



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO  
CARRERA DE BIOMEDICINA**

**ANÁLISIS NUMÉRICO COMPUTACIONAL TÉRMICO EN ESTRUCTURAS  
BASADAS EN SUPERFICIES MÍNIMAS TRIPERIÓDICAS PARA APLICACIONES  
EN REGENERACIÓN DE TEJIDOS**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del Título de:**

**INGENIERO BIOMÉDICO**

**AUTOR: JUAN JOSÉ MACHUCA VALAREZO**

**TUTOR: MICAELA NATALY VILLA ROSERO**

**Quito - Ecuador**

**2025**

## **CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Yo, Juan José Machuca Valarezo con documento de identificación N° 0930388715 manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 22 de octubre del año 2025

Atentamente,



-----  
Juan José Machuca Valarezo  
0930388715

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE  
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Juan José Machuca Valarezo con documento de identificación No. 0930388715 expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Artículo Científico: “ANÁLISIS NUMÉRICO COMPUTACIONAL TÉRMICO EN ESTRUCTURAS BASADAS EN SUPERFICIES MÍNIMAS TRIPERIÓDICAS PARA APLICACIONES EN REGENERACIÓN DE TEJIDOS”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Biomedicina, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 22 de octubre del año 2025

Atentamente,



-----  
Juan José Machuca Valarezo

0930388715

## CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Micaela Nataly Villa Rosero con documento de identificación N° 0302002977 , docente de la Universidad Politécnica Salesiana declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: ANÁLISIS NUMÉRICO COMPUTACIONAL TÉRMICO EN ESTRUCTURAS BASADAS EN SUPERFICIES MÍNIMAS TRIPERIÓDICAS PARA APLICACIONES EN REGENERACIÓN DE TEJIDOS, realizado por Juan José Machuca Valarezo con documento de identificación N° 0930388715, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción artículo científico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 08 de agosto del año 2025

Atentamente,



Micaela Nataly Villa Rosero

0302002977

# ANÁLISIS NUMÉRICO COMPUTACIONAL TÉRMICO EN ESTRUCTURAS BASADAS EN SUPERFICIES MÍNIMAS TRIPERIÓDICAS PARA APLICACIONES EN REGENERACIÓN DE TEJIDOS

## THERMAL COMPUTATIONAL NUMERICAL ANALYSIS IN TRIPLY PERIODIC MINIMAL SURFACE-BASED STRUCTURES FOR TISSUE REGENERATION APPLICATIONS

Machuca Valarezo Juan José

### Resumen

Este estudio analiza el comportamiento térmico-estructural de estructuras porosas basadas en superficies mínimas triperiódicas (TPMS), utilizando las geometrías Gyroid y Schwarz-P fabricadas en Ti6Al4V y acero inoxidable 316L. Las simulaciones se realizaron en ANSYS 2024 R1 bajo condiciones térmicas estacionarias y transitorias, aplicando un flujo de calor dependiente del tiempo y con temperaturas iniciales de base entre 150 °C y 400 °C. Se evaluaron los esfuerzos equivalentes de Von Mises y la deformación total para determinar el rendimiento mecánico de cada configuración. Ti6Al4V mostró mayor resistencia con menores niveles de deformación, mientras que el 316L evidenció una mayor ductilidad. La geometría Schwarz-P presentó menores deformaciones frente a Gyroid, con una respuesta más controlada al incremento térmico. Además, al aumentar la temperatura de precalentamiento se observaron reducciones notables en los esfuerzos residuales, lo que concuerda con estudios experimentales previos. Se concluye que la combinación Schwarz-P y Ti6Al4V en régimen transitorio ofrece un equilibrio favorable entre rigidez, estabilidad térmica y comportamiento mecánico.

**Palabras clave:** 316L, ANSYS, Gyroid, Schwarz-P, simulación térmica-estructural, Ti6Al4V, TPMS

### Abstract

This study examines the thermo-mechanical behavior of porous structures based on Triply Periodic Minimal Surfaces (TPMS), using Gyroid and Schwarz-P geometries fabricated in Ti6Al4V and stainless steel 316L. Simulations were conducted in ANSYS 2024 R1 under steady-state and transient thermal conditions, applying a time-dependent heat flux and initial bed temperatures ranging from 150 °C to 400 °C. Von Mises stress and total deformation were evaluated to assess mechanical performance across different configurations. Ti6Al4V exhibited greater resistance with reduced deformation, while 316L showed a more ductile response. Schwarz-P geometry resulted in less deformation than Gyroid, with a more stable behavior under thermal gradients. Additionally, higher bed preheat temperatures led to significant reductions in residual stress, in agreement with prior experimental evidence. The combination of Schwarz-P geometry and Ti6Al4V under transient conditions emerges as an optimal strategy for achieving structural integrity and thermal resistance.

**Keywords:** 316L, ANSYS, Gyroid, Schwarz-P, thermal-structural simulation, Ti6Al4V, TPMS

---

<sup>1</sup> Carrera de Ingeniería en Biomedicina, Universidad Politécnica Salesiana, Sede Quito, Ecuador.  
Autor para correspondencia: Juan José Machuca Valarezo. Correo electrónico: jmachucav@est.ups.edu.ec

## 1. Introducción

La fabricación aditiva ha transformado el desarrollo de dispositivos biomédicos, abriendo paso a soluciones personalizadas y estructuralmente complejas. En este caso, las estructuras basadas en superficies mínimas triperiódicas (TPMS, por sus siglas en inglés) han captado un interés cada vez mayor por su combinación única de propiedades mecánicas robustas y porosidad interconectada, dos características esenciales para favorecer la integración con tejidos biológicos en aplicaciones clínicas. Dentro de esta familia de geometrías, destacan especialmente las configuraciones Gyroid y Schwarz-P, reconocidas por su capacidad para distribuir cargas de manera eficiente y por su potencial para facilitar el crecimiento celular y la vascularización cuando son empleadas como andamios en implantes óseos o dentales [1, 2].

Las estructuras TPMS poseen una topología continua y sin bordes afilados, lo que reduce la concentración de tensiones y mejora el rendimiento mecánico frente a esfuerzos cíclicos. La geometría Gyroid, por ejemplo, presenta un comportamiento mecánico isotrópico y ha demostrado un equilibrio favorable entre rigidez y capacidad de absorción de energía [3, 4]. Por otro lado, la estructura Schwarz-P, con su arquitectura cúbica interconectada, se ha estudiado por su estabilidad bajo cargas compresivas y su menor susceptibilidad a deformaciones localizadas, posicionándola como una opción viable para aplicaciones donde se requiera una alta resistencia estructural [5].

