

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE MECATRÓNICA

Trabajo de integración curricular previo a la obtención del título de Ingeniero en Mecatrónica

Establecimiento de los dominios físicos a partir de estructuras TPMS matemáticamente definidas para obtener intercambiadores de calor compactos reconfigurables.

Autor:

Iván Alexander Trujillo Freire

Director:

Ing. Hernán Vinicio Lara Padilla, PhD.





CONTENIDO

- Antecedentes y Justificación
- Alcance
- Objetivos
- Revisión de la literatura
- Metodología
- Resultados, análisis y discusión
- Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro
- Referencias

**Antecedentes y
Justificación**

Alcance

Objetivos

Revisión de la
literatura

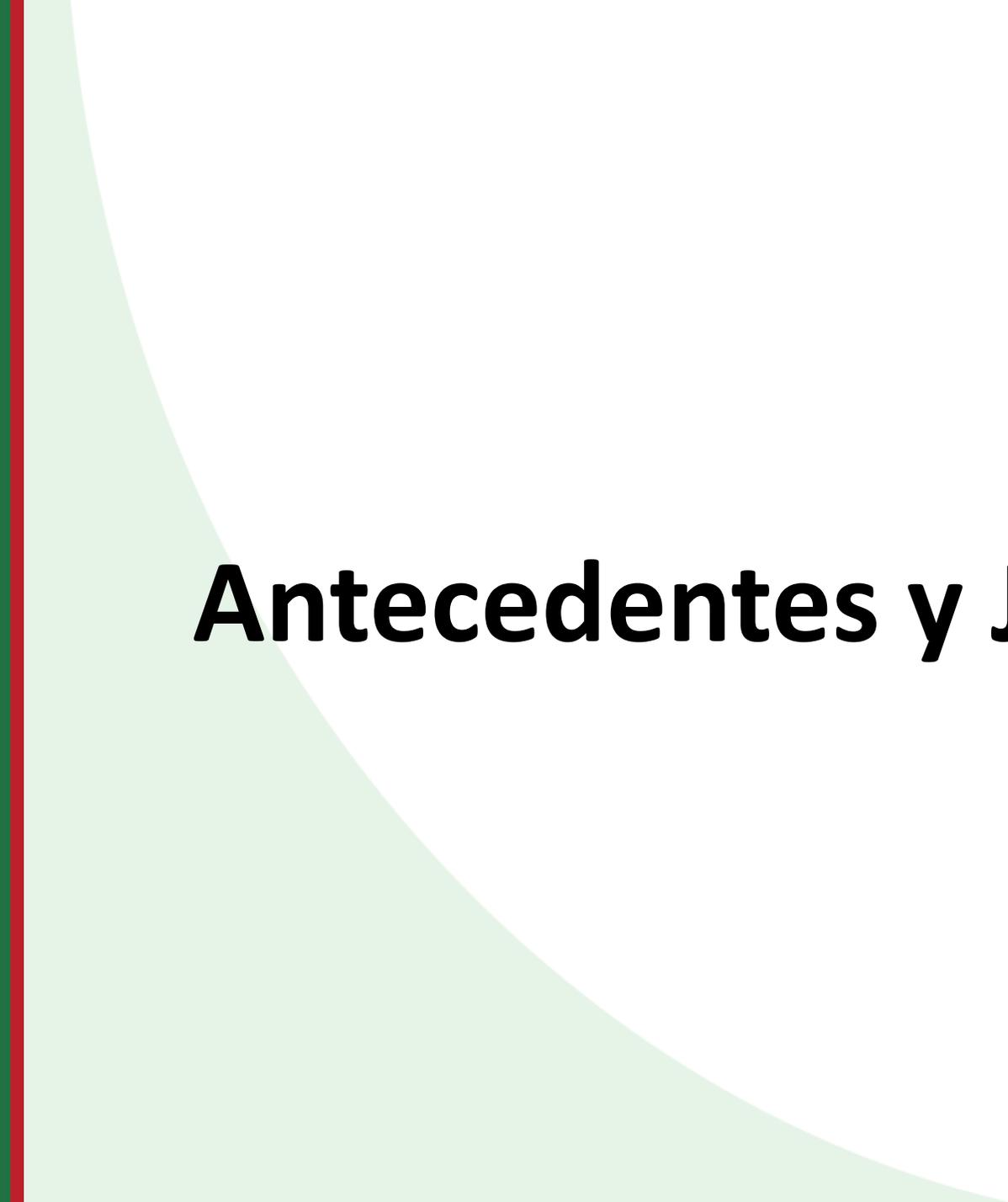
Metodología

Resultados, análisis
y discusión

Conclusiones,
recomendaciones y
trabajo futuro

Referencias

Antecedentes y Justificación



Antecedentes y Justificación

Antecedentes y Justificación

Alcance

Objetivos

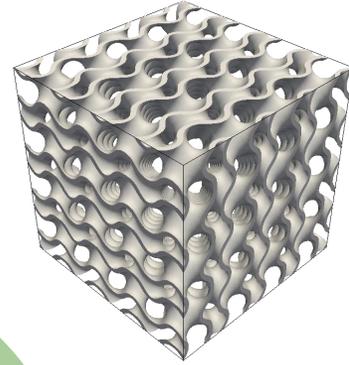
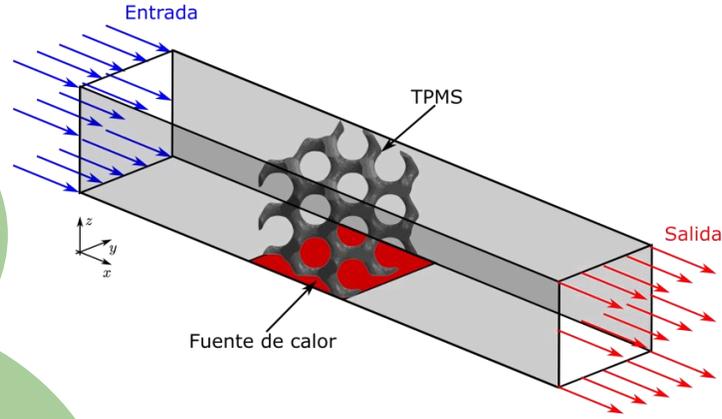
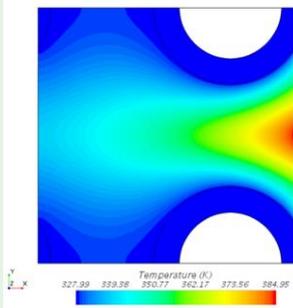
Revisión de la literatura

Metodología

Resultados, análisis y discusión

Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro

Referencias



Presión y temperatura de operación

Tipo de TPMS

Consideraciones de diseño de intercambiadores de calor

Consideraciones de diseño de TPMS

Almacenamiento de partículas

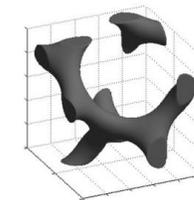
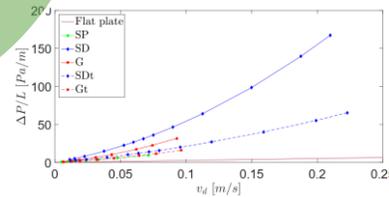
Caída de presión

Constante de nivel

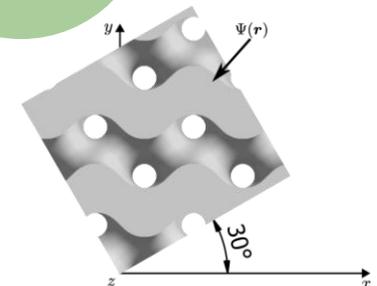
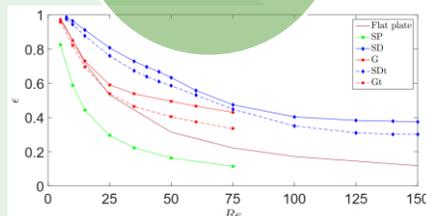
Longitud periódica y espesor de pared

Eficiencia térmica

Orientación de la superficie



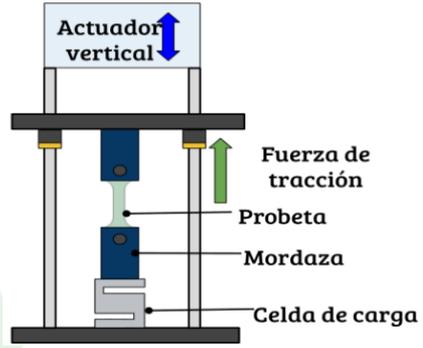
n: 90%
C: -1.196



Antecedentes y Justificación

Antecedentes y Justificación

Caracterización de fotoresinas



Alcance

Objetivos

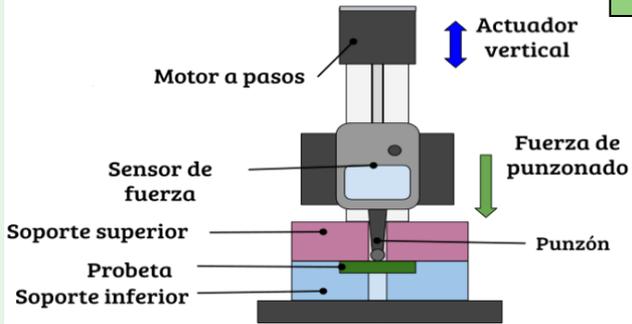
Revisión de la literatura

Metodología

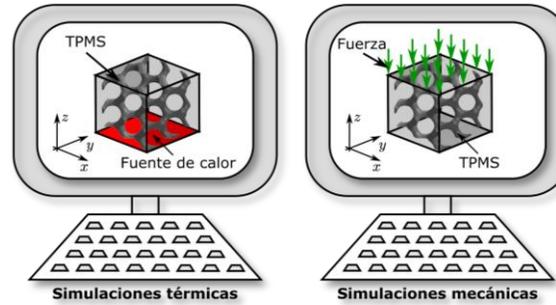
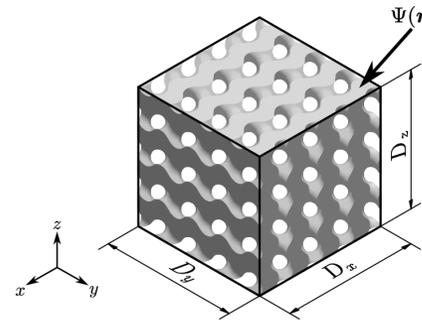
Resultados, análisis y discusión

Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro

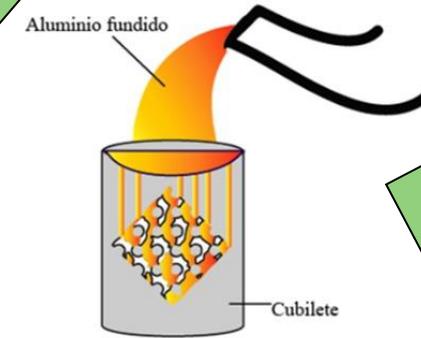
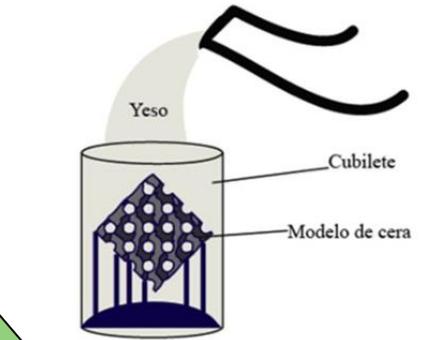
Referencias



