/osteoporosis-ii-ninguna-fractura-es-trivial-ni-en-ninos-ni-en-adultos-pero-las-hay-mas-sospechosas-que-otras/>
- [15] Liu, X. S., Cohen, A., Shane, E., Yin, P. T., Stein, E. M., Rogers, H., ... & Guo, X. E. (2010). Bone density, geometry, microstructure, and stiffness: Relationships between peripheral and central skeletal sites assessed by DXA, HR-pQCT, and cQCT in premenopausal women. *Journal of bone and mineral research*, 25(10), 2229-2238.
- [16] Dong, Z., & Zhao, X. (2021). Application of TPMS structure in bone regeneration. *Engineered Regeneration*, 2, 154-162.

- [17] Yu, S., Sun, J., & Bai, J. (2019). Investigation of functionally graded TPMS structures fabricated by additive manufacturing. *Materials & Design*, 182, 108021.
- [18] Abou-Ali, A. M., Al-Ketan, O., Rowshan, R., & Abu Al-Rub, R. (2019). Mechanical response of 3D printed bending-dominated ligament-based triply periodic cellular polymeric solids. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 28, 2316-2326.
- [19] Mi, Z. R., Shuib, S., Hassan, A. Y., Shorki, A. A., & Ibrahim, M. M. (2007). Problem of stress shielding and improvement to the hip Implat designs: A review. *J. Med. Sci*, 7(3), 460-467.
- [20] Al-Ketan, O., Lee, D. W., Rowshan, R., & Al-Rub, R. K. A. (2020). Functionally graded and multi-morphology sheet TPMS lattices: Design, manufacturing, and mechanical properties. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, 102, 103520.
- [21] Al-Ketan, O., Rowshan, R., & Al-Rub, R. K. A. (2018). Topology-mechanical property relationship of 3D printed strut, skeletal, and sheet based periodic metallic cellular materials. *Additive Manufacturing*, 19, 167-183.
- [22] Simsek, U., Akbulut, A., Gayir, C. E., Basaran, C., & Sendur, P. (2021). Modal characterization of additively manufactured TPMS structures: comparison between different modeling methods. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 115, 657-674.
- [23] Yang, E., Leary, M., Lozanovski, B., Downing, D., Mazur, M., Sarker, A., ... & Brandt, M. (2019). Effect of geometry on the mechanical properties of Ti-6Al-4V Gyroid structures fabricated via SLM: A numerical study. *Materials & Design*, 184, 108165.
- [24] Park, J., & Lakes, R. S. (2007). *Biomaterials: an introduction*. Springer Science & Business Media.
- [25] Camero, S., Talavera, I., González, G., Réquiz, R., Rosales, A., Suárez, M., ... & González, W. (2008). Estudio de la corrosión de una aleación Ti6Al4V utilizada como biomaterial. *Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela*, 23(3), 27-34.
- [26] Liu, S., & Shin, Y. C. (2019). Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy: A review. *Materials & Design*, 164, 107552.
- [27] Fabricar, D. D. U. O. P., & Metálica, P. C. D. C. (2016). Cuadernos de innovación educativa serie interactiva [3].
- [28] Yáñez Santana, M. A., Cuadrado Hernández, A. J., & Martel Fuentes, O. (2018). Análisis biomecánico de estructuras porosas de titanio orientadas a la reconstrucción de defectos óseos.
- [29] Liang, H., Yang, Y., Xie, D., Li, L., Mao, N., Wang, C., ... & Shen, L. (2019). Trabecular-like Ti-6Al-4V scaffolds for orthopedic: fabrication by selective laser melting and in vitro biocompatibility. *Journal of Materials Science & Technology*, 35(7), 1284-1297.
- [30] Shi, C., Lu, N., Qin, Y., Liu, M., Li, H., & Li, H. (2021). Study on mechanical properties and permeability of elliptical porous scaffold based on the SLM manufactured medical Ti6Al4V. *PLoS One*, 16(3), e0247764.
- [31] Yeranee, K., & Rao, Y. (2022). A review of recent investigations on flow and heat transfer enhancement in cooling channels embedded with triply periodic minimal surfaces (TPMS). *Energies*, 15(23), 8994.