Por otra parte, ANSYS se ha posicionado como una plataforma importante para predecir el comportamiento mecánico y térmico de estructuras TPMS, permitiendo a los investigadores optimizar parámetros como el grosor de pared, el tamaño de celda y la orientación geométrica. La simulación computacional, especialmente bajo condiciones de carga cíclica y térmica, ofrece una alternativa valiosa a los ensayos físicos, reduciendo tiempos y costos en las fases de desarrollo [6, 7].

Diversos estudios han comparado el desempeño de Gyroid y Schwarz-P fabricadas en aleaciones como Ti6Al4V y acero inoxidable 316L, evaluando propiedades como la resistencia a la fatiga, la absorción de impactos y la distribución de esfuerzos residuales [8, 9]. Estas aleaciones han sido seleccionadas no solo por su resistencia mecánica y biocompatibilidad, sino también por su disponibilidad en procesos de manufactura aditiva como SLM y LPBF, que permiten una fidelidad geométrica precisa y control sobre la microestructura interna [10].

El interés científico en estas configuraciones ha sido tal que se han realizado múltiples trabajos de revisión y modelado para identificar patrones óptimos de distribución porosa, considerando también aspectos como la gradación funcional de materiales o el control del flujo térmico interno durante la fusión láser [11, 12]. Así, la caracterización computacional de TPMS como Gyroid y Schwarz-P se ha consolidado como una estrategia efectiva para garantizar que los implantes no solo cumplan con los requerimientos biomecánicos, sino que también se integren adecuadamente al tejido circundante, favoreciendo procesos como la osteointegración y la regeneración celular [13].

Este trabajo se enfoca precisamente en el análisis computacional de estas dos geometrías, aplicando modelos numéricos en ANSYS para evaluar su comportamiento frente a diferentes condiciones de carga y parámetros de diseño.

La intención no es únicamente validar sus propiedades mecánicas, sino también explorar su adaptabilidad a distintos escenarios clínicos donde la resistencia, la porosidad efectiva y la estabilidad estructural resultan determinantes.

### 1.1. Aplicaciones biomédicas de estructuras TPMS

Las estructuras mínimas triperiódicas (TPMS, por sus siglas en inglés) han adquirido una relevancia creciente en el campo de la ingeniería biomédica debido a su capacidad para imitar la arquitectura trabecular del hueso humano. Esta capacidad las convierte en candidatas ideales para el desarrollo de implantes *customizados*, con un nivel de porosidad e interconectividad que favorece tanto la osteointegración como el transporte de nutrientes y células [1]. La geometría continua y sin bordes afilados de estas superficies proporciona una distribución homogénea de tensiones, reduciendo concentraciones de esfuerzo que suelen ser problemáticas en otras configuraciones [2].

Entre las aplicaciones más comunes se encuentra el uso de TPMS en implantes ortopédicos como reemplazos de cadera, rodilla o vértebras, además de su creciente aplicación en el diseño de dispositivos dentales y maxilofaciales [13]. De manera específica, la estructura Schwarz-P y la Gyroid han demostrado un equilibrio entre resistencia mecánica y volumen de poro que favorece la regeneración ósea en entornos fisiológicos exigentes [8].

### 1.2. Ventajas mecánicas y comportamiento estructural

Las TPMS presentan propiedades mecánicas superiores a otras estructuras porosas debido a su conectividad tridimensional continua. Estas características les permiten mantener una alta resistencia específica y un comportamiento elástico adaptativo ante cargas cíclicas [5]. Estudios experimentales han demostrado que la estructura Gyroid, en particular, puede soportar altos niveles de deformación sin colapsar, mientras que la Schwarz-P ofrece una mejor rigidez axial [3]. Esta diferenciación en comportamiento permite su selección en función de los requerimientos mecánicos específicos del tejido a reemplazar.

Los trabajos de [14] y [15] destacan el papel del gradiente funcional en la optimización de propiedades mecánicas, señalando que una transición progresiva en la densidad estructural puede minimizar la rigidez del implante y mejorar la distribución de cargas, lo cual es vital para evitar el efecto *stress shielding*.

### 1.3. Procesos de fabricación aditiva (enfoque en Ti6Al4V y 316L)

El Ti6Al4V y el acero inoxidable 316L son los materiales más empleados en la manufactura aditiva de TPMS debido a su biocompatibilidad, resistencia a la corrosión y comportamiento mecánico en entornos biológicos. El proceso de fusión por láser en lecho de polvo (LPBF) permite una fabricación precisa de estas estructuras, aunque implica desafíos técnicos relacionados con esfuerzos residuales y distorsiones geométricas [6].

La investigación [9] presenta un enfoque basado en la fabricación de gradientes de rigidez mediante LPBF, lo que permite adaptar localmente las propiedades mecánicas del implante a las necesidades fisiológicas. Asimismo, [16]

reporta mecanismos de deformación y evolución microestructural en estructuras de 316L impresas, destacando su relevancia en ambientes de carga fluctuante.

#### 1.4. Análisis numérico y simulaciones FEM

El análisis mediante métodos de elementos finitos (FEM) ha sido fundamental para evaluar y predecir el comportamiento estructural de las TPMS bajo condiciones fisiológicas. Los estudios [17] y [18] demuestran que las simulaciones permiten identificar puntos críticos de tensión y optimizar el diseño geométrico antes de la fabricación, reduciendo así el tiempo y costo en pruebas experimentales.

En el contexto biomédico, las simulaciones también han permitido evaluar la respuesta al desgaste, la fatiga y la transferencia de calor en ambientes corporales [7]. Esta herramienta resulta clave para validar el desempeño de los implantes en fases preclínicas.

#### 1.5. Tendencias y desafíos en el diseño de implantes personalizados

Los avances recientes se orientan hacia el diseño de implantes totalmente personalizados que integren información del paciente obtenida por tomografía computarizada o resonancia magnética. En este sentido, [11] y [12] identifican tendencias como el uso de modelos generativos para el diseño de porosidad, el control del gradiente de propiedades mecánicas, y la simulación de escenarios postoperatorios a largo plazo.

No obstante, persisten desafíos relacionados con la estandarización de procesos, la validación biológica *in vivo*, y la regulación normativa para la fabricación personalizada. La necesidad de plataformas integradas de diseño, simulación y fabricación sigue siendo una prioridad para llevar estas tecnologías a la práctica clínica con seguridad y eficiencia [1].

## 2. Materiales y Métodos

### 2.1. Enfoque general de simulación

Este estudio se desarrolló mediante una metodología cuantitativa basada en simulaciones por elementos finitos (FEM), implementadas en el software ANSYS 2024 R1. Se utilizó un enfoque acoplado térmico-estructural, con el propósito de evaluar cómo los gradientes térmicos inducidos por el proceso LPBF influyen en la respuesta mecánica de estructuras porosas metálicas. Esta estrategia permitió analizar la distribución de esfuerzos residuales y deformaciones en función del comportamiento térmico transitorio.