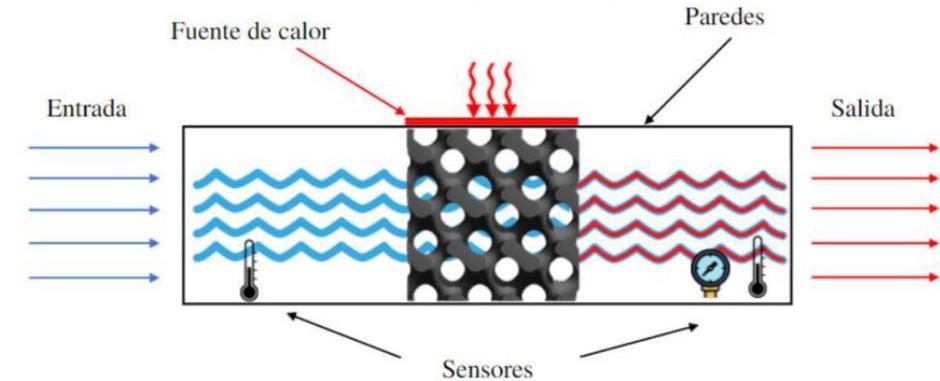
Diseño y simulación de TPMS



Fundición de TPMS



Análisis de prototipo físico



Antecedentes y
Justificación

Alcance

Objetivos

Revisión de la
literatura

Metodología

Resultados, análisis
y discusión

Conclusiones,
recomendaciones y
trabajo futuro

Referencias



Alcance

Antecedentes y Justificación

Alcance

Objetivos

Revisión de la literatura

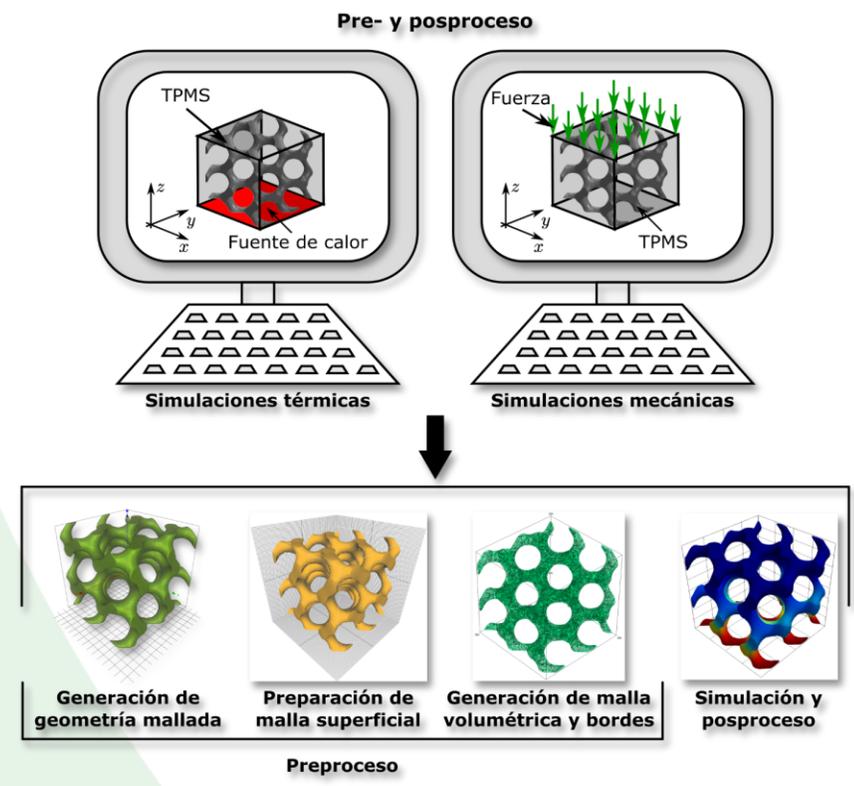
Metodología

Resultados, análisis y discusión

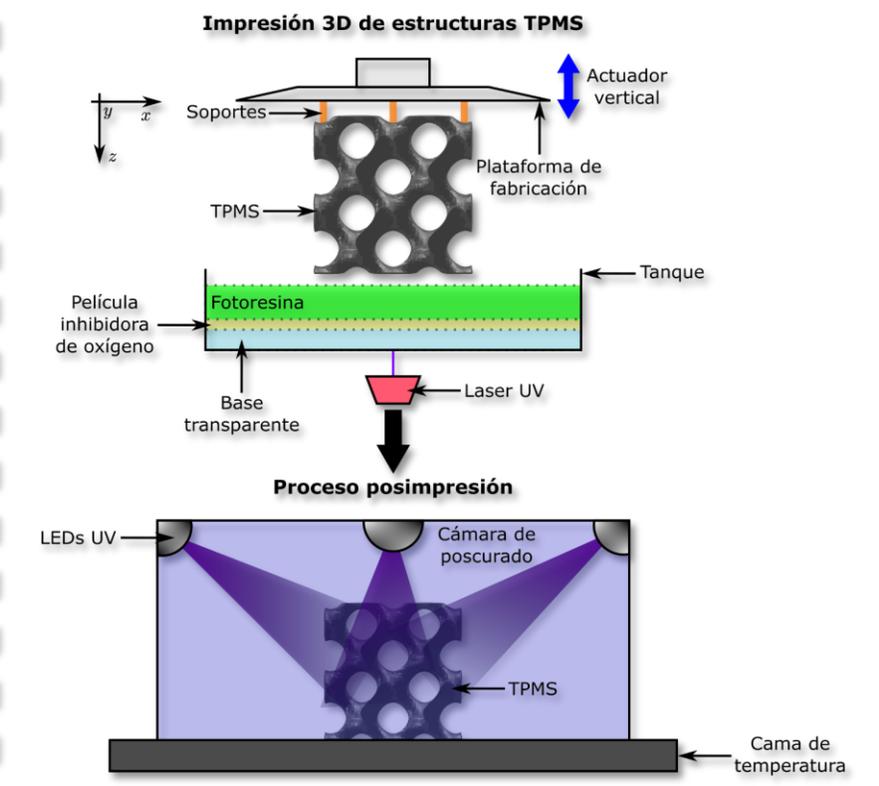
Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro

Referencias

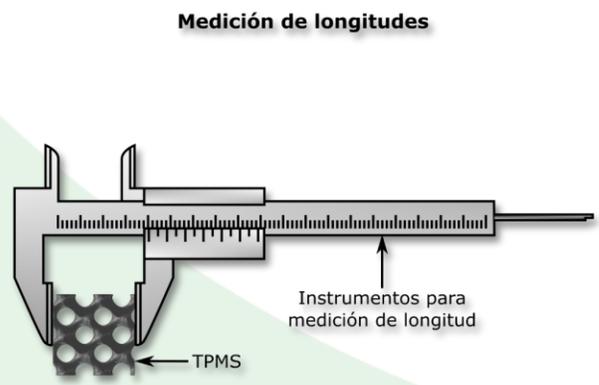
1 Diseño y simulación de estructuras basadas en TPMS



2 Impresión de estructuras TPMS y proceso posimpresión



3 Validación dimensional



Antecedentes y
Justificación

Alcance

Objetivos

Revisión de la
literatura

Metodología

Resultados, análisis
y discusión

Conclusiones,
recomendaciones y
trabajo futuro

Referencias

Objetivos



General

Analizar los detalles de flujo a través de estructuras TPMS con el fin de cuantificar parámetros físicos relevantes para el diseño, fabricación y evaluación del desempeño de intercambiadores de calor compactos, enfocándose en un sólo fluido.

Específicos

1. Establecer los dominios físicos a partir de estructuras TPMS matemáticamente definidas para obtener **intercambiadores de calor compactos reconfigurables**.
2. Desarrollar un **diseño experimental** haciendo uso de factores dependientes de la topología de las estructuras TPMS y también de factores de la simulación por elementos finitos para determinar la influencia de las propiedades topológicas de las estructuras y de las condiciones del experimento **en el desempeño térmico y mecánico** de los intercambiadores compactos
3. Desarrollar **el modelado, la preparación de la superficie y la malla volumétrica** para las estructuras TPMS **usando software libre**.
4. Analizar mediante el **método de elementos finitos** los experimentos para ensayos mecánicos y térmicos de las estructuras TPMS **usando software libre**.
5. Emplear **manufactura aditiva** para generar matrices TPMS para la **fabricación de los intercambiadores compactos**.
6. Evaluar **dimensionalmente las estructuras TPMS** manufacturadas con estereolitografía y compararlas con los diseños computacionales realizados para contrastar la precisión del método.

Antecedentes y Justificación

Alcance

Objetivos

Revisión de la literatura

Metodología

Resultados, análisis y discusión

Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro

Referencias

Antecedentes y
Justificación

Alcance

Objetivos

**Revisión de la
literatura**

Metodología

Resultados, análisis
y discusión

Conclusiones,
recomendaciones y
trabajo futuro

Referencias

Revisión de la literatura

Intercambiadores de calor

Antecedentes y Justificación

Alcance

Objetivos

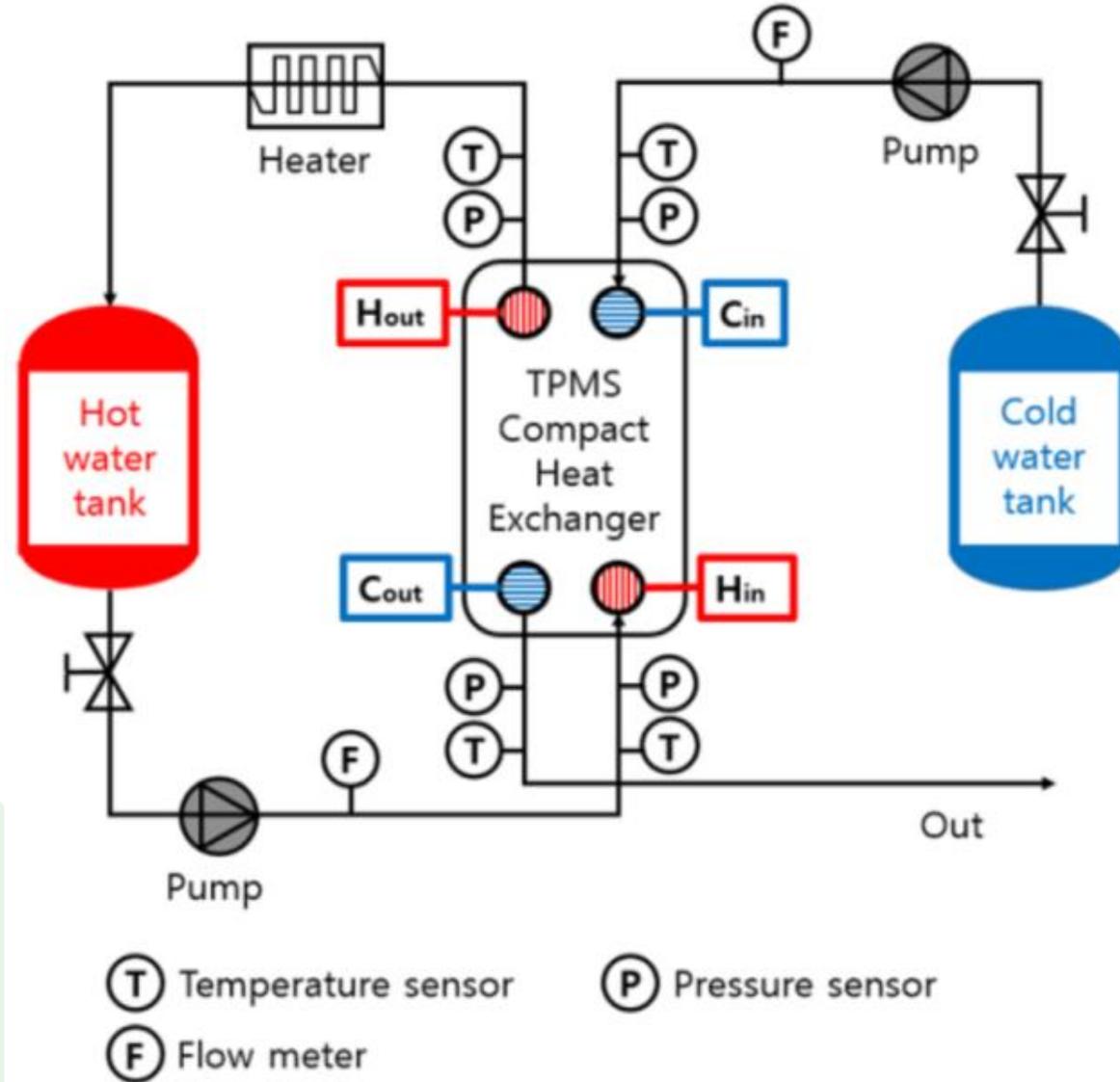
Revisión de la literatura

Metodología

Resultados, análisis y discusión

Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro

Referencias



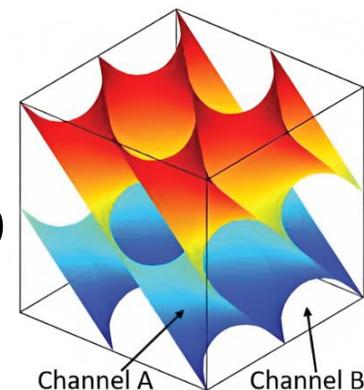
(Kim & Yoo, 2020)

Superficies mínimas triple periódicas

Ecuaciones de TPMS comunes

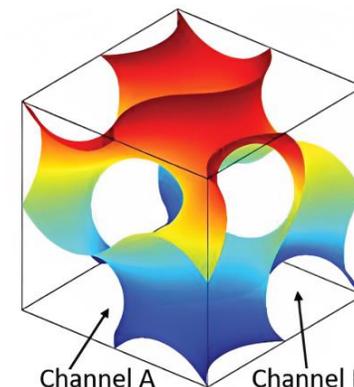
Schoen Gyroid (SG)

$$\Psi(\mathbf{r}) = \sin(N_x x) \cos(N_y y) + \sin(N_y y) \cos(N_z z) + \sin(N_z z) \cos(N_x x) - C = 0$$



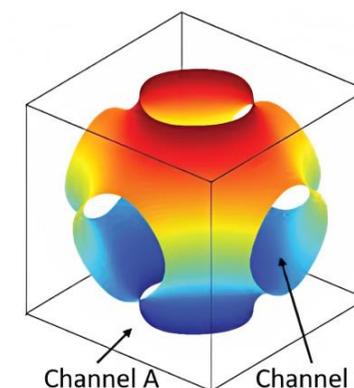
Schwarz Diamond (SD)

$$\Psi(\mathbf{r}) = \sin(N_z z) \cos(N_x x - N_y y) + \cos(N_z z) \sin(N_x x + N_y y) - C = 0$$



Schwarz Primitive (SP)

$$\Psi(\mathbf{r}) = \cos(N_x x) + \cos(N_y y) + \cos(N_z z) - C = 0$$



(Hao Peng et al., 2019)

Antecedentes y
Justificación

Alcance

Objetivos

Revisión de la
literatura

Metodología

Resultados, análisis
y discusión

Conclusiones,
recomendaciones y
trabajo futuro

Referencias

Superficies mínimas triple periódicas

Parámetros de la ecuación y derivados de las TPMS

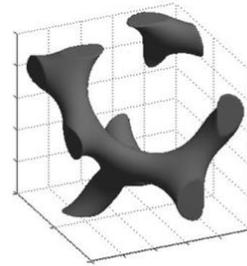
Porosidad (n)

$$n = 1 - \frac{V_S}{V_T}$$

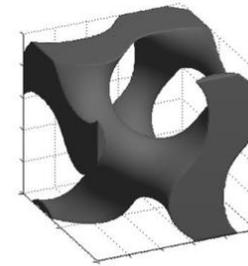
Donde:

V_S : Volumen del sólido.

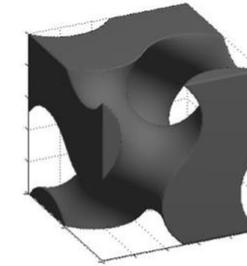
V_T : Volumen total.



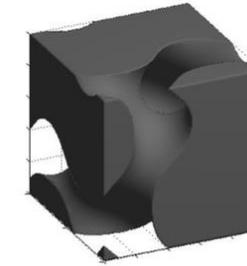
n : 90%
 C : -1.196



70%
-0.617



50%
0.000



30%
0.617



10%
1.196

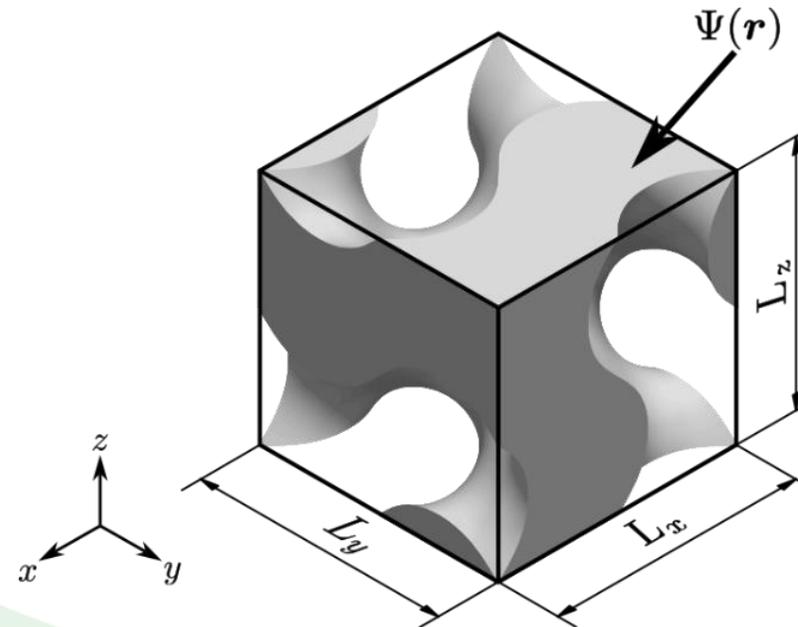
(Walker et al., 2017)

Periodo en x, y, z ($N_{x,y,z}$)

$$N_{x,y,z} = \frac{2\pi}{L_{x,y,z}}$$

Donde:

$L_{x,y,z}$: Longitud de la celda unidad respectiva en x, y, z .