- [32] ISO 21920-2. (2021). Geometrical product specifications (GPS)—Surface texture: Profile—Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters.
- [33] ISO 21920-3:2021 Geometrical product specifications (GPS)—surface texture: profile—part 3: specification operators.
- [34] Yáñez, A., Cuadrado, A., Martel, O., Afonso, H., & Monopoli, D. (2018). Gyroid porous titanium structures: A versatile solution to be used as scaffolds in bone defect reconstruction. *Materials & Design*, 140, 21-29.
- [35] Yáñez, A., Cuadrado, A., Martel, O., Fiorucci, M. P., & Deviaene, S. (2024). Mechanical and permeability properties of skeletal and sheet triply periodic minimal surface scaffolds in bone defect reconstruction. *Results in Engineering*, 21, 101883.
- [36] Madrigal, I. G., & Lesso, A. V. (2018). Corrección de modelos biológicos STL con herramientas CAD. *Jóvenes en la ciencia*, 4(1), 2827-2832.
- [37] Victor. (2023, 19 diciembre). *Descubre las Claves para Realizar un Buen Mallado en el Análisis de Elementos Finitos*. Simulexa. https://www.simulexa.com/es_es/descubre-las-claves-para-realizar-un-buen-mallado-en-el-analisis-de-elementos-finitos/#:~:text= Cuando%20hablamos%20de%20mallado%2C%20nos,ser%20analizados%20de%20forma%20independiente
- [38] Wagner, R. H. N. (2021). ABAQUS Tutorial: Damage for Ductile Metals—Material Model Explained—Ductile Damage. *Project: ABAQUS—Material Model Explained—Video Series*.
- [39] ASTM C1674. (2011). Standard Test Method for Flexural Strength of Advanced Ceramics with Engineered Porosity (Honeycomb Cellular Channels) at Ambient Temperatures.
- [40] ASTM. (2008). Standard test method for shear modulus at room temperature.
- [41] Naghavi, S. A., Tamaddon, M., Marghoub, A., Wang, K., Babamiri, B. B., Hazeli, K., ... & Liu, C. (2022). Mechanical characterisation and numerical modelling of TPMS-based gyroid and diamond Ti6Al4V scaffolds for bone implants: an integrated approach for translational consideration. *Bioengineering*, 9(10), 504.
- [42] Fuentes Quijano, V. A. (2014). Modelización numérica de aleaciones de Titanio de aplicación industrial.
- [43] Carlos, R. R., Edgar, R. D., Osvaldo, R. C., Armando, O. P., Vargas, F., & Ignacio, A. Caracterización mecánica de espuma de titanio (Ti-6Al-4V) mediante paquetería de elemento finito.
- [44] Marmi, A. K., Habraken, A. M., & Duchene, L. (2009). Multiaxial fatigue damage modelling at macro scale of Ti-6Al-4V alloy. *International Journal of Fatigue*, 31(11-12), 2031-2040.
- [45] Timercan, A., Terriault, P., & Brailovski, V. (2023). Axial tension/compression and torsional loading of diamond and gyroid lattice structures for biomedical implants: Simulation and experiment. *Materials & Design*, 225, 111585.
- [46] Sun, W., Li, M., & Li, H. (2024). On Defect Evolution in EBM Additively Manufactured Ti-6Al-4V via In Situ Investigations. *Materials*, 17(12), 2888.
- [47] McGregor, M., Patel, S., McLachlin, S., & Vlasea, M. (2021). Architectural bone parameters and the relationship to titanium lattice design for powder bed fusion additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 47, 102273.

[48] Pérez-Sánchez, A., Yáñez, A., Cuadrado, A., Martel, O., & Nuño, N. (2018). Fatigue behaviour and equivalent diameter of single Ti-6Al-4V struts fabricated by Electron Beam Melting orientated to porous lattice structures. *Materials & Design*, 155, 106-115.

6. ANEXOS

En el capítulo final se adjuntarán:

- Comparación de los resultados obtenidos simulando las propiedades teóricas del material, junto con las propiedades reales utilizadas para la simulación, además del comportamiento experimental.
- Representaciones gráficas de los problemas obtenidos en las simulaciones de flexión.

6.1 Comparación del comportamiento experimental vs propiedades teóricas vs propiedades finales

- Ensayo de torsión estructura NG

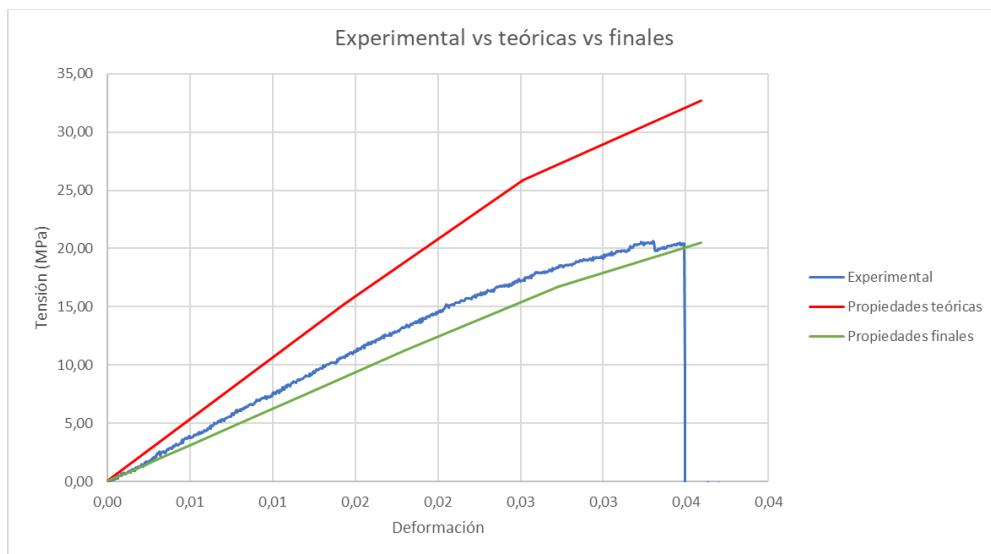


Figura 42. Gráfica de comparación del comportamiento experimental vs propiedades teóricas vs propiedades finales del ensayo de torsión en la estructura NG