### 2.2. Materiales seleccionados

Los materiales empleados fueron la aleación Ti6Al4V y el acero inoxidable 316L, ambos comúnmente utilizados en aplicaciones biomédicas. Ti6Al4V destaca por su alta relación resistencia-peso, biocompatibilidad y módulo de elasticidad intermedio (110 GPa), lo cual reduce el efecto de apantallamiento de esfuerzos. Por su parte, el acero 316L ofrece buena ductilidad, alta resistencia a la corrosión y un costo más bajo, con un módulo de elasticidad de aproximadamente 200 GPa.

### 2.3. Geometrías utilizadas

Se analizaron dos tipos de estructuras: Gyroid y Schwarz-P, clasificadas como superficies mínimas triperiódicas (TPMS). Estas configuraciones fueron seleccionadas por su topología continua, porosidad interconectada y capacidad para distribuir uniformemente las tensiones. Ambas geometrías fueron generadas directamente en el módulo *Material Designer* de ANSYS, lo que permitió definir una celda unitaria repetitiva dentro de un dominio cúbico de  $15 \times 15 \times 15 \text{ mm}^3$ .

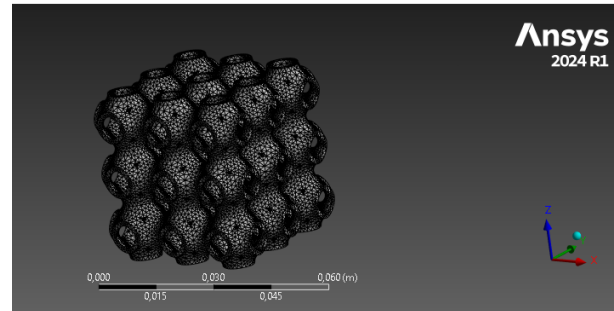


Figura 1. Estructura TPMS con geometría Schwarz-P

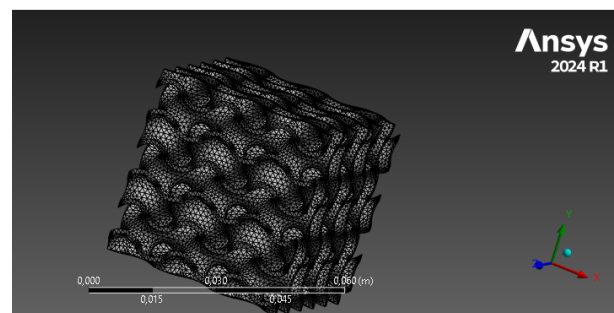


Figura 2. Estructura TPMS con geometría Gyroid

### 2.4. Definición del modelo numérico

- **Modelado geométrico:** Se utilizaron celdas periódicas de 2 mm con una porosidad del 80 %, conforme a configuraciones reportadas en literatura para simular condiciones fisiológicas [19].
- **Mallado:** Se emplearon elementos SOLID187 con refinamiento local en zonas curvas. El tamaño mínimo de elemento fue de 0.3 mm, adecuado para capturar gradientes térmicos y deformaciones mecánicas con alta fidelidad.
- **Propiedades materiales:** Para Ti6Al4V se asignó una conductividad térmica de 6.7 W/mK, coeficiente de expansión térmica de  $9,5 \times 10^{-6}/\text{K}$  y densidad de 4420 kg/m<sup>3</sup>. En el caso del 316L, se utilizó una conductividad de 16 W/mK, expansión térmica  $16,0 \times 10^{-6}/\text{K}$  y densidad de 8000 kg/m<sup>3</sup>.
- **Condiciones de contorno:** En el análisis estructural, se restringieron los desplazamientos en los tres ejes (X, Y y Z) en la base inferior de la estructura, utilizando tres condiciones independientes de *Displacement*. Esta configuración asegura que la base funcione como apoyo fijo, permitiendo una propagación natural de deformaciones hacia el resto del volumen sin generar artefactos.

## 2.5. Configuración térmica

El análisis térmico se desarrolló en régimen transitorio. Para simular el precalentamiento localizado, se aplicó un flujo de calor variable en el tiempo con la siguiente expresión:

$$\dot{q} = 4,1 \times 10^5 \cdot \sin\left(\frac{180 \cdot t}{60}\right) \left[\frac{W}{m^2}\right] \quad (1)$$

Este modelo representa un impulso térmico con aumento y descenso gradual. La forma senoidal distribuye la energía térmica de manera más realista, evitando transiciones bruscas en la simulación.

La estructura partió de una temperatura inicial de 150 °C o 400 °C, dependiendo del escenario simulado. Esta condición de partida buscó reflejar situaciones de precalentamiento parcial o avanzado.

Para permitir la disipación del calor, se aplicó una condición de convección en las superficies expuestas. El coeficiente de película fue de 20 W/m<sup>2</sup> · °C, con una temperatura ambiente de 25 °C. Estos valores se mantuvieron constantes durante todo el análisis. La convección ayudó a simular un entorno más realista en el que el exceso de calor puede transferirse al ambiente circundante.

## 2.6. Criterios de comparación

Se evaluaron las siguientes métricas:

- Esfuerzo equivalente de Von Mises (máximo y promedio).
- Deformación total equivalente.

Estas métricas permitieron comparar el comportamiento térmico-estructural de las distintas combinaciones de material y geometría, proporcionando una base cuantitativa para determinar su aplicabilidad en implantes para regeneración de tejidos.

## 3. Resultados y Discusión

En esta sección se presentan los resultados obtenidos mediante simulaciones termo-mecánicas realizadas sobre las geometrías TPMS tipo Gyroid y Schwarz-P, fabricadas con los materiales **Ti6Al4V** (resaltado en azul) y **acero inoxidable 316L** (resaltado en rojo), bajo condiciones térmicas *steady-state* y *transient*. Los parámetros evaluados incluyen el esfuerzo equivalente de Von Mises y la deformación total.

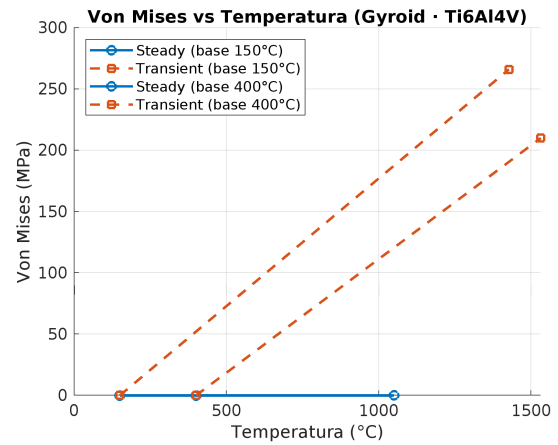
### 3.1. Geometría Gyroid

Los valores de esfuerzo de Von Mises para la geometría Gyroid se resumen en la Tabla 1. El máximo esfuerzo se registró en acero inoxidable 316L bajo condiciones transitorias con un gradiente térmico de 150–943 °C, alcanzando  $4,10 \times 10^8$  Pa. En segundo lugar se ubicó Ti6Al4V con  $2,66 \times 10^8$  Pa bajo condiciones transitorias y un gradiente de 150–1427 °C.