Antecedentes y Justificación

Alcance

Objetivos

Revisión de la literatura

Metodología

Resultados, análisis y discusión

Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro

Referencias

Manufactura aditiva por estereolitografía

Antecedentes y Justificación

Alcance

Objetivos

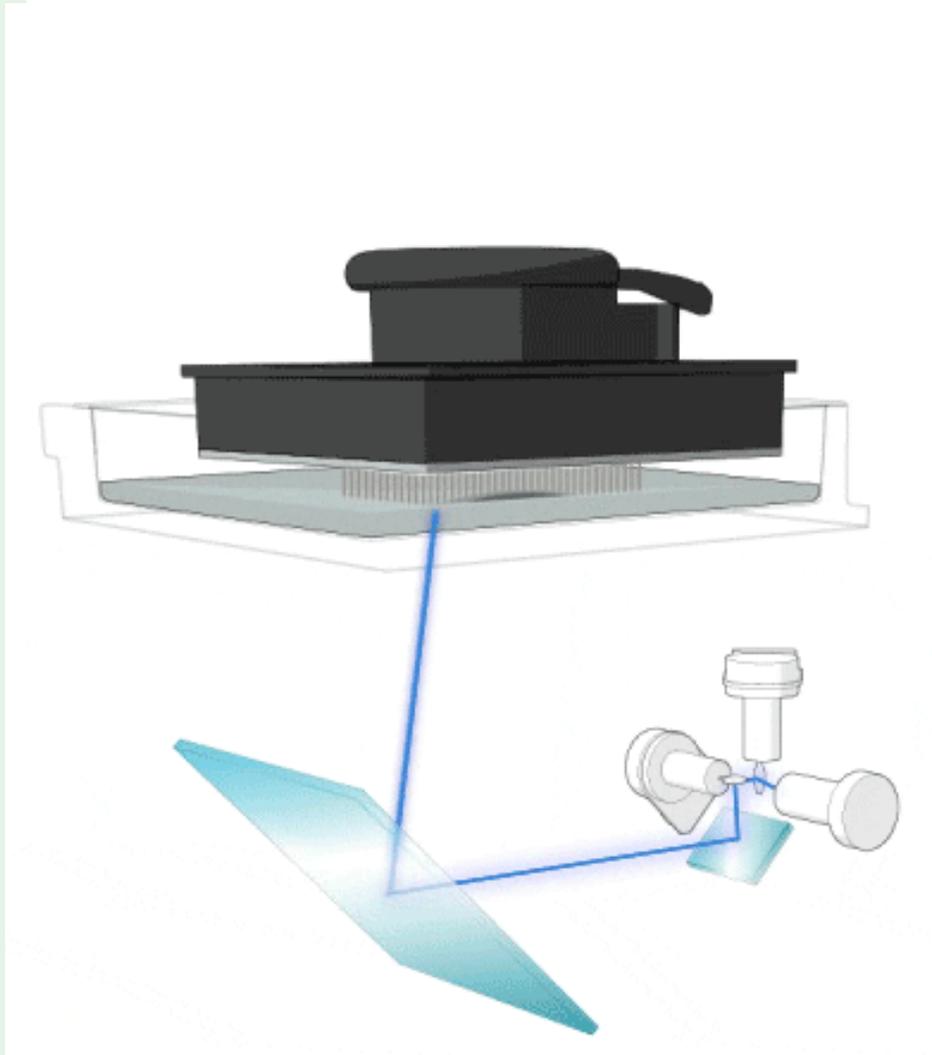
Revisión de la literatura

Metodología

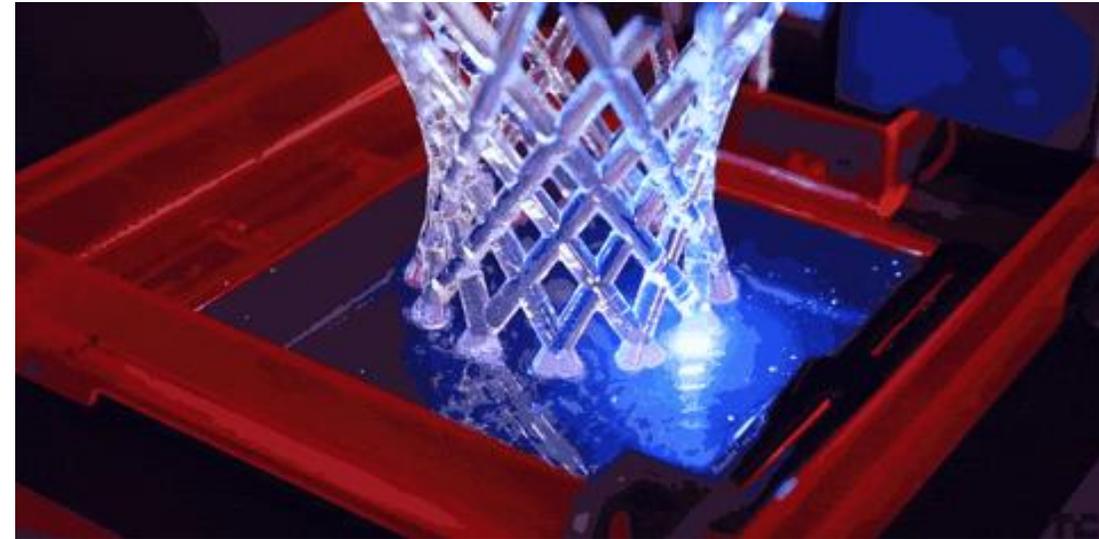
Resultados, análisis y discusión

Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro

Referencias



(Team, 2019)



(go3dprint, s. f.)

Breve descripción de los software usados

Antecedentes y Justificación

Alcance

Objetivos

Revisión de la literatura

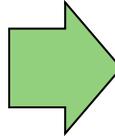
Metodología

Resultados, análisis y discusión

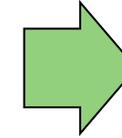
Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro

Referencias

MathMod/Python



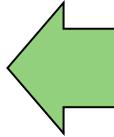
MeshLab/PyMeshLab



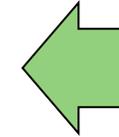
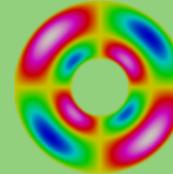
Gmsh



PreForm



ELMER



SALOME

SALOME

Conceptos teóricos: Parte térmica

Ecuación de calor incompresible

$$\rho c_p \left[\frac{\partial T}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) T \right] - \nabla \cdot (\kappa \nabla T) = \bar{\bar{\tau}} : \bar{\bar{\epsilon}} + \rho \zeta$$

Condiciones de contorno

- *De Dirichlet*

$$T = T_b$$

- *De flujo de calor*

$$-\kappa \frac{\partial T}{\partial a} = h(T - T_{ext})$$

Conceptos teóricos: Parte mecánica

Ecuación de deformación elástica de Navier

$$\rho \frac{\partial^2 \vec{d}}{\partial t^2} - \nabla \cdot \tau = \vec{f}_V$$

Condiciones de contorno

- *De Dirichlet*

$$d = d_i^b$$

- *De fuerza*

$$\tau \cdot \vec{n}_0 = \vec{f}_b$$

Antecedentes y
Justificación

Alcance

Objetivos

Revisión de la
literatura

Metodología

Resultados, análisis
y discusión

Conclusiones,
recomendaciones y
trabajo futuro

Referencias

Antecedentes y
Justificación

Alcance

Objetivos

Revisión de la
literatura

Metodología

Resultados, análisis
y discusión

Conclusiones,
recomendaciones y
trabajo futuro

Referencias

Metodología



Metodología implementada

Antecedentes y Justificación

Diseño de las TPMS

- Definir la combinación de superficies mediante operaciones booleanas.
- Encontrar y establecer las relaciones entre L, C y n.
- Definir un proceso de diseño general para TPMS rectangulares.
- Definir un proceso de diseño general para TPMS en coordenadas cilíndricas.

Alcance

Objetivos

Revisión de la literatura

Metodología

Desarrollo del DOE

- Identificar y enunciar el problema.
- Seleccionar la variable de respuesta.
- Seleccionar los factores y niveles.
- Elegir el plan de DOE.

Preproceso y simulación

- Generar la geometría mallada.
- Preparar la malla superficial.
- Generar y preparar la malla volumétrica.
- Analizar las mallas volumétricas y establecer los contornos.
- Establecer las condiciones de contorno y simular los modelos.

Resultados, análisis y discusión

Posproceso y análisis del DOE

- Obtener y visualizar los resultados.
- Analizar el DOE.

Manufactura y validación dimensional

- Imprimir por SLA las TPMS seleccionadas.
- Realizar el proceso posimpresión.
- Validar dimensionalmente los modelos impresos.

Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro

Referencias

Diseño de las TPMS: Intersección de superficies

Antecedentes y Justificación

Alcance

Objetivos

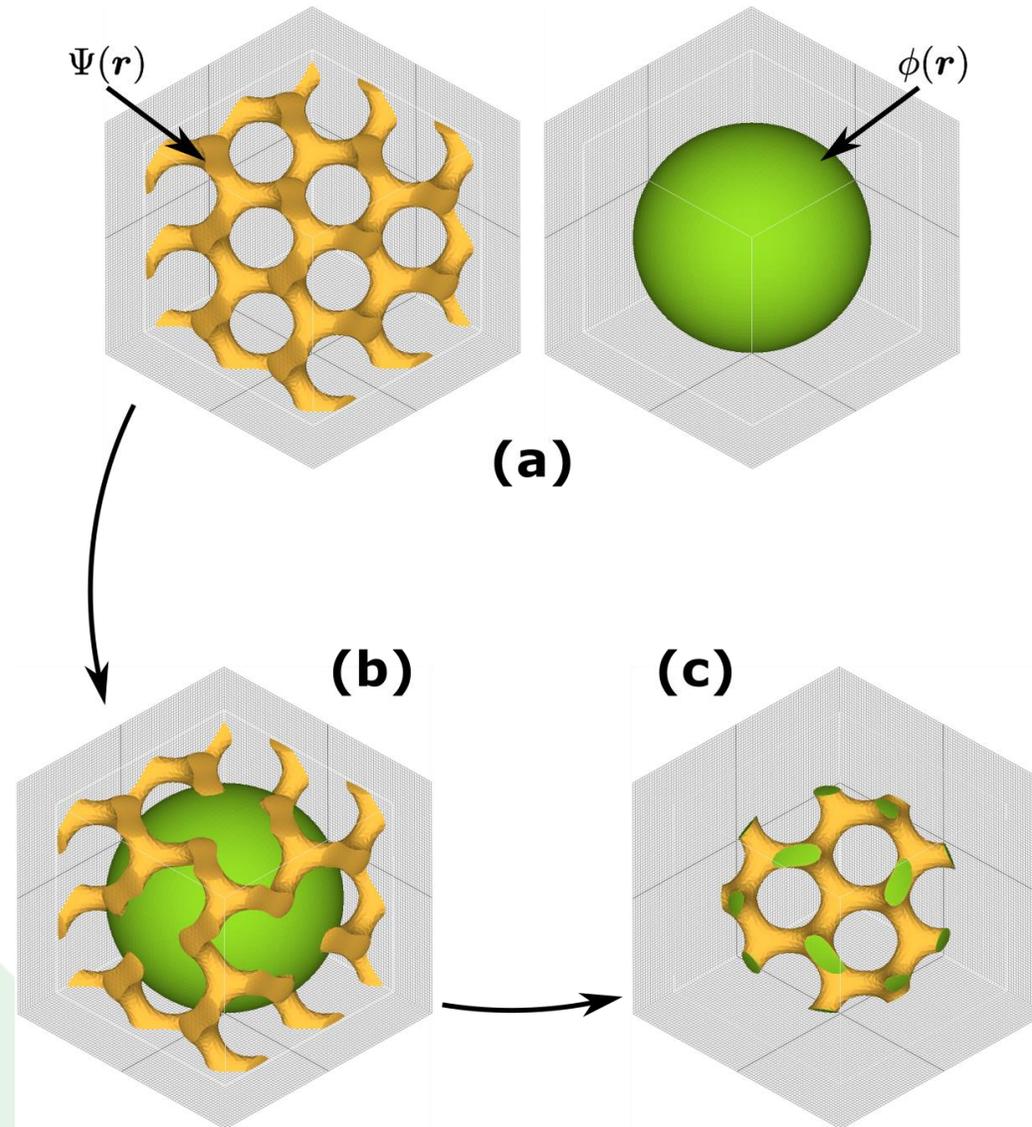
Revisión de la literatura

Metodología

Resultados, análisis y discusión

Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro

Referencias



$$\Psi(\mathbf{r}) \cap \phi(\mathbf{r}) = \max(\Psi(\mathbf{r}), \phi(\mathbf{r}))$$

Diseño de las TPMS: Relación entre C y n

Antecedentes y
Justificación

Alcance

Objetivos

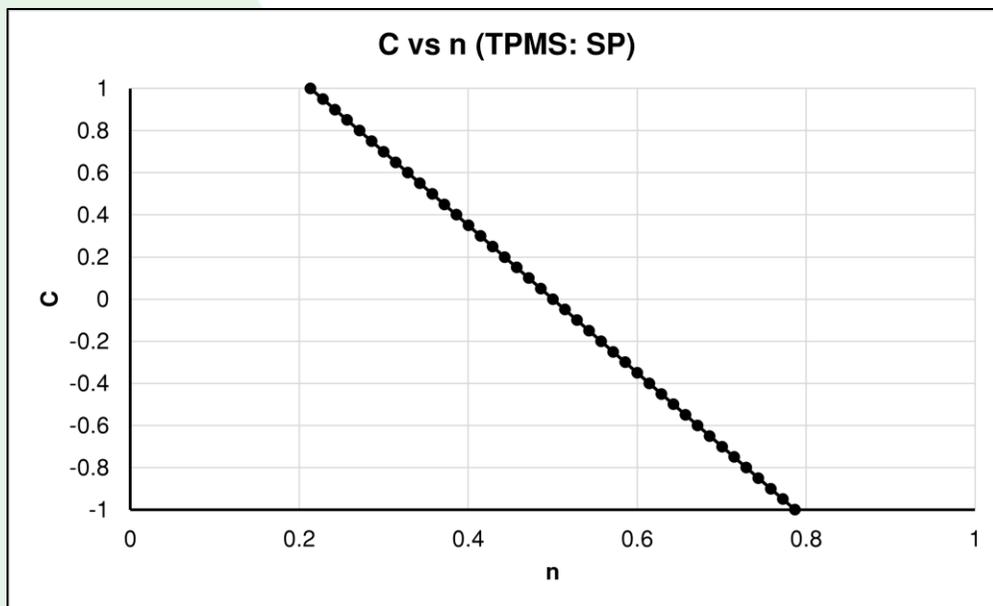
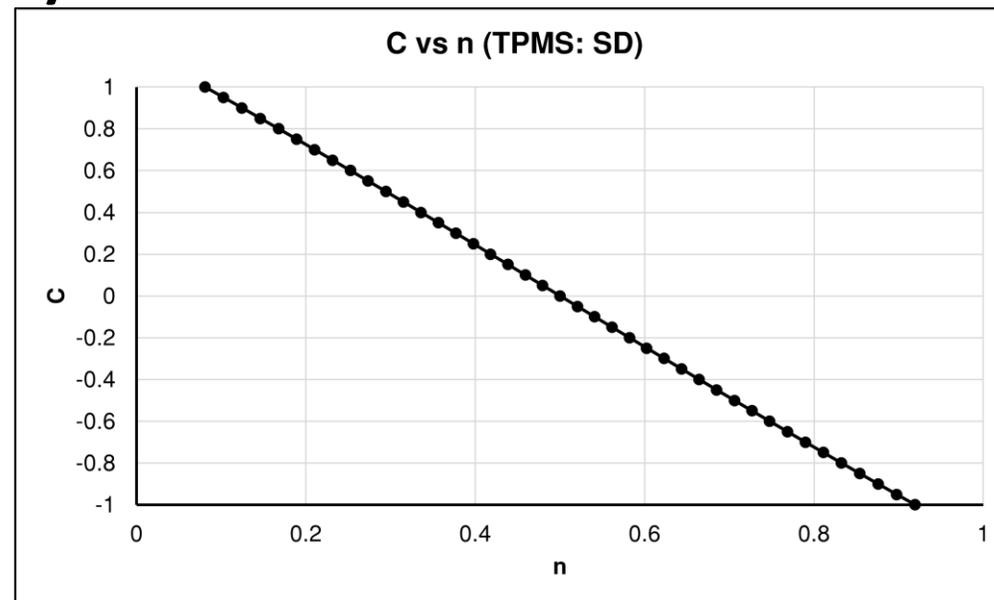
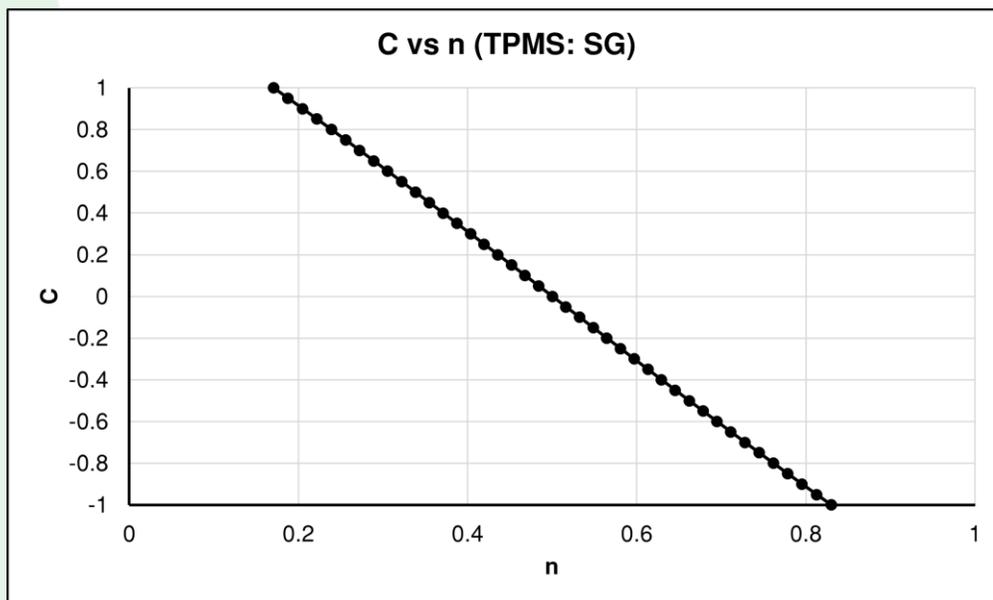
Revisión de la
literatura