- Ensayo de torsión estructura DG

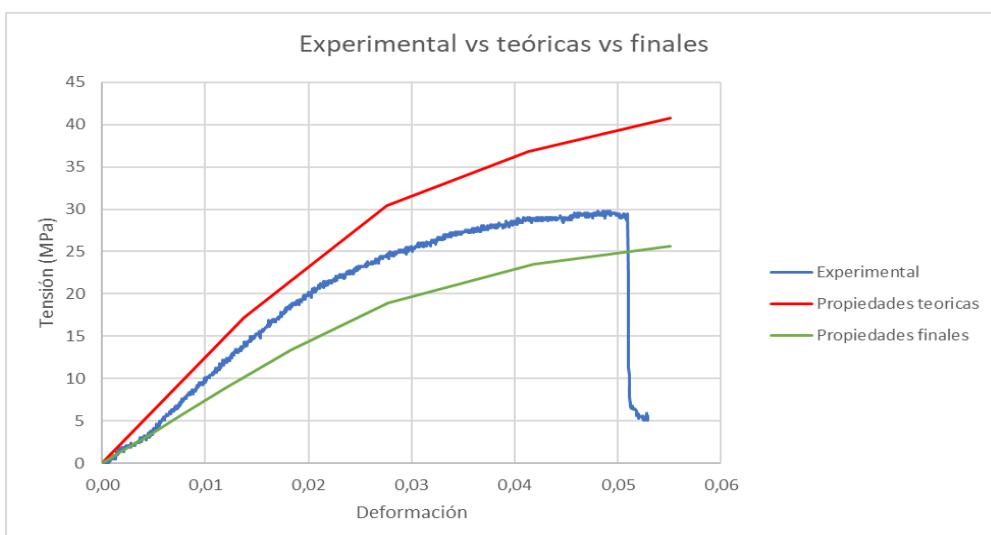


Figura 43. Gráfica de comparación del comportamiento experimental vs propiedades teóricas vs propiedades finales del ensayo de torsión en la estructura DG

- Ensayo de torsión estructura S69G

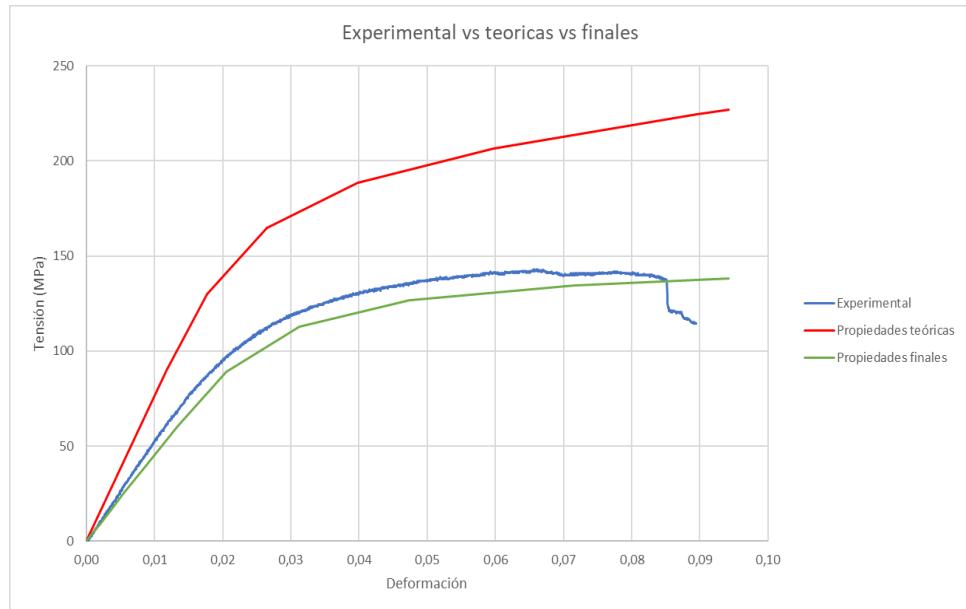


Figura 44. Gráfica de comparación del comportamiento experimental vs propiedades teóricas vs propiedades finales del ensayo de torsión en la estructura S69G

- Ensayo de torsión estructura S69GP

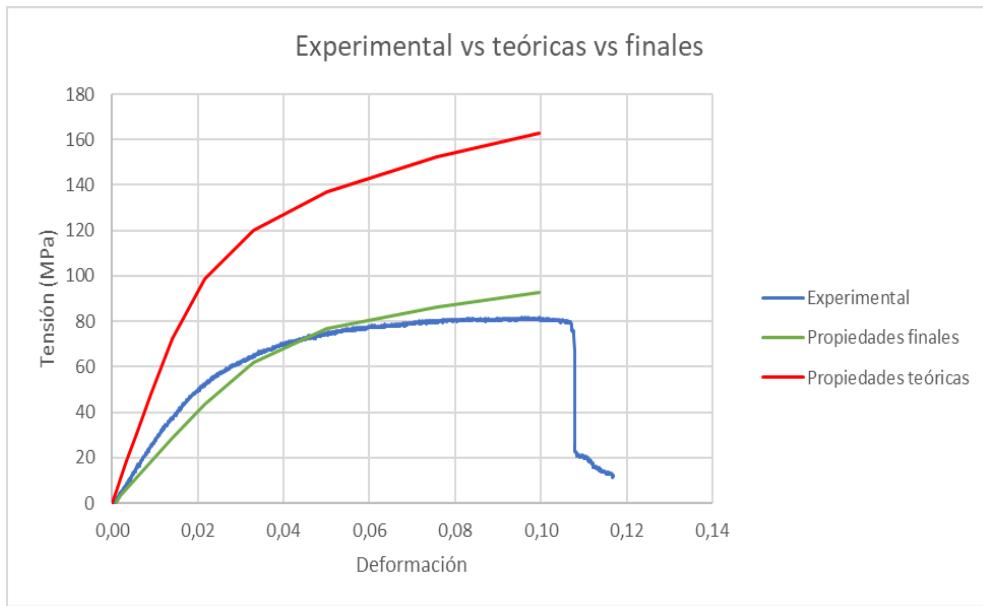


Figura 45. Gráfica de comparación del comportamiento experimental vs propiedades teóricas vs propiedades finales del ensayo de torsión en la estructura S69GP