Los resultados más bajos corresponden al análisis estacionario. El mínimo general se observó en Ti6Al4V con  $5,38 \times 10^{-6}$  Pa a 400–1050 °C. Tanto en Ti6Al4V como en 316L, los valores en régimen steady-state se mantuvieron en niveles muy bajos, confirmando la estabilidad estructural térmica en ausencia de variaciones temporales.

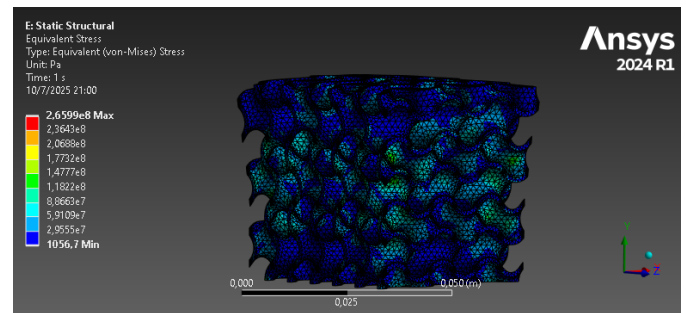
**Tabla 1.** Valores mínimos y máximos de esfuerzo de Von Mises en geometría Gyroid para Ti6Al4V (azul) y 316L (rojo)

Análisis	(°C)	Von Mises mín. (Pa)	Von Mises máx. (Pa)
Steady	150–1050	$1,58E-04$	$6,78E+04$
Steady	400–1050	$1,75E-04$	$6,78E+04$
Transient	150–943	1885,1	$4,10E+08$
Transient	400–1112	1994,2	$2,88E+08$
Steady	150–1050	$5,84E-06$	$5,88E+03$
Steady	400–1050	$5,38E-06$	$5,88E+03$
Transient	150–1427	1056,7	$2,66E+08$
Transient	400–1532	2154,3	$2,10E+08$



**Figura 3.** Curva de Von Mises vs Temperatura para geometría Gyroid con Ti6Al4V

Ti6Al4V mostró un comportamiento controlado frente a cargas térmicas variables. A pesar del aumento en la temperatura máxima, el esfuerzo de Von Mises no superó los  $2,66 \times 10^8$  Pa. La respuesta se mantuvo dentro de límites aceptables incluso en gradientes amplios, evidenciando una resistencia mecánica favorable bajo condiciones térmicas fluctuantes.



**Figura 4.** Resultados de esfuerzo residual Von Mises Ti6Al4V con geometría Gyroid

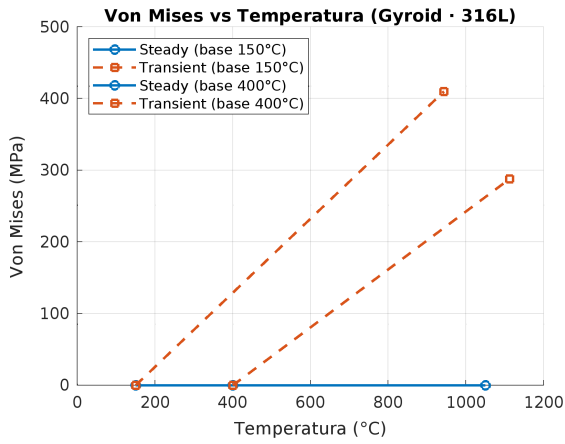


Figura 5. Curva de Von Mises vs Temperatura para geometría Gyroid con 316L

El acero 316L respondió con mayor sensibilidad ante cargas térmicas transitorias. El pico de esfuerzo se alcanzó en el primer escenario transitorio, superando por amplio margen los resultados del resto de combinaciones. En régimen estacionario, el comportamiento fue uniforme y contenido. Este contraste refleja una menor tolerancia del 316L ante cambios térmicos rápidos.

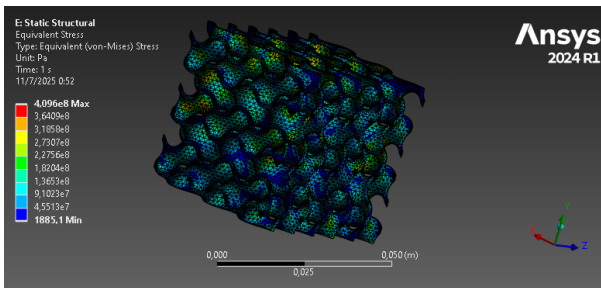


Figura 6. Resultados de esfuerzo residual Von Mises 316L con geometría Gyroid

En la Tabla 2 se presentan los valores de deformación total para la geometría Gyroid. El material 316L muestra las mayores deformaciones bajo condiciones estacionarias, alcanzando un valor máximo de  $1,56 \times 10^{-3}$  mm con ambas configuraciones térmicas. También exhibe deformaciones relevantes en estado transitorio, donde la deformación máxima fue de  $6,58 \times 10^{-4}$  mm con gradiente térmico de 400–1112 °C.

Ti6Al4V mostró una respuesta más contenida. Su mayor valor se obtuvo bajo régimen estacionario a 150–1050 °C, con  $9,26 \times 10^{-4}$  mm. En condiciones transitorias, las deformaciones se mantuvieron por debajo de  $4,72 \times 10^{-4}$  mm, evidenciando un mejor control estructural frente a cargas térmicas dinámicas.