Metodología

Resultados, análisis
y discusión

Conclusiones,
recomendaciones y
trabajo futuro

Referencias



TPMS SG:

$$C(n) = 0.6955n^3 - 1.0430n^2 - 2.5877n + 1.4680$$

TPMS SD:

$$C(n) = 0.3381n^3 - 0.5067n^2 - 2.1913n + 1.1803$$

TPMS SP:

$$C(n) = 0.2013n^3 - 0.3031n^2 - 3.3528n + 1.7272$$

Diseño de las TPMS: Dominio rectangular y cilíndrico

Antecedentes y Justificación

Alcance

Objetivos

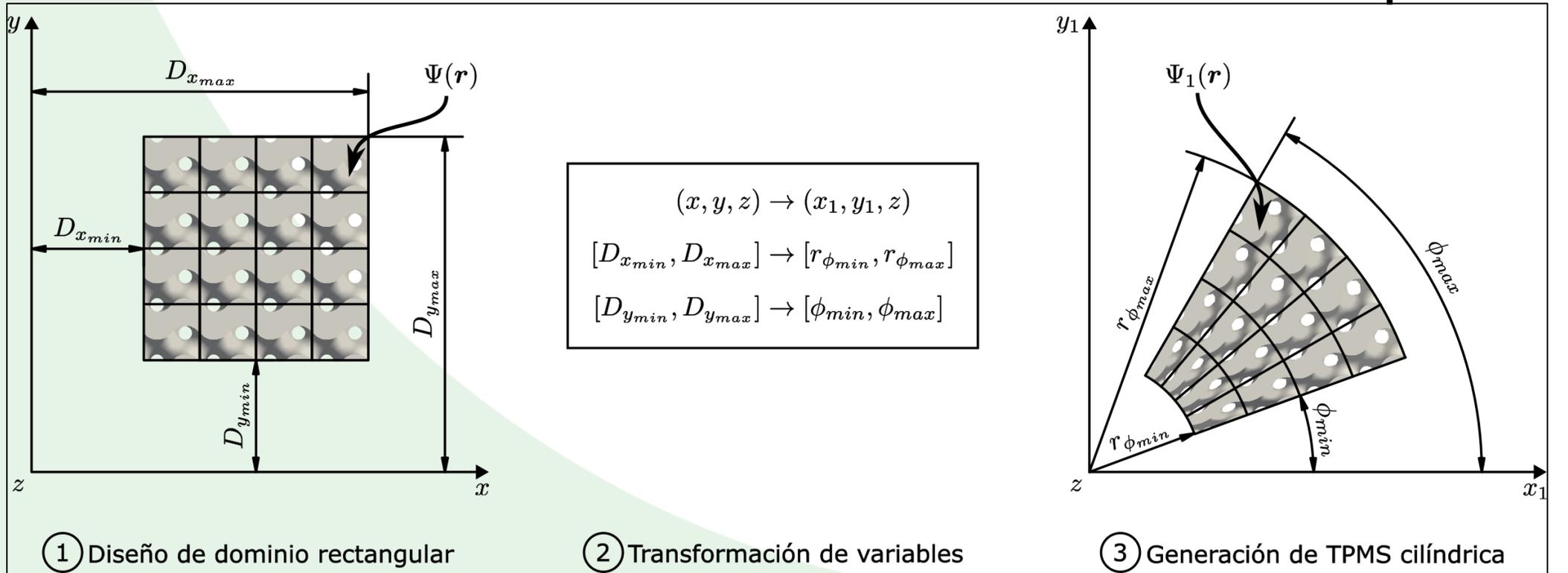
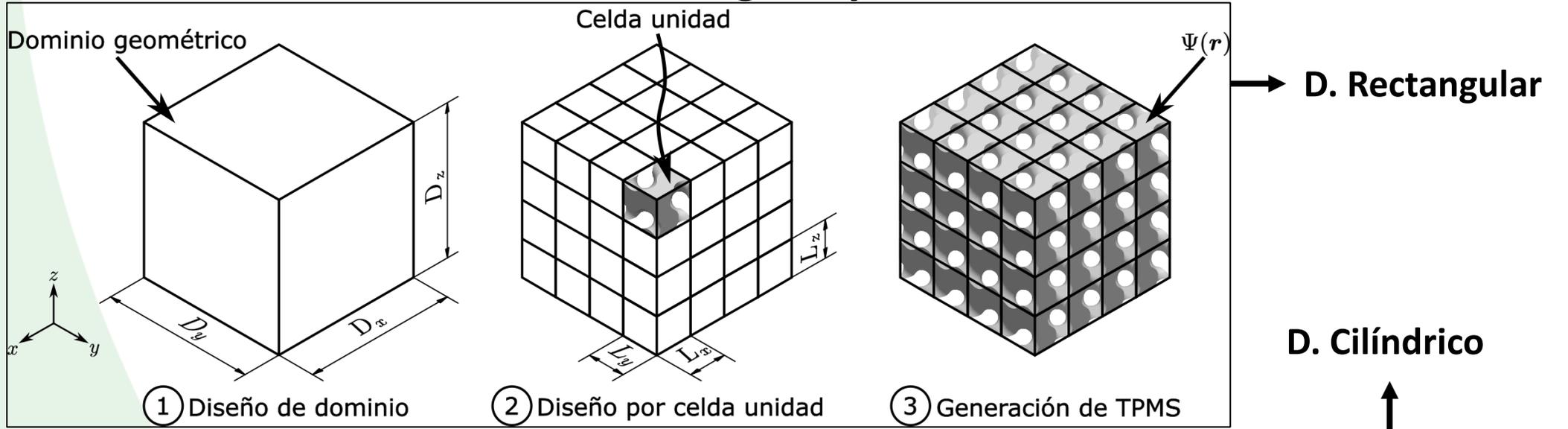
Revisión de la literatura

Metodología

Resultados, análisis y discusión

Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro

Referencias



Diseño de las TPMS: Dominio rectangular

Antecedentes y Justificación

Alcance

Objetivos

Revisión de la literatura

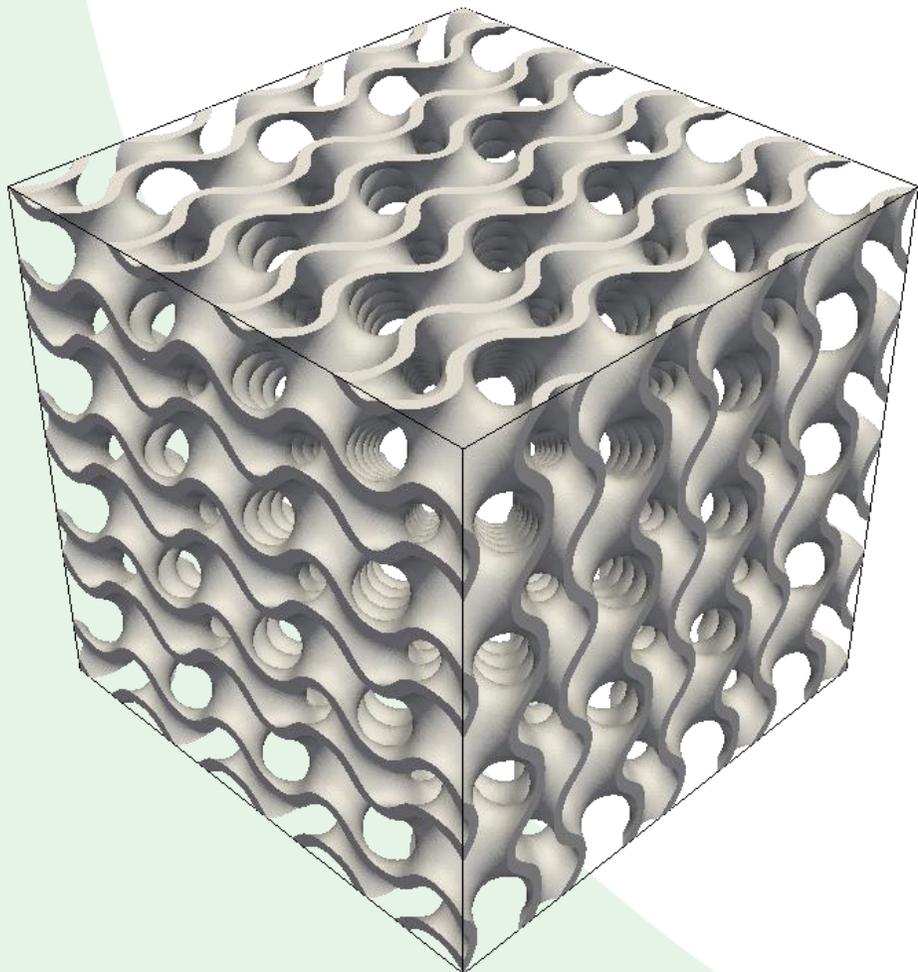
Metodología

Resultados, análisis y discusión

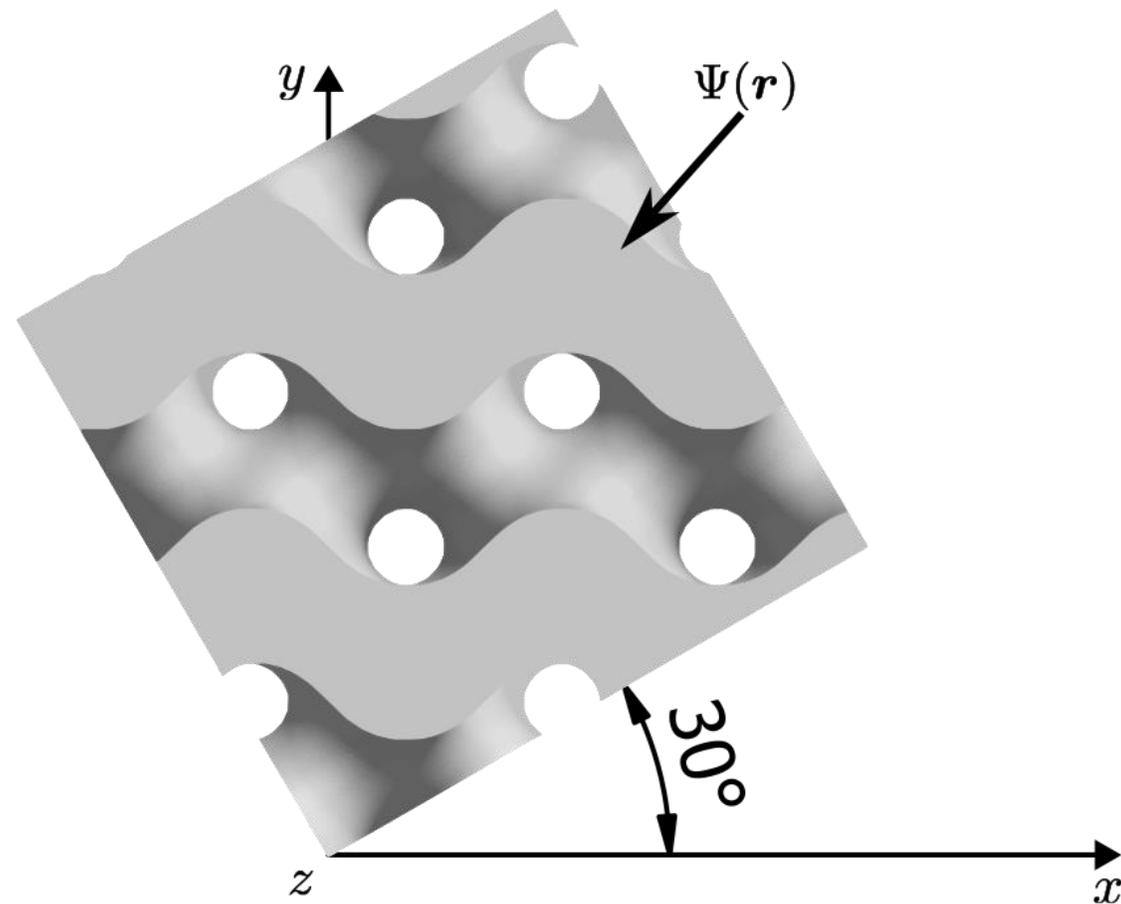
Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro

Referencias

Grosor de pared



Rotaciones en base a un eje fijo



Diseño de las TPMS: Algoritmo general de generación de TPMS

Antecedentes y Justificación

Alcance

Objetivos

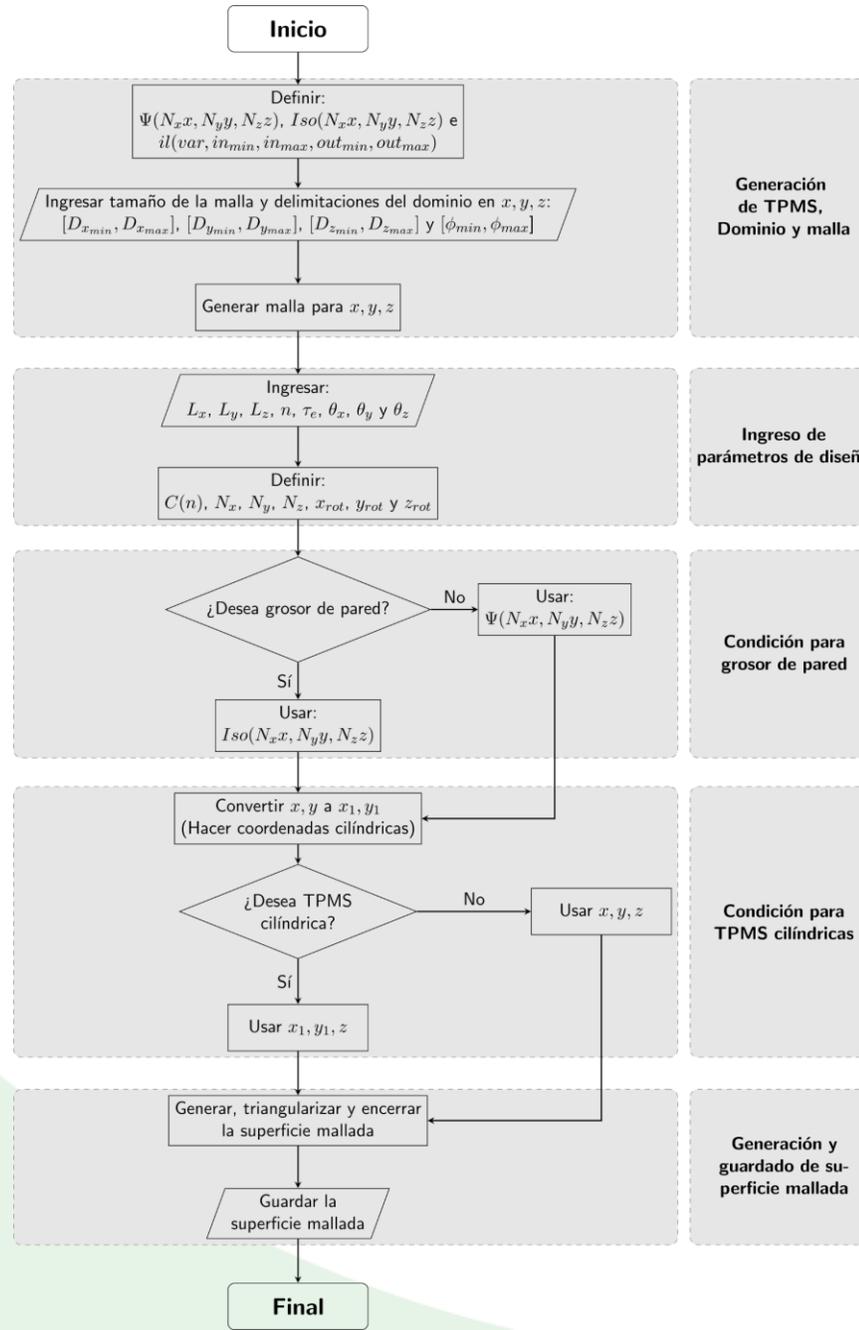
Revisión de la literatura

Metodología

Resultados, análisis y discusión

Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro

Referencias



Generación de TPMS, Dominio y malla

Ingreso de parámetros de diseño

Condición para grosor de pared

Condición para TPMS cilíndricas

Generación y guardado de superficie mallada

Desarrollo del DOE

Antecedentes y Justificación

Alcance

Objetivos

Revisión de la literatura

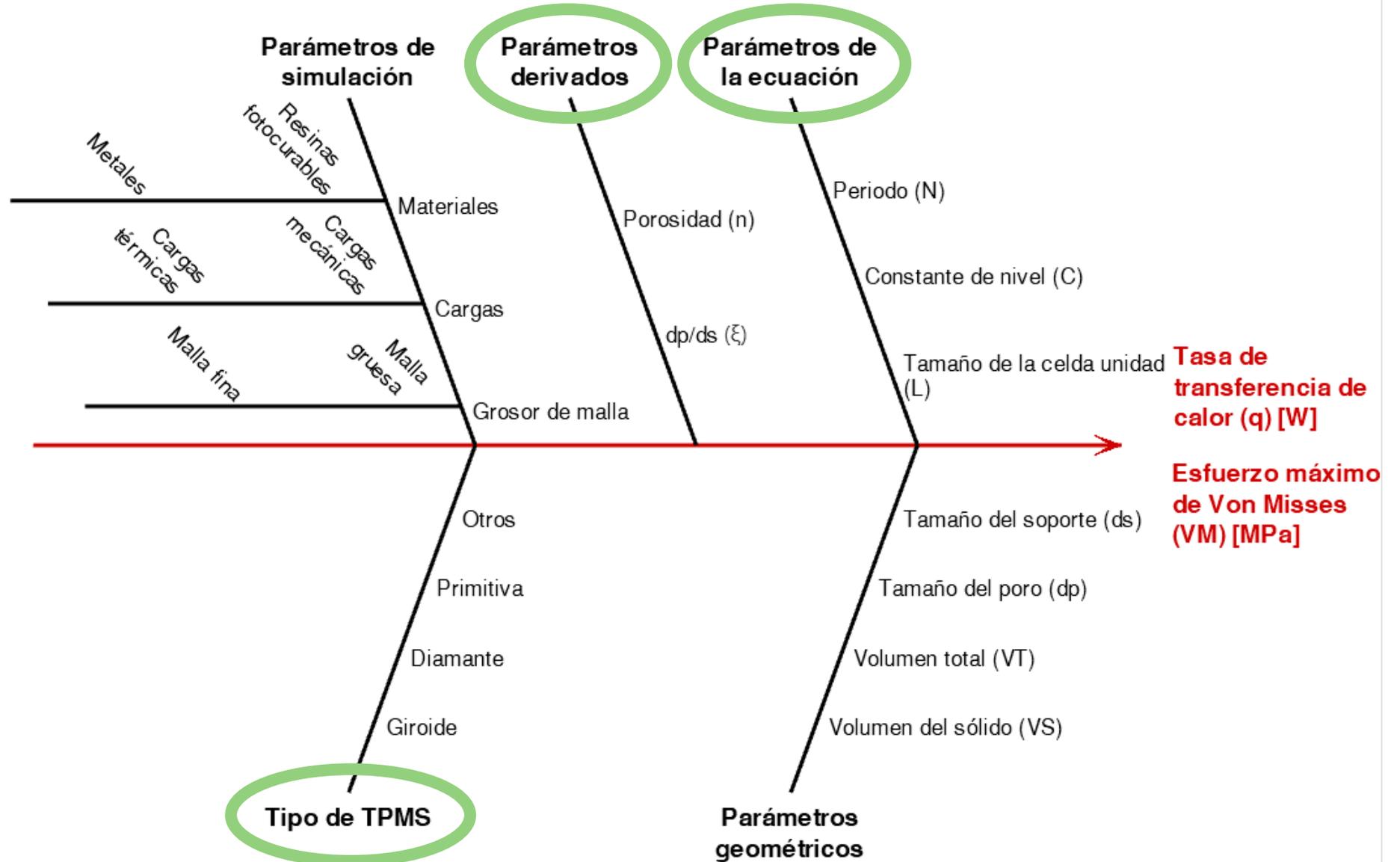
Metodología

Resultados, análisis y discusión

Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro

Referencias

Parámetros que intervienen en el diseño y simulación de una TPMS



Desarrollo del DOE

Factores y niveles

| Factor | Nombre del Factor | Unidad | Valores del nivel | | |
|--------|-------------------|--------|-------------------|---------|---------|
| | | | Nivel 1 | Nivel 2 | Nivel 3 |
| A | <i>Tipo</i> | - | SG | SD | SP |
| B | <i>n</i> | - | 0.50 | 0.60 | 0.70 |
| C | <i>L</i> | mm | 5 | 10 | 20 |

Material: Aluminio genérico $\rightarrow \rho = 2700 \left[\frac{kg}{m^3} \right], c_p = 897 \left[\frac{J}{kg K} \right], \beta = 23.1 \cdot 10^{-6} \left[\frac{1}{K} \right],$
 $\kappa = 237 \left[\frac{W}{m K} \right], E = 70 \cdot 10^9 [Pa]$ y $\nu = 0.35$

Resumen del DOE

| Tipo de DOE | Factores | Niveles | Réplicas | Corridas totales |
|--------------------|----------|---------|----------|------------------|
| Factorial completo | 3 | 3 | 1 | 27 |