- Ensayo de torsión estructura S72G

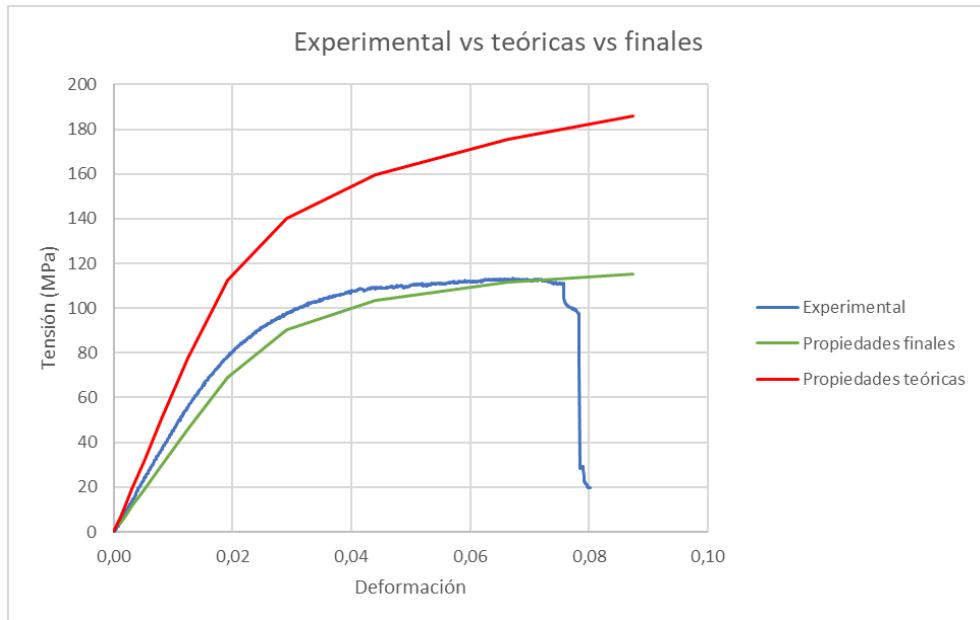


Figura 46. Gráfica de comparación del comportamiento experimental vs propiedades teóricas vs propiedades finales del ensayo de torsión en la estructura S72G

- Ensayo de torsión estructura S72GP

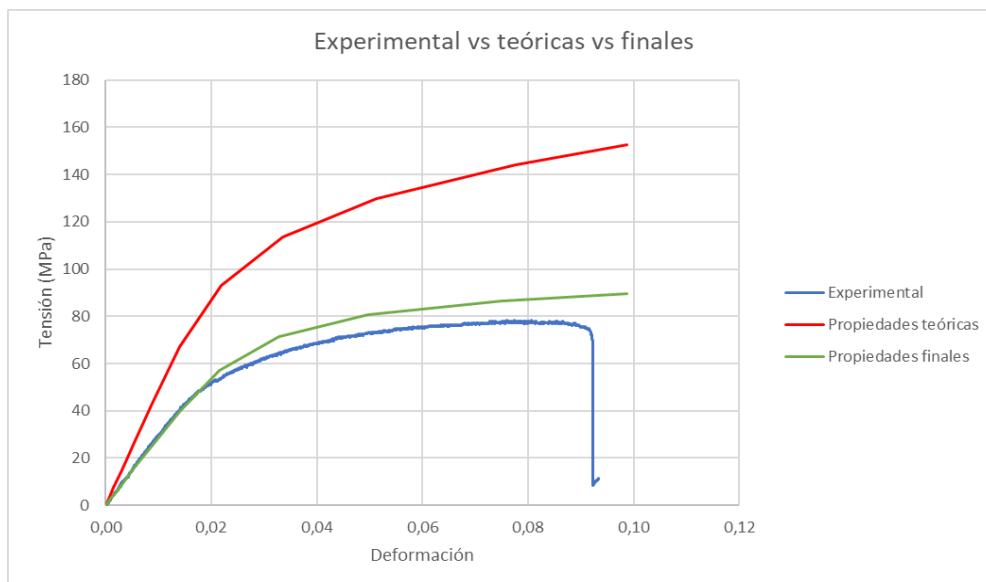


Figura 47. Gráfica de comparación del comportamiento experimental vs propiedades teóricas vs propiedades finales del ensayo de torsión en la estructura S72GP