Tabla 2. Valores mínimos y máximos de deformación total en geometría Gyroid para Ti6Al4V (azul) y 316L (rojo)

Análisis	(°C)	Mín. (mm)	Máx. (mm)
Steady	150–1050	$5,88E - 05$	$1,56E - 03$
Steady	400–1050	$5,88E - 05$	$1,56E - 03$
Transient	150–943	$2,33E - 05$	$5,15E - 04$
Transient	400–1112	$6,69E - 06$	$6,58E - 04$
Steady	150–1050	$6,14E - 06$	$9,26E - 04$
Steady	400–1050	$6,14E - 06$	$9,26E - 04$
Transient	150–1427	$4,92E - 07$	$2,74E - 04$
Transient	400–1532	$2,90E - 06$	$4,72E - 04$

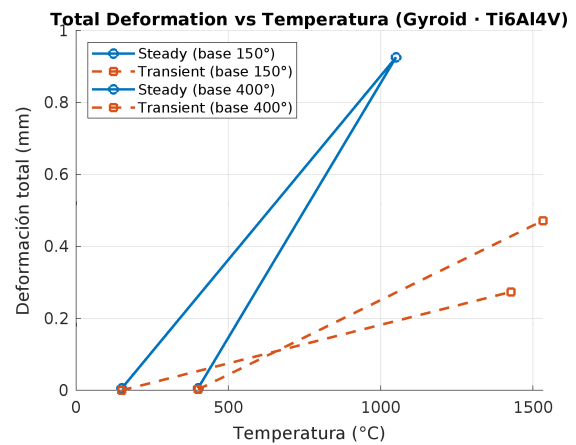


Figura 7. Curva de Deformación Total vs Temperatura para geometría Gyroid con Ti6Al4V

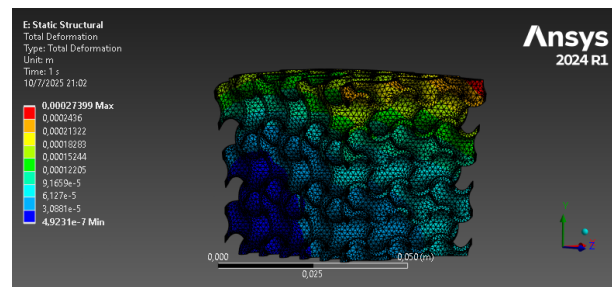
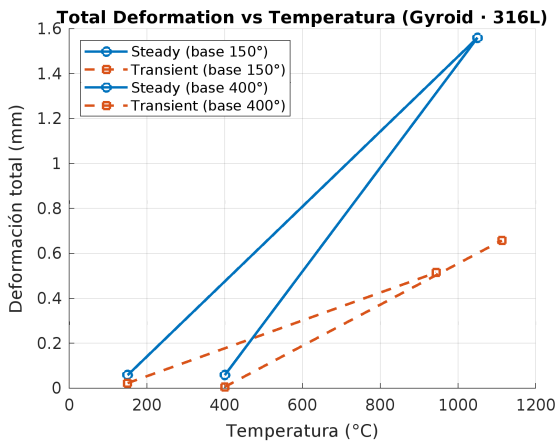


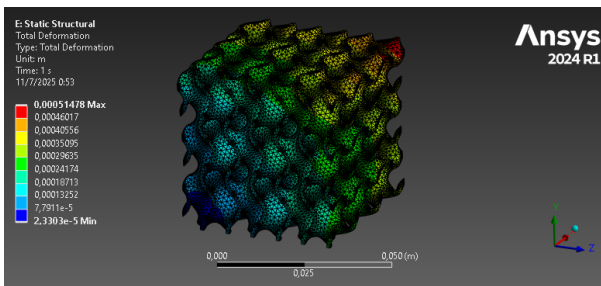
Figura 8. Resultados de deformación Ti6Al4V con geometría Gyroid

Ti6Al4V mantiene un comportamiento estructural firme. Incluso con gradientes térmicos exigentes, la deformación permanece en rangos moderados. Su rigidez térmica y mecánica lo posicionan como una opción confiable frente a cargas transitorias.



**Figura 9.** Curva de Deformación Total vs Temperatura para geometría Gyroid con 316L

El acero inoxidable 316L muestra una tendencia más dúctil. La respuesta a cargas térmicas se manifiesta en mayores deformaciones, sobre todo bajo condiciones estacionarias. Esta característica puede representar un riesgo en aplicaciones donde la precisión dimensional y la rigidez sean críticas.



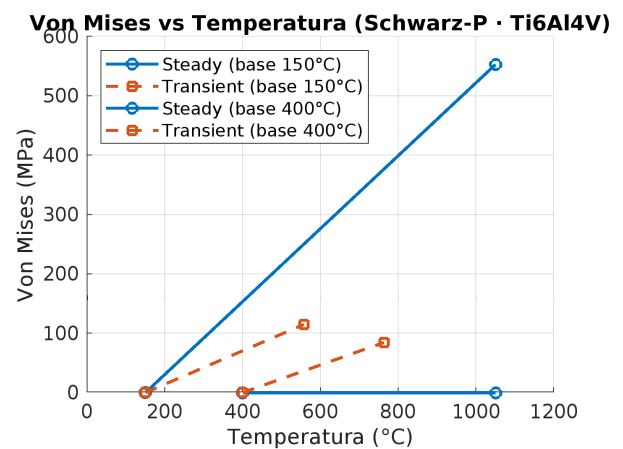
**Figura 10.** Resultados de deformación 316L con geometría Gyroid

### 3.2. Geometría Schwarz-P

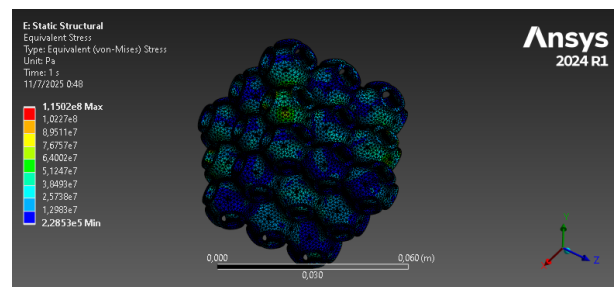
En la Tabla 3 se resumen los valores de esfuerzo de Von Mises obtenidos para la geometría Schwarz-P. Ti6Al4V mostró un comportamiento robusto bajo condiciones térmicas exigentes. El máximo esfuerzo registrado fue de  $5,53 \times 10^8$  Pa en estado estacionario con un rango térmico de 150–1050 °C. Bajo análisis transitorio, los esfuerzos disminuyeron, alcanzando hasta  $1,15 \times 10^8$  Pa en condiciones de 150–557 °C. El comportamiento del acero 316L fue más limitado. Su máximo esfuerzo, de  $4,95 \times 10^8$  Pa, también se presentó en análisis estacionario, pero bajo condiciones transitorias, la respuesta bajó a un máximo de  $1,33 \times 10^8$  Pa.