Antecedentes y Justificación

Alcance

Objetivos

Revisión de la literatura

Metodología

Resultados, análisis y discusión

Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro

Referencias

Preproceso y simulación

Antecedentes y Justificación

Alcance

Objetivos

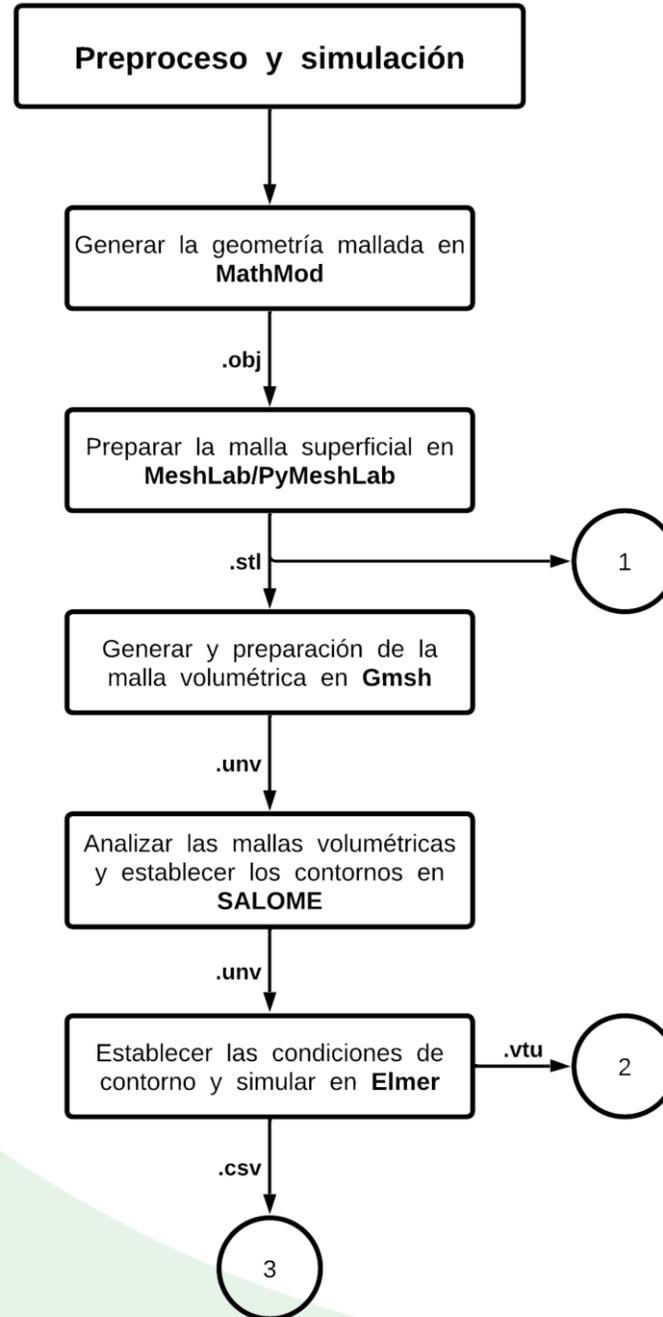
Revisión de la literatura

Metodología

Resultados, análisis y discusión

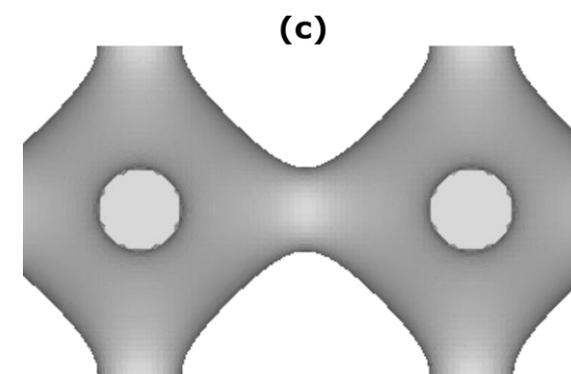
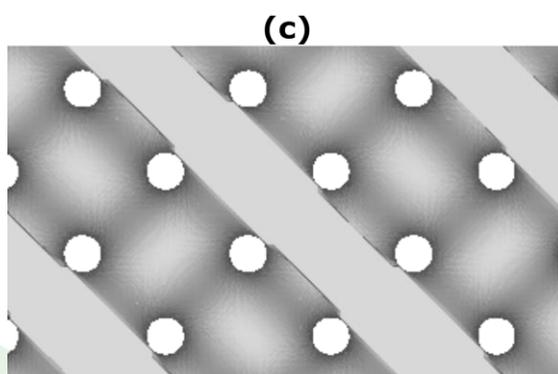
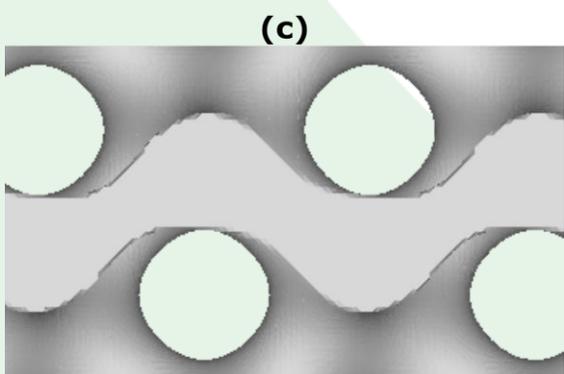
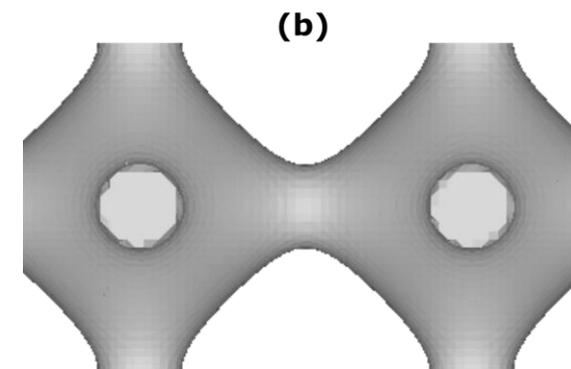
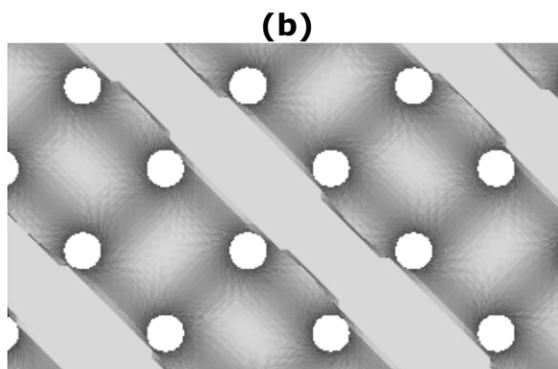
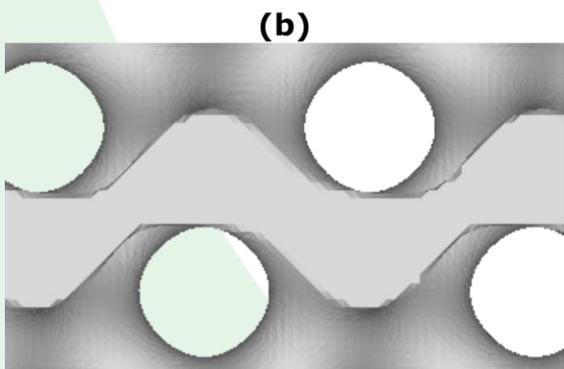
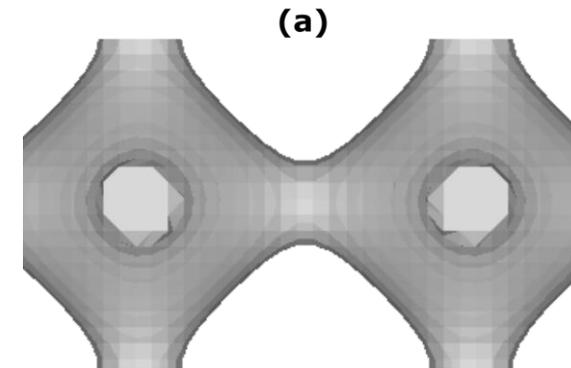
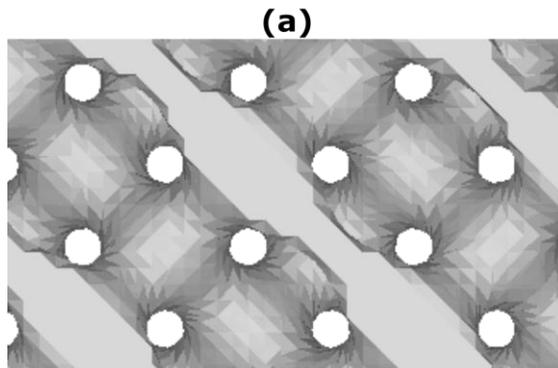
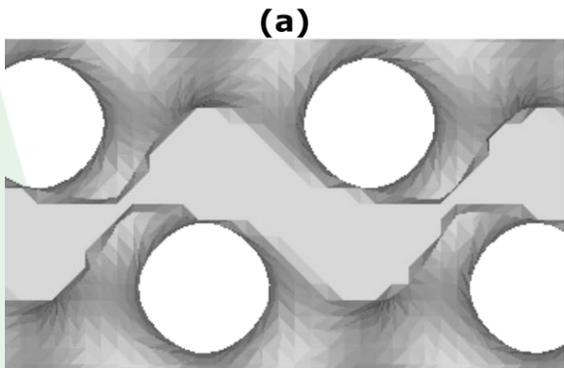
Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro

Referencias



Preproceso y simulación: Generación de geometría mallada

Selección del grid



Grid: (a) 165, (b) 315, (c) 465

Antecedentes y Justificación

Alcance

Objetivos

Revisión de la literatura

Metodología

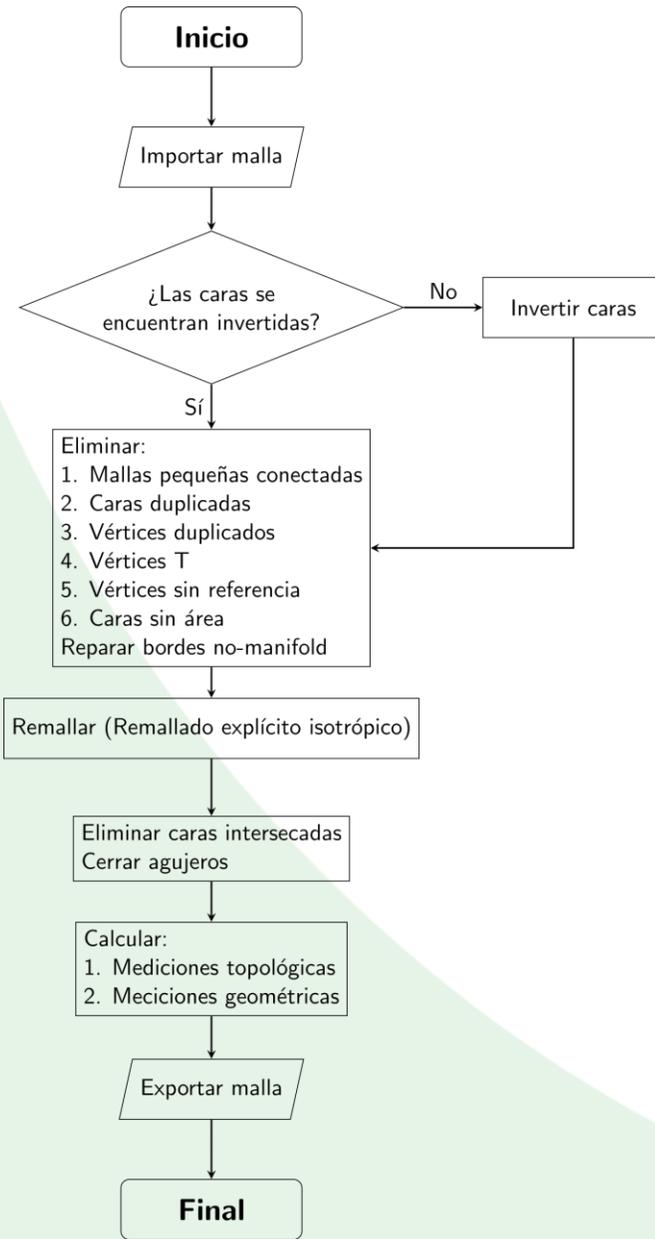
Resultados, análisis y discusión

Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro

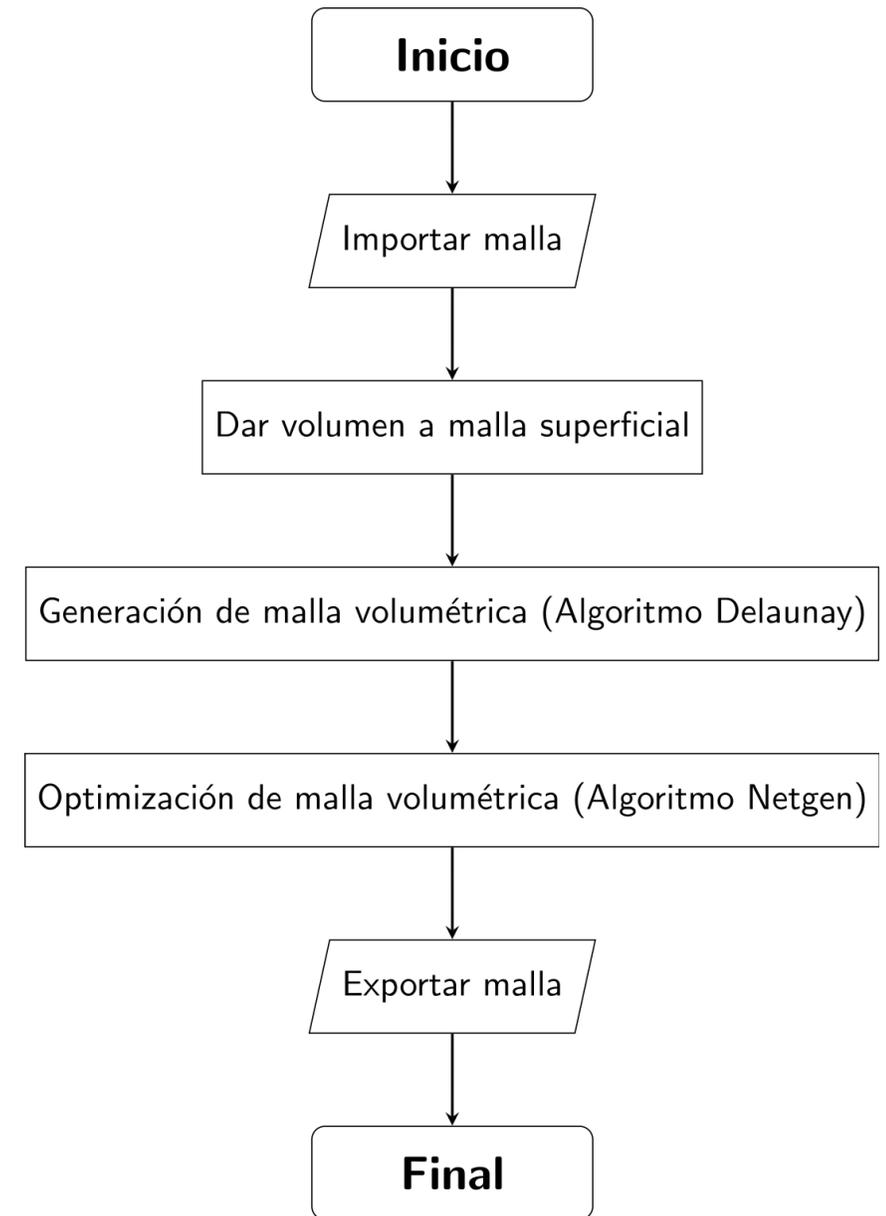
Referencias

Preproceso y simulación: Preparación y generación de mallas

Preparación de mallas superficiales



Generación de mallas volumétricas



Antecedentes y Justificación

Alcance

Objetivos

Revisión de la literatura

Metodología

Resultados, análisis y discusión

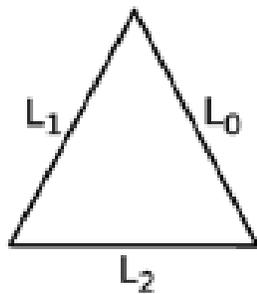
Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro

Referencias

Preproceso y simulación: Análisis de mallas y generación de contornos

Análisis de mallas

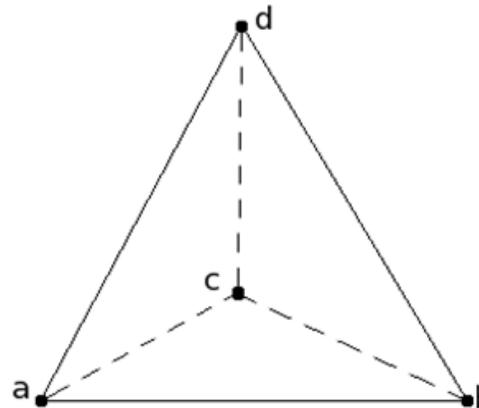
Relación de aspecto 2D



$$Q_{2D} = \frac{L_{max} \cdot (L_0 + L_1 + L_2)}{2\sqrt{3}A}$$

(Aspect Ratio, s/f)

Relación de aspecto 3D



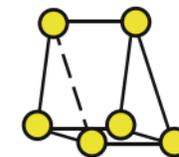
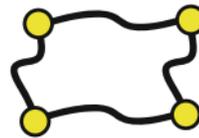
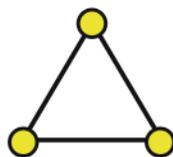
$$Q_{3D} = \frac{h_{max}}{2\sqrt{6}r}$$

(Aspect Ratio 3D, s/f)

Metodología

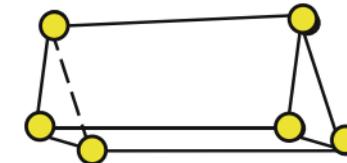
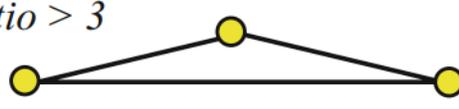
Aspect Ratio ~ 1

Good



Aspect Ratio > 3

Bad



(Okereke & Keates, 2018)

Antecedentes y Justificación

Alcance

Objetivos

Revisión de la literatura

Resultados, análisis y discusión

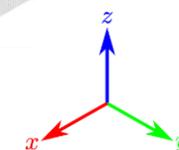
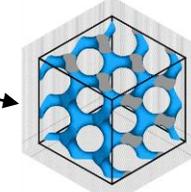
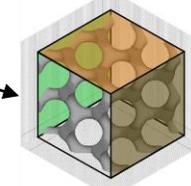
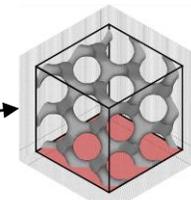
Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro

Referencias

Preproceso y simulación: Análisis de mallas y generación de contornos

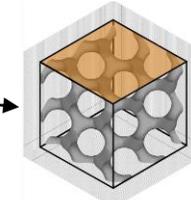
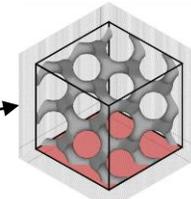
Definición de condiciones de contorno: Parte térmica

| Condición | Ecuación | Valores de las constantes | Aplicado sobre |
|------------|-------------|--|----------------|
| Entrada | Ecuación 10 | $T_b = 353.15 [K]$ | Γ_{1T} |
| Aislado | Ecuación 11 | $-\kappa \frac{\partial T}{\partial a} = 0 \left[\frac{W}{m^2} \right]$ | Γ_{2T} |
| Convección | Ecuación 11 | $\kappa = 237 \left[\frac{W}{mK} \right]$ $h = 50 \left[\frac{W}{m^2K} \right]$ $T_{ext} = 287.96 [K]$ | Γ_{3T} |



Definición de condiciones de contorno: Parte mecánica

| Condición | Ecuación | Valores de las constantes | Aplicado sobre |
|-----------|-------------|--|----------------|
| Fija | Ecuación 18 | $d_{x,y,z}^b = 0 [m]$ | Γ_{1M} |
| Carga | Ecuación 19 | $\tau \cdot \vec{n}_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -10 \end{pmatrix} [MPa]$ | Γ_{2M} |