- Ensayo de flexión estructura NG

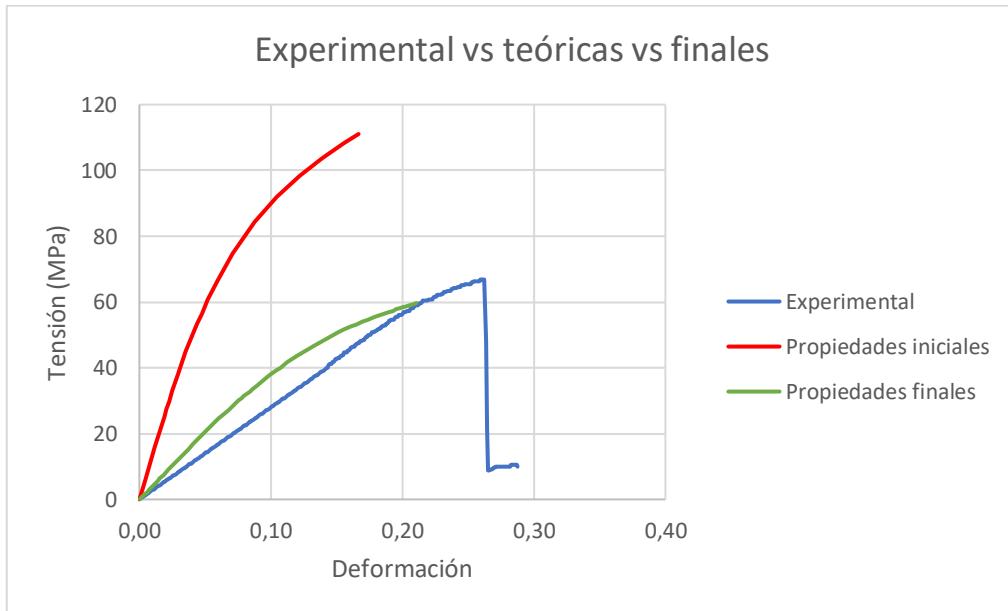


Figura 48. Gráfica de comparación del comportamiento experimental vs propiedades teóricas vs propiedades finales del ensayo de flexión en la estructura NG

- Ensayo de flexión estructura DG

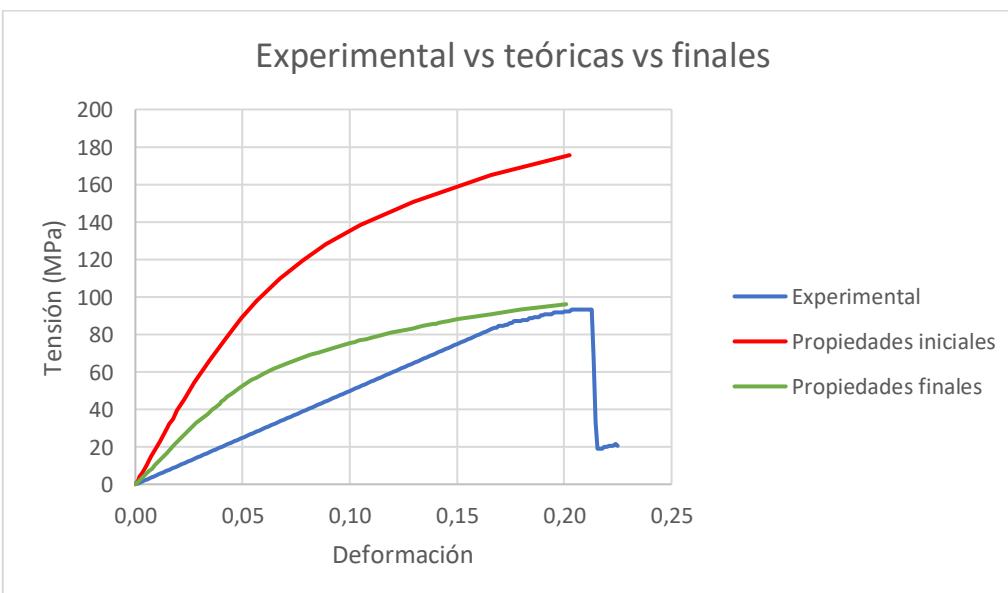


Figura 49. Gráfica de comparación del comportamiento experimental vs propiedades teóricas vs propiedades finales del ensayo de flexión en la estructura DG

- Ensayo de flexión estructura S69G

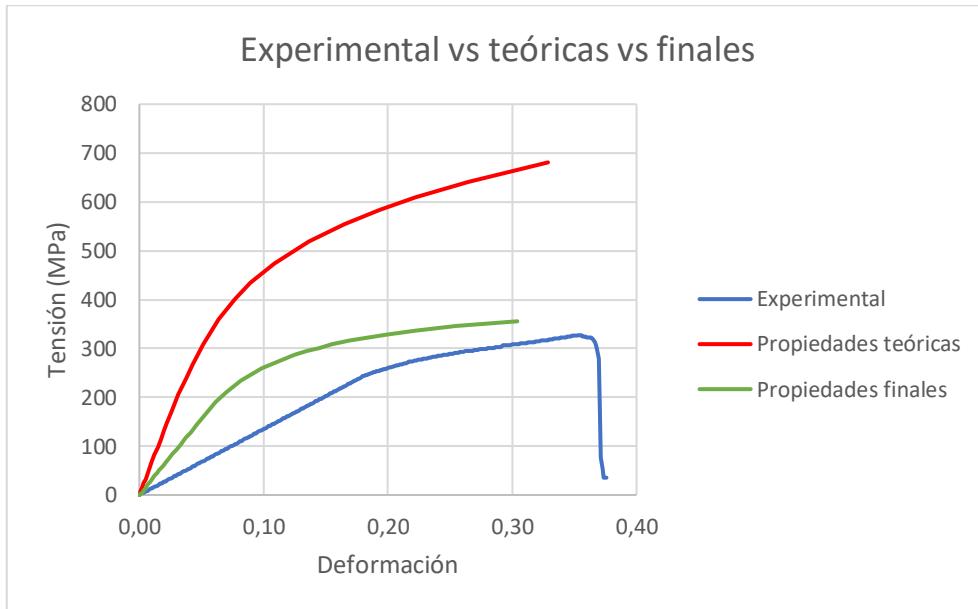


Figura 50. Gráfica de comparación del comportamiento experimental vs propiedades teóricas vs propiedades finales del ensayo de flexión en la estructura S69G