**Tabla 3.** Valores mínimos y máximos de esfuerzo de Von Mises en geometría Schwarz-P para Ti6Al4V (azul) y 316L (rojo)

Análisis	(°C)	Von Mises mín. (Pa)	Von Mises máx. (Pa)
Steady	150–1050	$4,35E + 05$	$4,95E + 08$
Steady	400–1050	$1,27E - 06$	$2,14E + 00$
Transient	150–405	$1,14E + 06$	$3,98E + 08$
Transient	400–599	$1,65E + 05$	$1,33E + 08$
Steady	150–1050	54948	$5,53E + 08$
Steady	400–1050	$2,75E - 07$	$1,79E - 01$
Transient	150–557	$2,29E + 05$	$1,15E + 08$
Transient	400–763	$1,87E + 05$	$8,47E + 07$

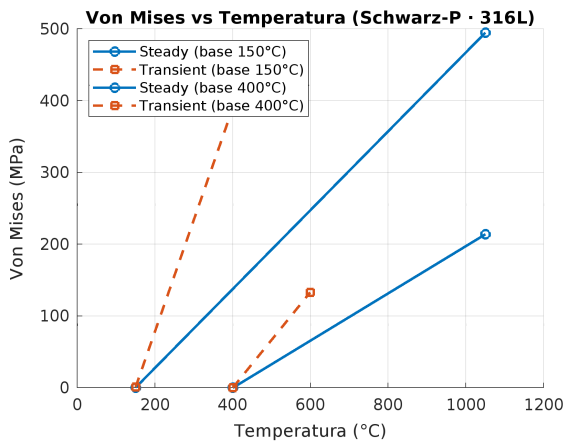


**Figura 11.** Curva de Von Mises vs Temperatura para geometría Schwarz-P con Ti6Al4V



**Figura 12.** Resultados de esfuerzo residual Von Mises Ti6Al4V con geometría Schwarz-P

Ti6Al4V mantiene un desempeño mecánico elevado bajo cargas térmicas. La evolución del esfuerzo es progresiva. En transitorios, los valores se estabilizan con respuestas menores a las de análisis estacionarios, pero dentro de un rango confiable para aplicaciones exigentes.



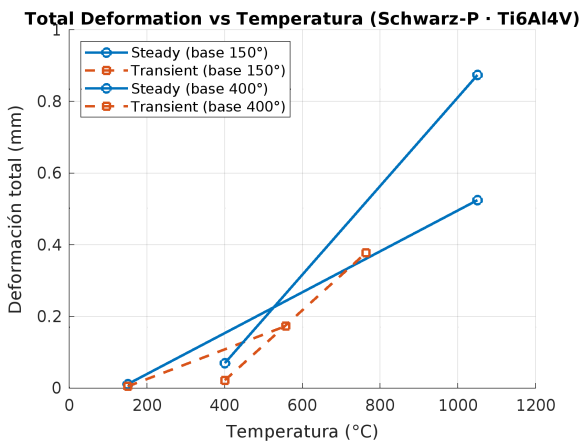
**Figura 13.** Curva de Von Mises vs Temperatura para geometría Schwarz-P con 316L

El acero 316L alcanza su máximo esfuerzo en régimen estacionario con 495 MPa. En análisis transitorios, los niveles se reducen notablemente. Su resistencia es adecuada en condiciones térmicas moderadas, aunque con limitaciones ante exigencias más altas.

La deformación total para la geometría Schwarz-P se muestra en la Tabla 4. El acero inoxidable 316L presentó el valor más alto con  $1,46 \times 10^{-3}$  mm bajo análisis estacionario con una temperatura de 400–1050°C. Ti6Al4V mantuvo deformaciones más bajas en todos los casos simulados.

**Tabla 4.** Valores mínimos y máximos de deformación total en geometría Schwarz-P para Ti6Al4V (azul) y 316L (rojo)

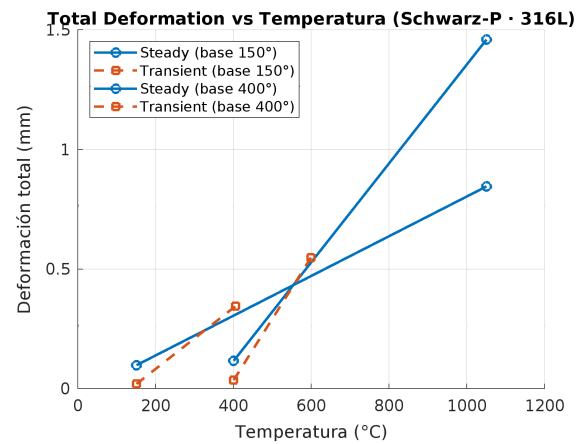
Análisis	(°C)	Mín. (mm)	Máx. (mm)
Steady	150–1050	$9,87E-06$	$8,46E-04$
Steady	400–1050	$1,17E-04$	$1,46E-03$
Transient	150–405	$2,02E-05$	$3,46E-04$
Transient	400–599	$3,66E-05$	$5,49E-04$
Steady	150–1050	$1,16E-05$	$5,25E-04$
Steady	400–1050	$7,03E-05$	$8,74E-04$
Transient	150–557	$5,28E-06$	$1,74E-04$
Transient	400–763	$2,24E-05$	$3,78E-04$



**Figura 14.** Curva de Deformación Total vs Temperatura para geometría Schwarz-P con Ti6Al4V

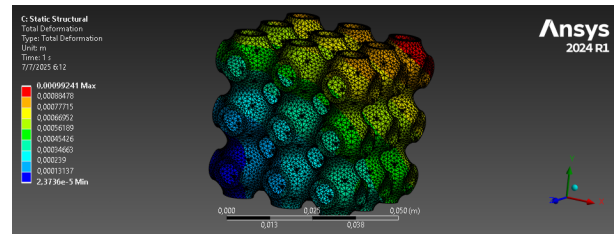
Ti6Al4V mantiene una deformación reducida bajo todos

los escenarios simulados. La respuesta mecánica conserva una línea estable, incluso frente a variaciones térmicas aceleradas.



**Figura 15.** Curva de Deformación Total vs Temperatura para geometría Schwarz-P con 316L

El acero 316L presenta la mayor deformación máxima, alcanzando  $1,46 \times 10^{-3}$  mm en análisis estacionario con 400–1050 °C. Este comportamiento evidencia una mayor ductilidad, pero también mayor susceptibilidad a deformaciones plásticas.