Antecedentes y Justificación

Alcance

Objetivos

Revisión de la literatura

Metodología

Resultados, análisis y discusión

Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro

Referencias

Posproceso y análisis del DOE

Antecedentes y Justificación

Alcance

Objetivos

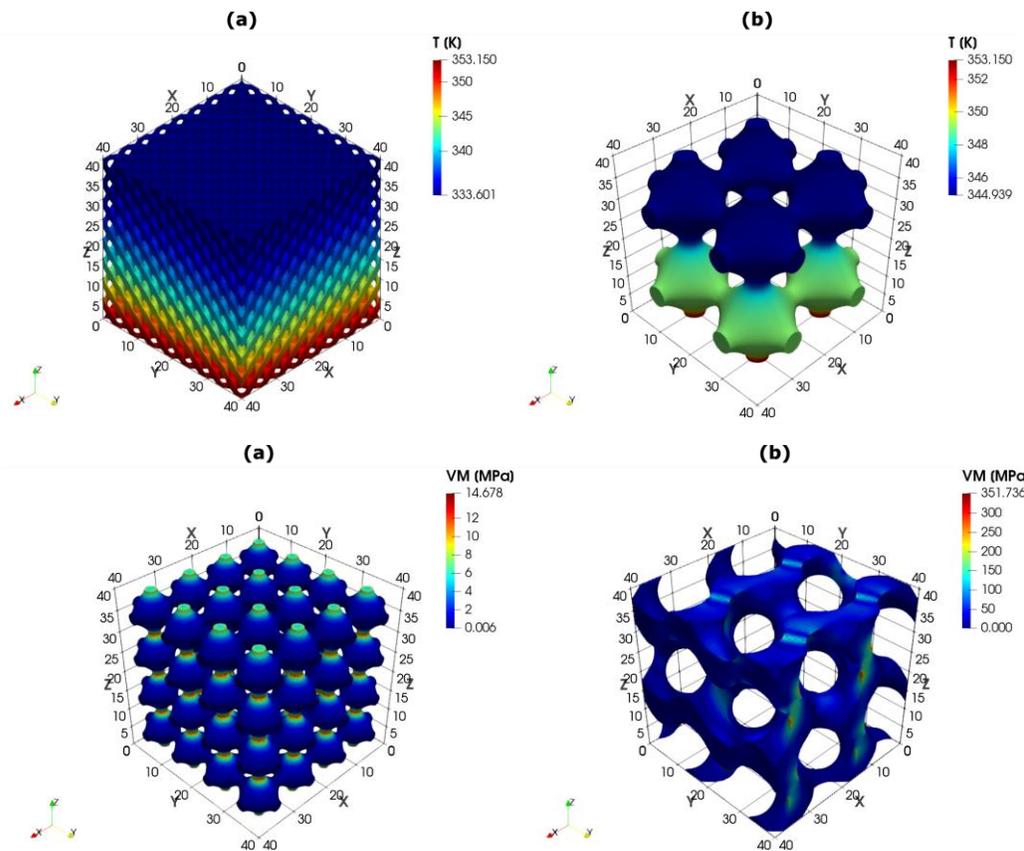
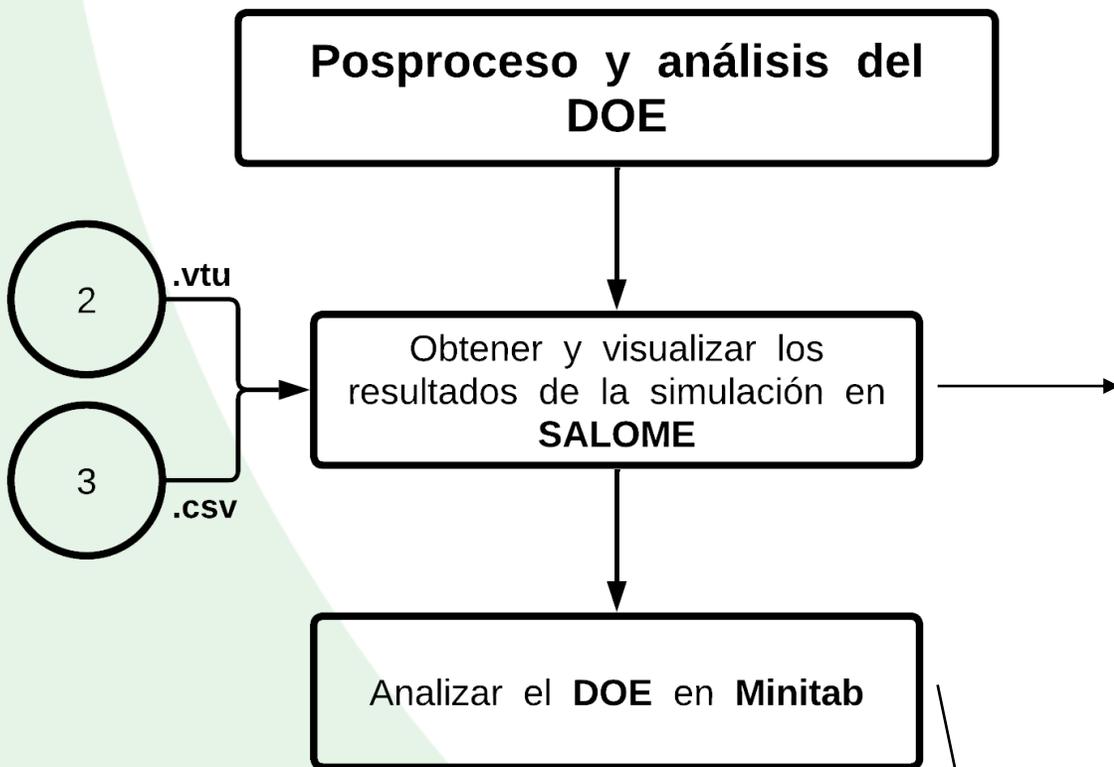
Revisión de la literatura

Metodología

Resultados, análisis y discusión

Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro

Referencias



$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \epsilon$$

Manufactura y validación dimensional

Antecedentes y Justificación

Alcance

Objetivos

Revisión de la literatura

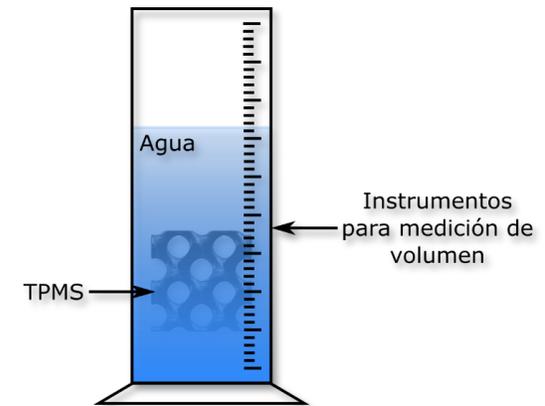
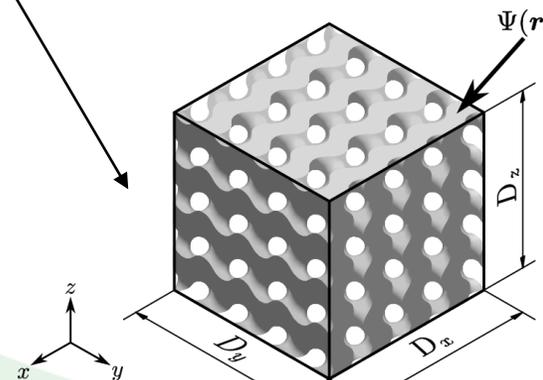
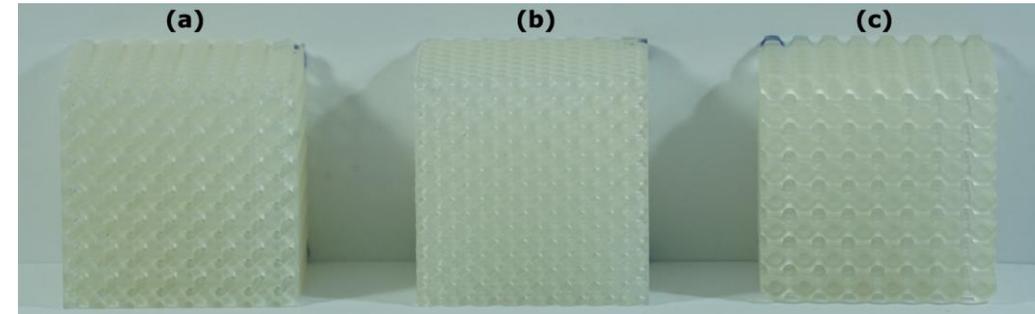
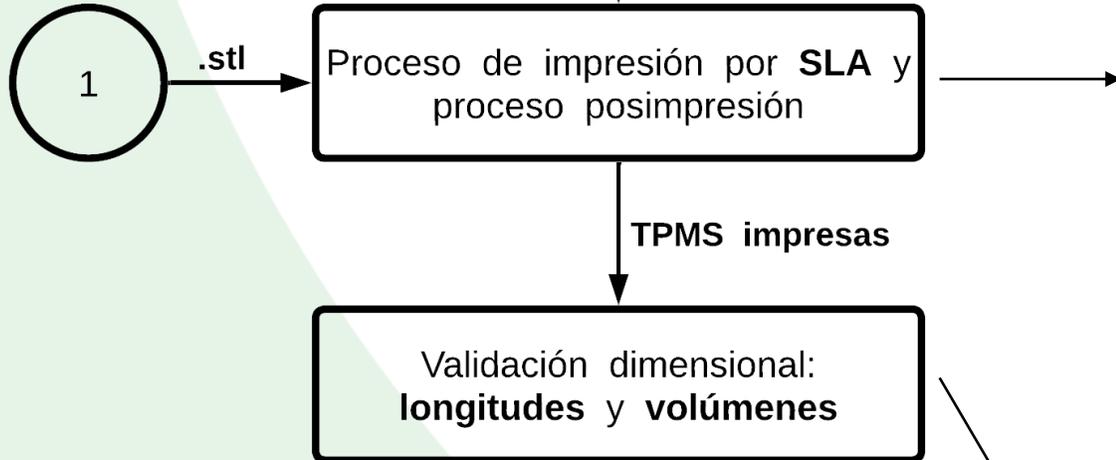
Metodología

Resultados, análisis y discusión

Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro

Referencias

Manufactura y validación dimensional



Antecedentes y
Justificación

Alcance

Objetivos

Revisión de la
literatura

Metodología

**Resultados, análisis
y discusión**

Conclusiones,
recomendaciones y
trabajo futuro

Referencias

Resultados, análisis y discusión

Modelos matemáticos y computacionales

Antecedentes y Justificación

Alcance

Objetivos

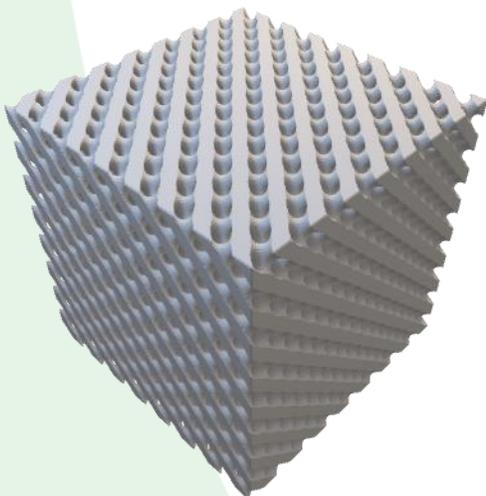
Revisión de la literatura

Metodología

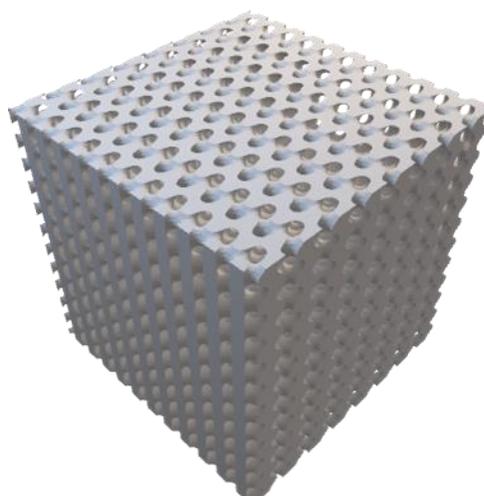
Resultados, análisis y discusión

Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro

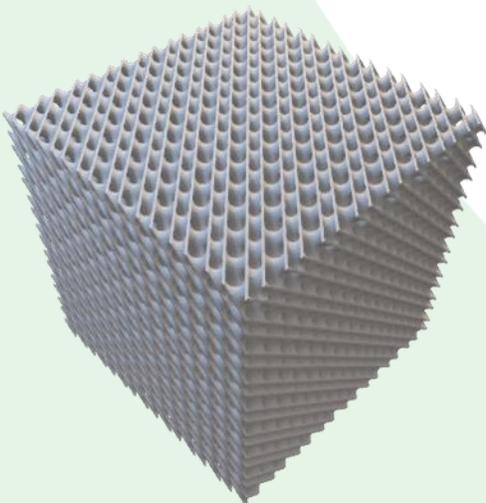
Referencias



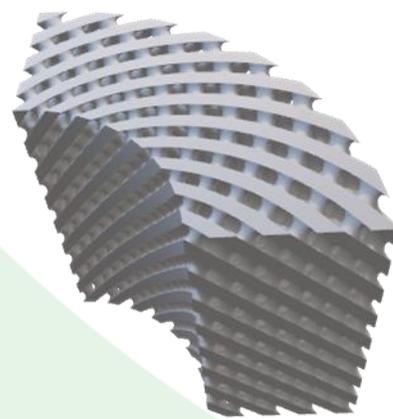
Rectangular



Rotada



Con grosor de pared



Cilíndrica

Información de mallas de dominio cúbico para el DOE

Número de elementos 2D

| N. Corrida | MathMod | | PyMeshLab | |
|------------|----------|---------|-----------|---------|
| | Vértices | Caras | Vértices | Caras |
| 14(Min) | 715968 | 1431952 | 87281 | 174578 |
| 6(Max) | 4977144 | 9970576 | 649675 | 1315638 |

Número de elementos 3D

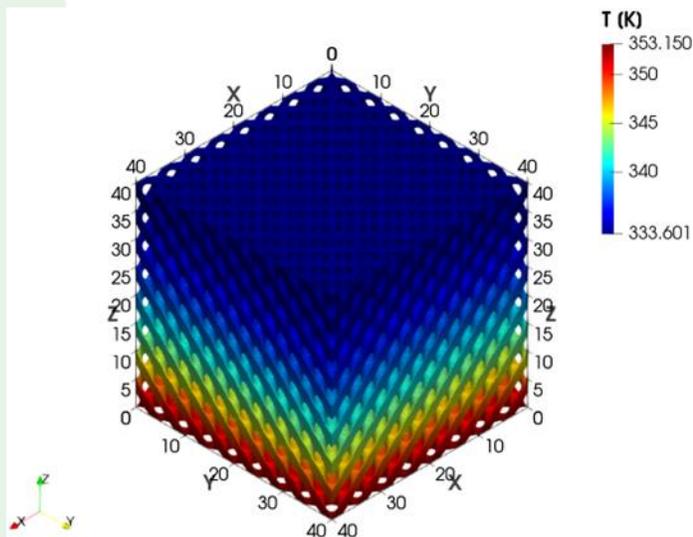
| N. Corrida | Vértices | Caras | Vol. | Total |
|------------|----------|---------|---------|---------|
| 14 (Min) | 303053 | 174578 | 1536009 | 1710587 |
| 6 (Max) | 933995 | 1315638 | 3552785 | 4868423 |