- Ensayo de flexión estructura S69GP

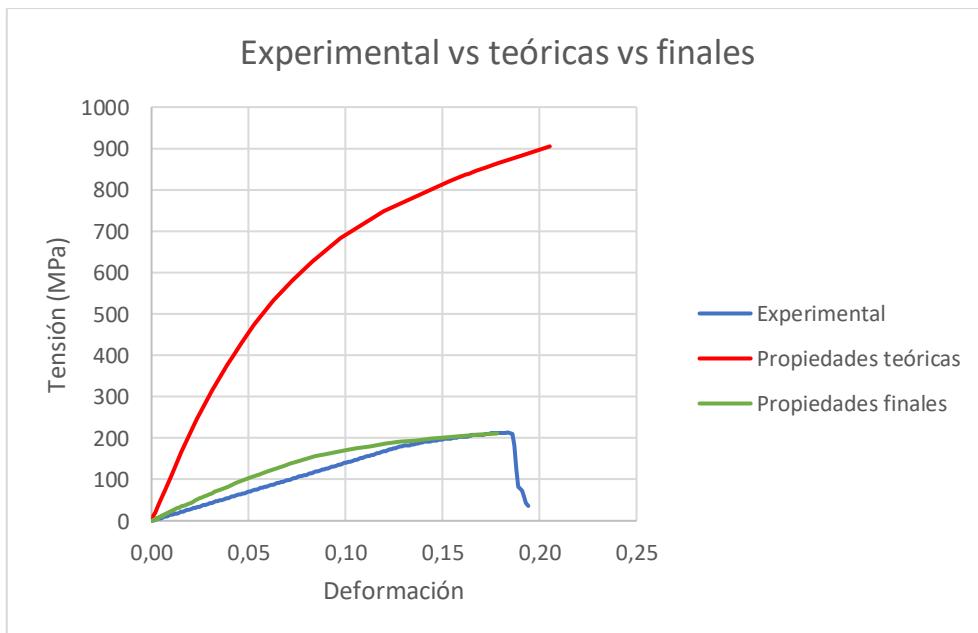


Figura 51. Gráfica de comparación del comportamiento experimental vs propiedades teóricas vs propiedades finales del ensayo de flexión en la estructura S69GP

- Ensayo de flexión estructura S72G

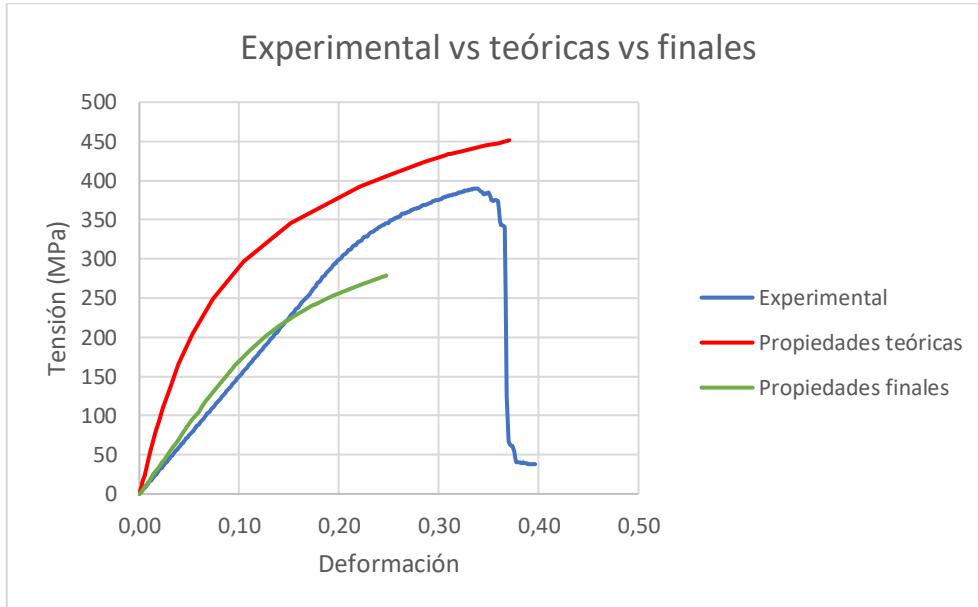


Figura 52. Gráfica de comparación del comportamiento experimental vs propiedades teóricas vs propiedades finales del ensayo de flexión en la estructura S72G