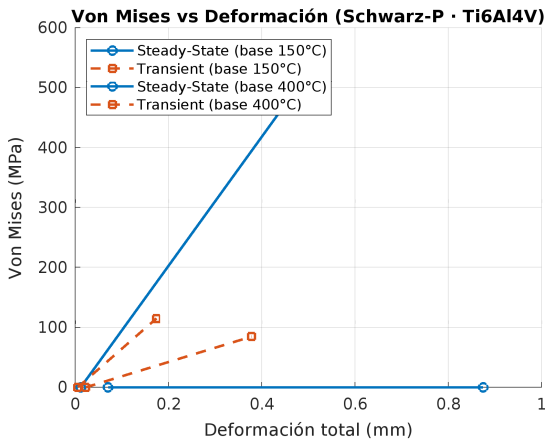


**Figura 16.** Resultados de deformación para 316L con geometría Schwarz-P

### 3.3. Disminución de esfuerzos residuales por efecto térmico

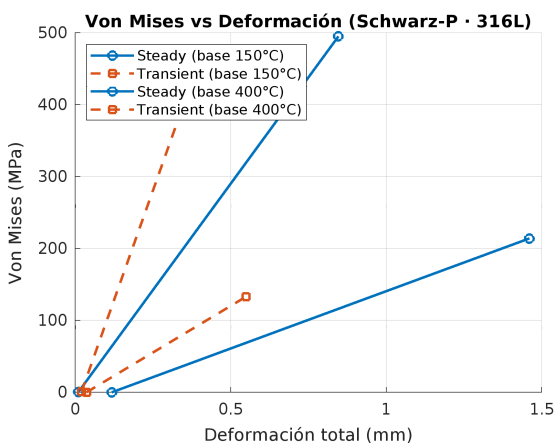
Los resultados obtenidos en esta investigación muestran una clara disminución en los esfuerzos residuales al incrementar la temperatura de precalentamiento en la base. Este comportamiento coincide con lo reportado por [20], quien observó una reducción progresiva del esfuerzo máximo principal al aumentar la temperatura de la cama desde 100 °C hasta 770 °C. Según sus experimentos, a partir de 570 °C los esfuerzos residuales se vuelven prácticamente despreciables, lo que respalda los resultados obtenidos en este estudio, donde los valores simulados también mostraron una disminución significativa con temperaturas superiores a 400 °C.

### 3.4. Relación esfuerzo–deformación



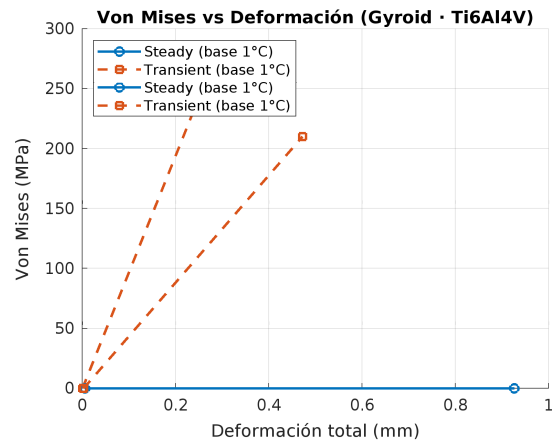
**Figura 17.** Relación esfuerzo-deformación para Schwarz-P con Ti6Al4V

Ti6Al4V con geometría Schwarz-P alcanza esfuerzos elevados con deformaciones limitadas. Las curvas mantienen una pendiente acentuada en estado estacionario, especialmente a 400 °C, lo que evidencia una alta rigidez térmica. Bajo condición transitoria, el esfuerzo también crece de forma significativa, aunque con una leve mayor deformación. El material resiste de forma efectiva las cargas térmicas sin comprometer su forma.



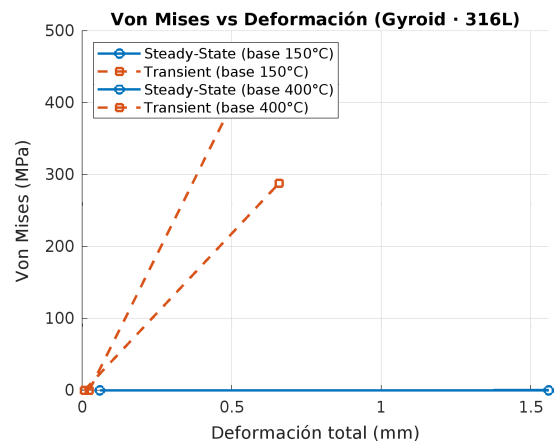
**Figura 18.** Relación esfuerzo-deformación para Schwarz-P con acero 316L

El acero 316L, en Schwarz-P, presenta un comportamiento más dúctil. En condiciones estacionarias con base a 400 °C se registra una mayor deformación con esfuerzos también considerables, mientras que en estado transitorio los esfuerzos disminuyen, aunque se mantiene un nivel alto de deformación. El material se adapta mejor ante gradientes térmicos, pero cede más ante las cargas.



**Figura 19.** Relación esfuerzo-deformación para Gyroid con Ti6Al4V

En geometría Gyroid, Ti6Al4V conserva su rigidez. A pesar de incrementos térmicos, las deformaciones se mantienen bajas. La pendiente es notable en estado transitorio, lo que indica una respuesta mecánica firme incluso ante variaciones térmicas dinámicas. El material se comporta de forma confiable, sin mostrar señales de colapso plástico prematuro.



**Figura 20.** Relación esfuerzo-deformación para Gyroid con acero 316L

El acero 316L en geometría Gyroid muestra una deformación considerablemente mayor, especialmente bajo régimen estacionario. El esfuerzo Von Mises crece lentamente en comparación con Ti6Al4V, lo que refleja una menor resistencia mecánica. A temperaturas más altas, las curvas se aplanan, dejando en evidencia una estructura más flexible, pero menos estable frente a cargas intensas.

### 3.5. Implicaciones clínicas y validación futura

Las estructuras TPMS fabricadas en Ti6Al4V muestran un rendimiento termo-mecánico destacado. Los esfuerzos de Von Mises permanecen controlados y las deformaciones se mantienen bajas incluso con gradientes térmicos amplios. La rigidez combinada con la estabilidad térmica convierte a este material en una opción confiable para implantes que deben conservar su forma y funcionar adecuadamente dentro del cuerpo.

El modelo utilizado presenta limitaciones. Las simulaciones no incluyen imperfecciones asociadas a la manufac-

tura aditiva, como poros, microdefectos o variaciones en la microestructura. Tampoco se contemplan interacciones biológicas con el tejido óseo ni la acción de cargas dinámicas durante la función del implante. Estas omisiones hacen necesario validar los resultados con ensayos experimentales y pruebas clínicas para confirmar que el comportamiento observado en el modelo corresponde al desempeño real en pacientes.

La aplicación de estas estructuras en implantes médicos puede favorecer una integración sólida con el hueso, prolongar la vida útil del dispositivo y reducir complicaciones en la recuperación. Para que estas ventajas se confirmen, se requiere comprobar en estudios controlados que las propiedades estimadas se mantengan en condiciones fisiológicas reales y a largo plazo.

#### 4. Conclusiones

Ti6Al4V demostró un comportamiento más estable frente a cargas térmicas, tanto en geometría Gyroid como en Schwarz-P. Sus niveles de esfuerzo de Von Mises permanecieron dentro de márgenes mecánicamente aceptables, incluso en condiciones transitorias con gradientes pronunciados. Las deformaciones fueron reducidas en todos los escenarios, reflejando una alta rigidez térmica y mecánica.