- Ensayo de flexión estructura S72GP

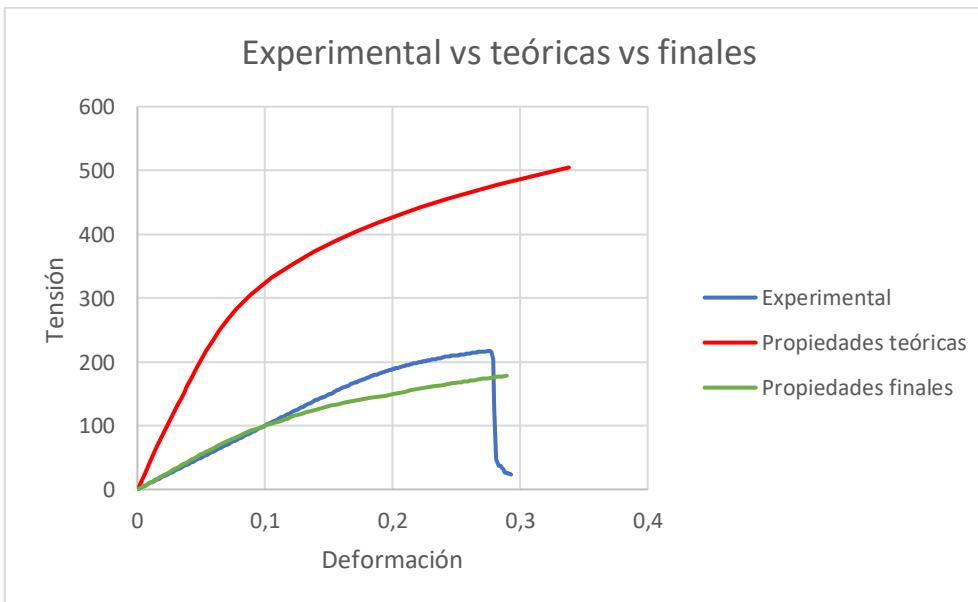


Figura 53. Gráfica de comparación del comportamiento experimental vs propiedades teóricas vs propiedades finales del ensayo de flexión en la estructura S72GP

6.2 Representaciones gráficas de los problemas obtenidos en las simulaciones de flexión.

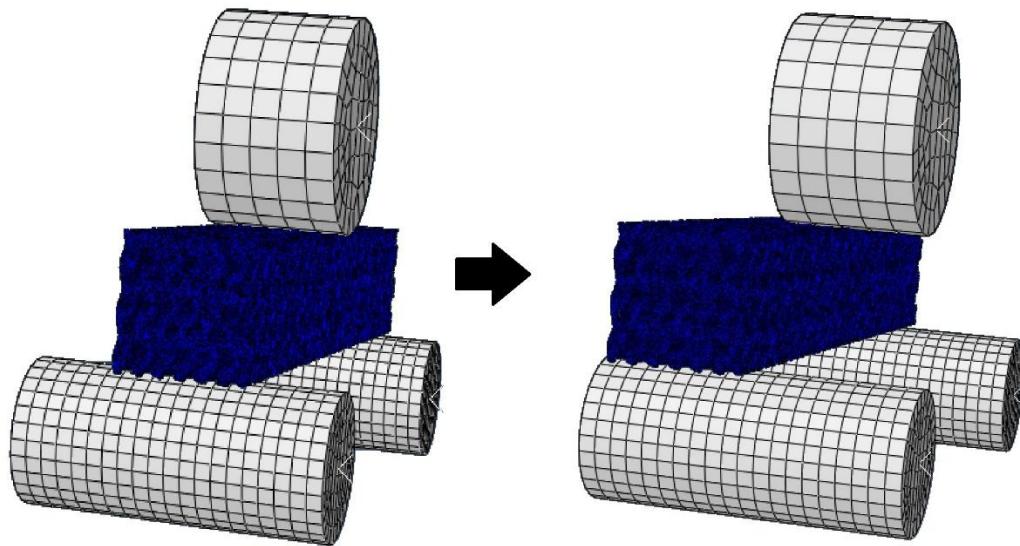


Figura 54. Ejemplo de desplazamiento trasero durante ensayo de flexión perspectiva diagonal

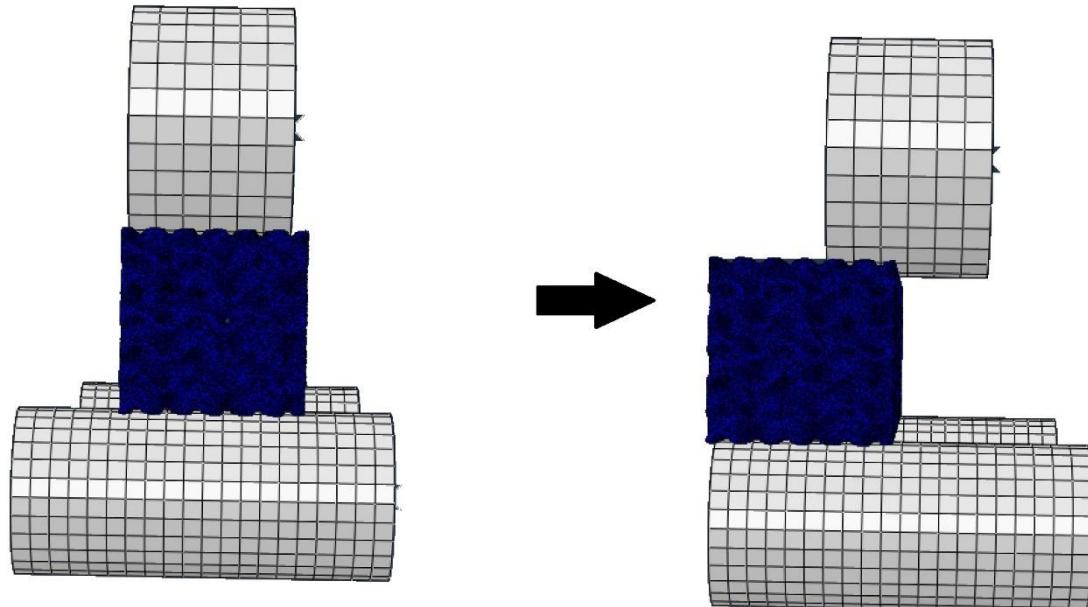


Figura 55. Ejemplo de desplazamiento trasero durante ensayo de flexión perspectiva lateral

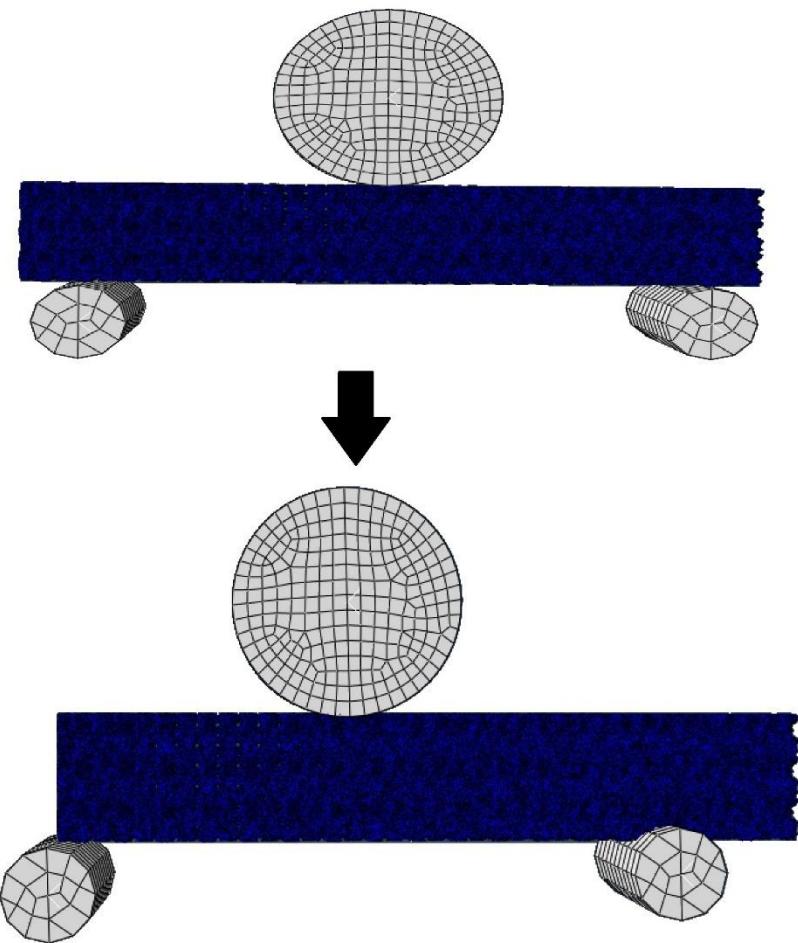


Figura 56. Ejemplo de desplazamiento lateral en ensayo de flexión perspectiva frontal

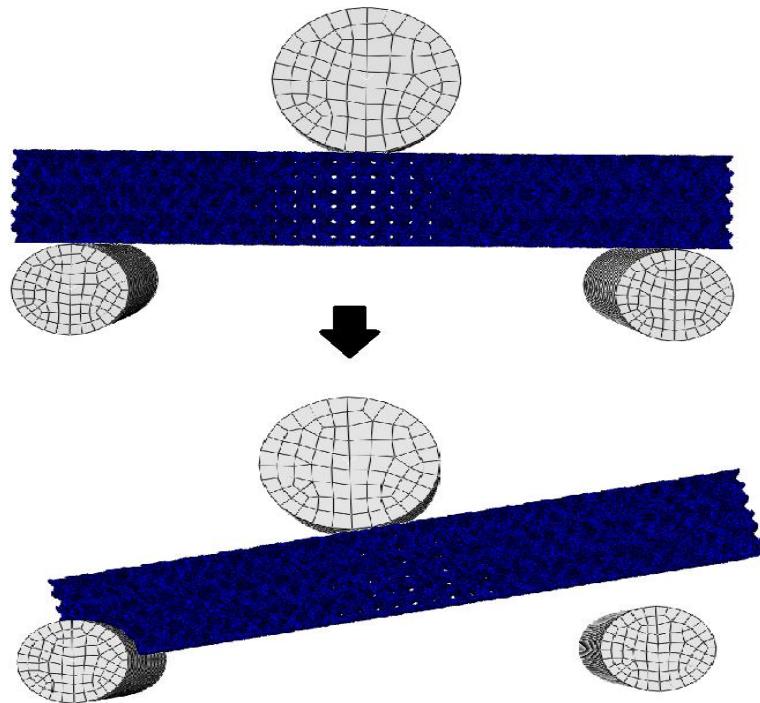


Figura 57. Ejemplo de giro de la probeta desde la perspectiva frontal