El acero inoxidable 316L alcanzó esfuerzos más altos bajo condiciones transitorias, sobre todo en geometría Gyroid, lo que evidencia una mayor sensibilidad ante variaciones térmicas. Las deformaciones también fueron más elevadas, especialmente en régimen estacionario, lo que sugiere un comportamiento más dúctil y menos resistente estructuralmente.

La geometría Schwarz-P presentó una respuesta más firme en ambos materiales. Ti6Al4V mantuvo deformaciones mínimas incluso en transitorios, y el 316L mostró un mejor control térmico en comparación con Gyroid, aunque con tendencia a deformarse más en condiciones estacionarias.

En la relación esfuerzo-deformación, Ti6Al4V mostró pendientes más pronunciadas y sostenidas, indicador de mayor rigidez. El 316L presentó curvas más suaves, asociadas a una respuesta más plástica.

Los resultados posicionan al Ti6Al4V como el material más adecuado para aplicaciones que requieren estabilidad dimensional y resistencia térmica. El acero 316L, por su parte, puede considerarse para diseños que toleren mayor deformación sin comprometer la funcionalidad estructural.

#### Referencias

- [1] S. A. Tyagi and M. Manjaiah, "Additive manufacturing of titanium-based lattice structures for medical applications – a review," *Materials & Design*, vol. 216, p. 110501, 2022.
- [2] R. Hedayati, M. Sadighi, M. Mohammadi-Aghdam, M. Sadighi, S. Torkamani, M. Mohammadzadeh, and M. Sadighi, "Laser powder bed fusion for the fabrication of triply periodic minimal surface lattice structures: Synergistic macroscopic and microscopic optimization," *Additive Manufacturing*, vol. 48, p. 102375, 2021.
- [3] J. Fu, J. Ding, S. Qu, L. Zhang, M. Y. Wang, M. W. Fu, and X. Song, "Improved light-weighting potential of ss316l triply periodic minimal surface shell lattices by micro laser powder bed fusion," *Additive Manufacturing*, 2022, article in Press.
- [4] B. Sokollu, O. Gulcan, and E. I. Konukseven, "Mechanical properties comparison of strut-based and triply periodic minimal surface lattice structures produced by electron beam melting," *Additive Manufacturing*, 2022, article in Press.
- [5] A. Sombatmai, K. Tapracharoen, V. Uthaisangasuk, S. Msolli, and P. Promopattum, "Post-yielding and failure mechanism of additively manufactured triply periodic minimal surface lattice structures," *Materials Today Communications*, 2024, article in Press.
- [6] T. Wu, C. Li, F. Sun, P. Liu, and H. Xia, "Reduction in residual stress and distortion of thin-walled inconel 718 specimens fabricated by selective laser melting: Experiment and numerical simulation," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 840, p. 143074, 2023.
- [7] S. Wang, Z. Wang, Y. Liu, W. Zhang, P. Zou, and Y. Du, "Crystal plasticity modeling of fretting fatigue crack initiation behavior in ti6al4v," *International Journal of Fatigue*, vol. 154, p. 106533, 2022.
- [8] C. Yan, L. Hao, A. Hussein, and P. Young, "Ti-6al-4v triply periodic minimal surface structures for bone implants fabricated via selective laser melting," *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, vol. 51, pp. 61–73, 2023.
- [9] R. Hedayati, M. Sadighi, M. Mohammadi-Aghdam, M. Ghannad, and S. Torkamani, "Laser powder bed fusion of ti6al4v graded scaffold for local stiffness matching," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 781, p. 139214, 2020.
- [10] E. Davoodi, H. Montazerian, A. S. Mirhakimi, M. Zhianmanesh, O. Ibadode, S. I. Shahabad, R. Esmaeilzadeh, E. Sarikhani, S. Toorandaz, S. A. Sarabi, R. Nasiri, Y. Zhu, J. Kadkhodapour, B. Li, A. Khademhosseini, and E. Toyserkani, "Additively manufactured metallic biomaterials," *Materials Science and Engineering: C*, 2023, article in Press.
- [11] Z. Xu, S. M. J. Razavi, and M. R. Ayatollahi, "Functionally graded lattice structures: Fabrication methods, mechanical properties, failure mechanisms and applications," *Materials Today Communications*, 2023, preprint.
- [12] M. V. Kiselevskiy, N. Y. Anisimova, A. V. Kapustin, A. A. Ryzhkin, D. N. Kuznetsova, V. V. Polyakova, and N. A. Enikeev, "Additive manufacturing approaches to design pore structures for development of bioactive scaffolds for orthopedic applications: A critical review," *Preprints*, 2023, preprint.
- [13] J. Gu, S. M. R. Naqvi, L. Chao, C. Jiao, Y. Yang, M. A. Nasir, Z. Tian, L. Shen, D. Wang, and H. Liang, "Stress-driven design method for porous maxillofacial prosthesis based on triply periodic minimal surface," *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 2023, article in Press.

- [14] W. Song, K. Mu, G. Feng, Z. Huang, Y. Liu, X. Huang, and L. Xiao, "Mechanical properties of 3d printed interpenetrating phase composites with tpms architectures," *Materials and Design*, vol. 227, p. 111615, 2023.
- [15] S. Jabarzadeh, A. Ghasemi-Ghalebahman, and A. Najibi, "Investigation into microstructure, mechanical properties, and compressive failure of functionally graded porous cylinders fabricated by slm," *Materials Science and Engineering: A*, 2024, article in Press.
- [16] X. Wang, L. Zhan, S. Wang, W. Xu, X. Wang, Y. Zhao, and J. Zhang, "New insights into microstructure evolution and deformation mechanisms in additively manufactured 316l stainless steel," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 814, p. 141208, 2021.
- [17] M. H. Fard, H. Sadeghi, E. Hosseini, and E. Malekipour, "Thermal and mechanical simulations of the lattice structures in the conformal cooling cavities for 3d printed injection molds," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 120, no. 9, pp. 5791–5805, 2022.
- [18] R. Rahmani, S. Bagherifard, A. Fattahi, and F. Berto, "Wear and fatigue behaviour investigation of hip implant head-stem interface using finite element analysis," *Tribology International*, vol. 165, p. 107330, 2022.
- [19] R. De Biasi, "Simulations techniques for lattice structure design," Ph.D. dissertation, University of Trento, Department of Industrial Engineering, 2024, PhD Thesis.
- [20] H. Ali, "Evolution of residual stress in ti6al4v components fabricated using selective laser melting," PhD thesis, The University of Sheffield, United Kingdom, Aug. 2017.