Calidad de mallas

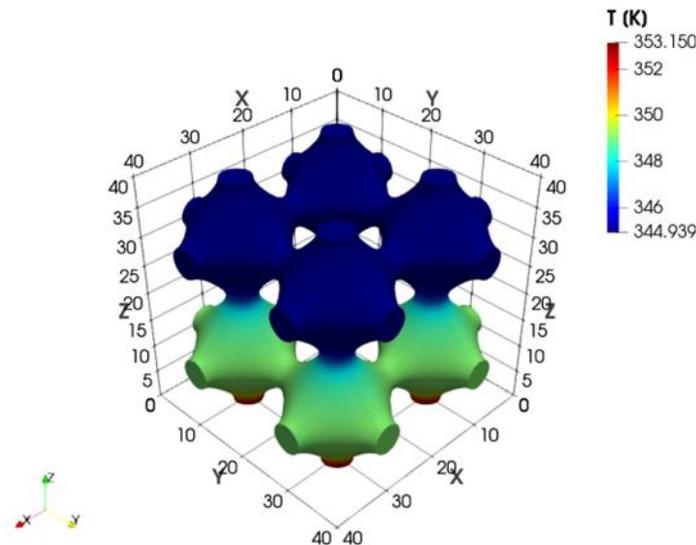
| Rango Aspect Ratio | % Elementos 2D | % Elementos 3D |
|--------------------|----------------|----------------|
| [1;3] | >99.8 | >99.8 |

Análisis y discusión de la parte térmica: Resultados

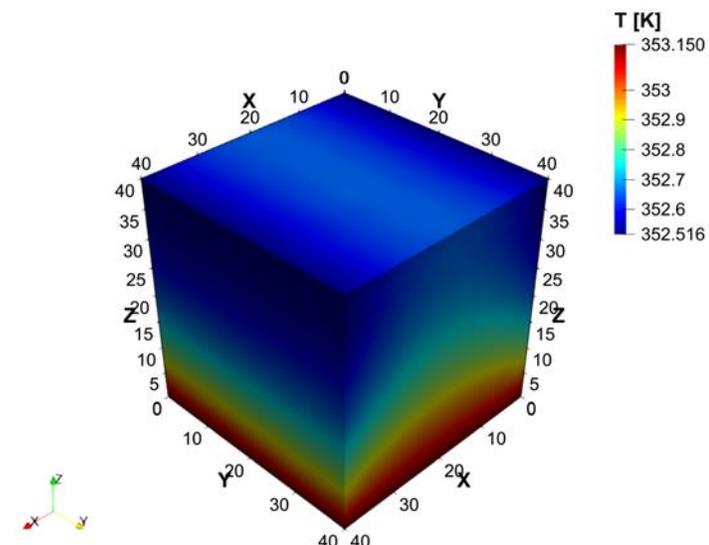
Resultados



Corrida 6: $q = -109.3654 [W]$



Corrida 14: $q = -19.1603 [W]$



Cubo: $q = -7.9736 [W]$

Tiempos de simulación

| N. Corrida | Tiempo [min] |
|------------|--------------|
| 14 (Min) | 0.9 |
| 6 (Max) | 2.46 |

Antecedentes y Justificación

Alcance

Objetivos

Revisión de la literatura

Metodología

Resultados, análisis y discusión

Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro

Referencias

Análisis y discusión de la parte térmica: Análisis del DOE (Residuos)

Antecedentes y Justificación

Alcance

Objetivos

Revisión de la literatura

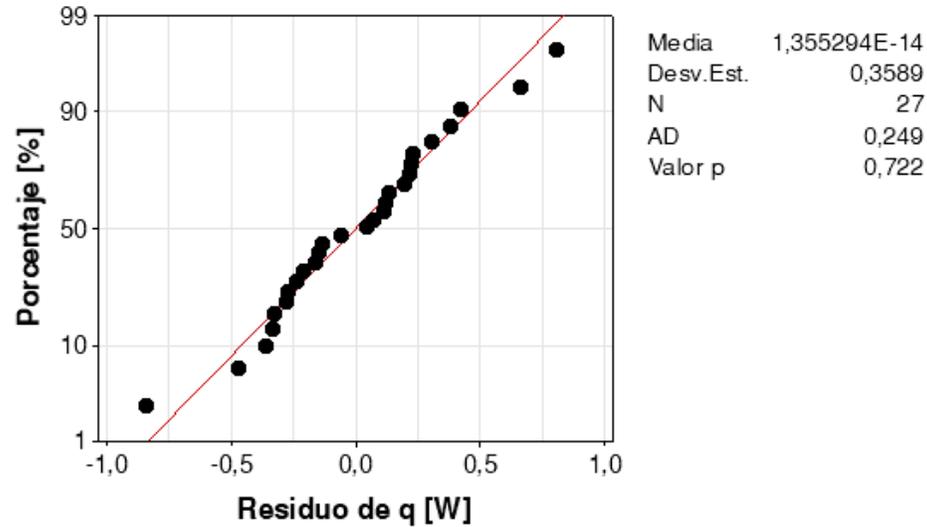
Metodología

Resultados, análisis y discusión

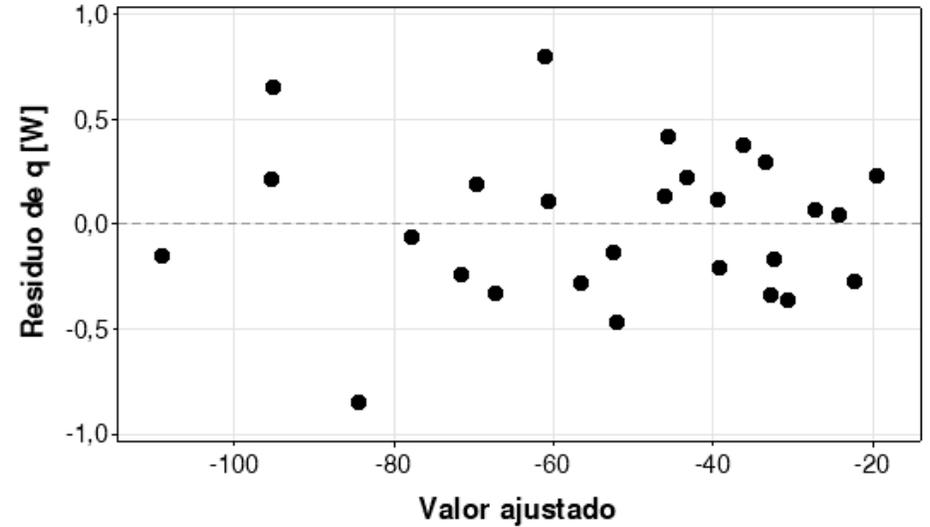
Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro

Referencias

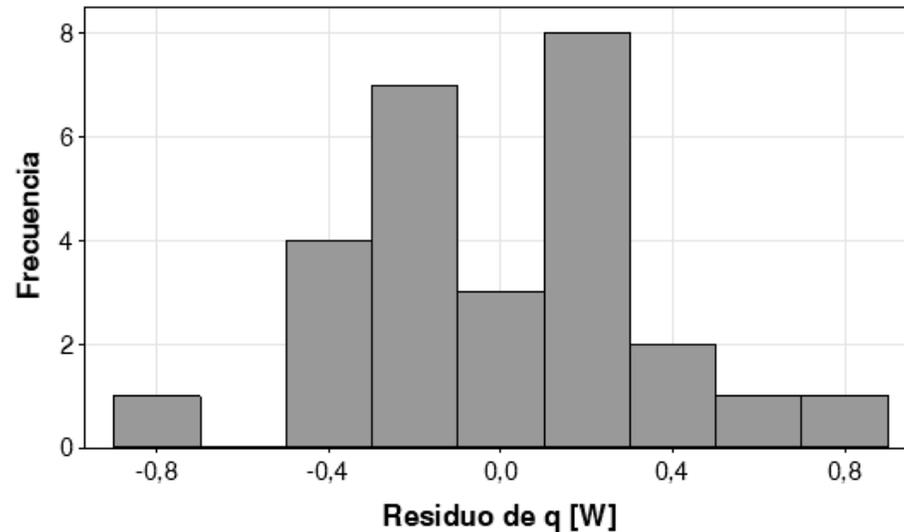
(a) Gráfica de probabilidad normal
(la respuesta es q)



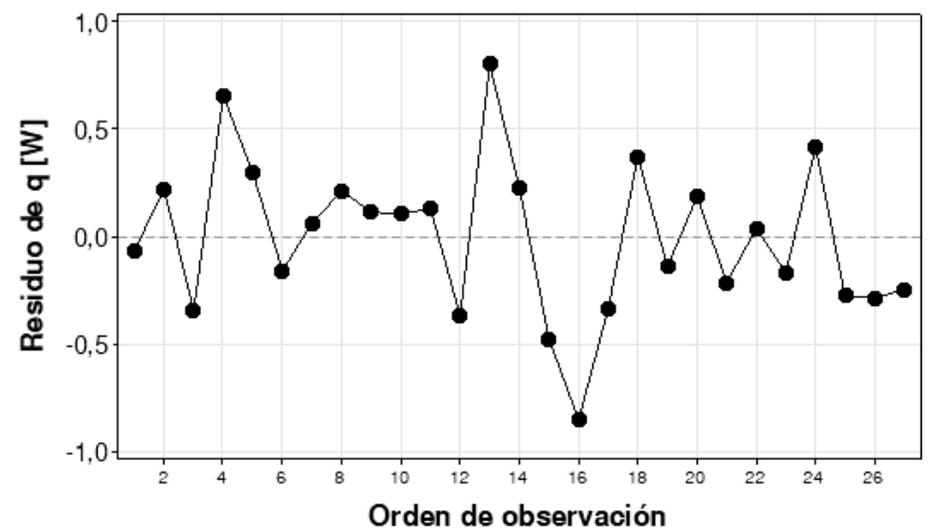
(b) vs. ajustes
(la respuesta es q)



(c) Histograma
(la respuesta es q)



(d) vs. orden
(la respuesta es q)



Análisis y discusión de la parte térmica: Análisis del DOE (Ajuste del modelo)

Antecedentes y Justificación

Alcance

Objetivos

Revisión de la literatura

Metodología

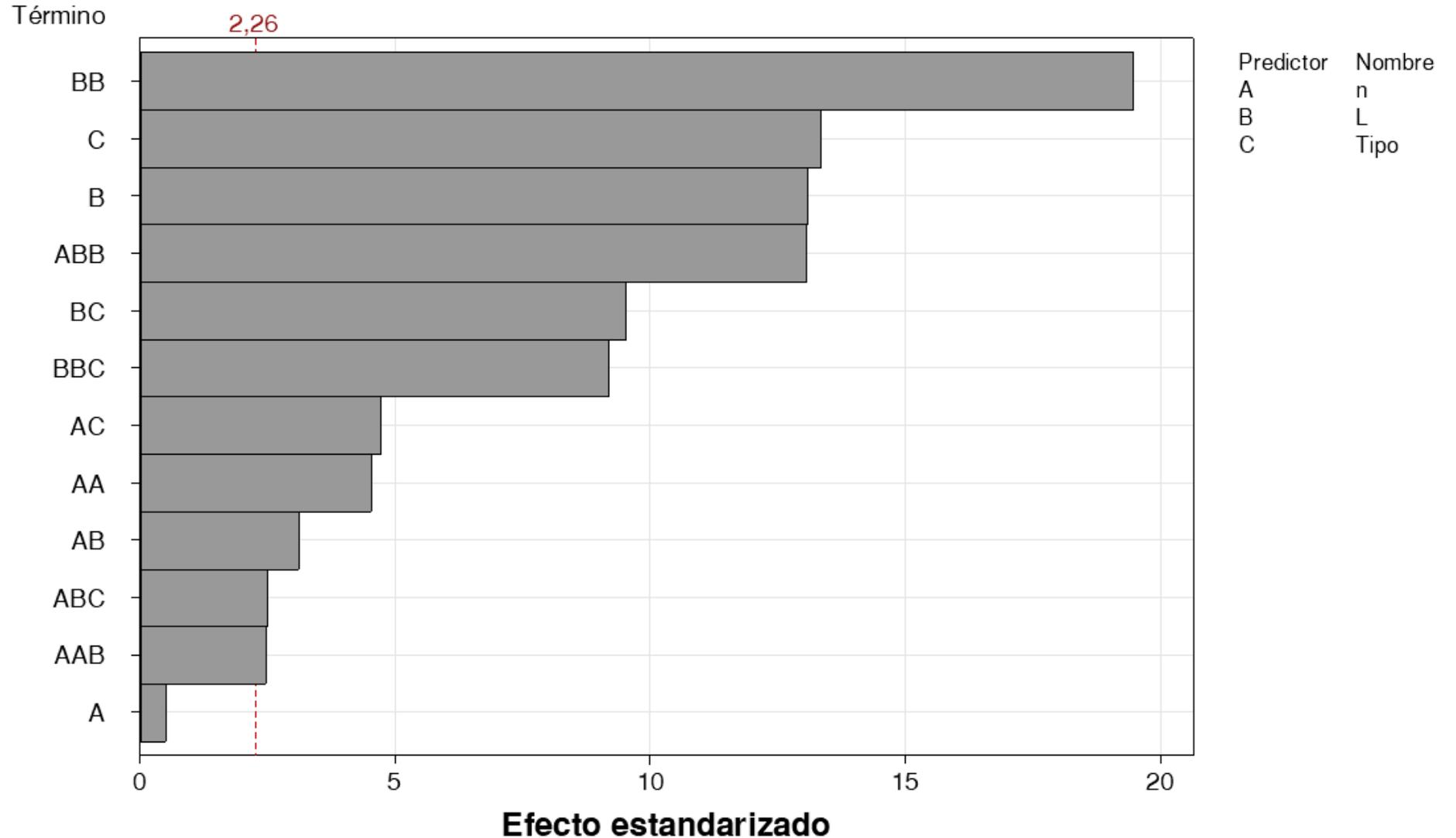
Resultados, análisis y discusión

Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro

Referencias

Diagrama de Pareto de efectos estandarizados

(la respuesta es q; $\alpha = 0,05$)



Análisis y discusión de la parte térmica: Análisis del DOE

Metamodelos

Schoen Gyroid (SG)

$$q(n, L) = -188.4 - 46.1n + 23.00L + 238.9n^2 - 0.7644L^2 - 14.91nL - 9.80n^2L + 0.8110nL^2$$

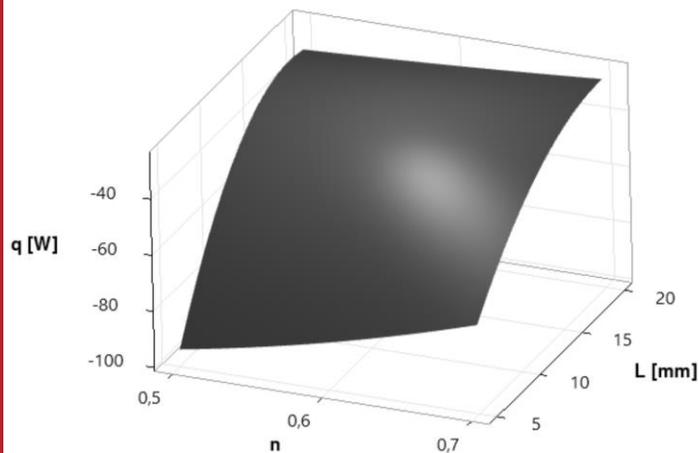
Schwarz Diamond (SD)

$$q(n, L) = -225.6 - 7.8n + 24.75L + 238.9n^2 - 0.7776L^2 - 16.66nL - 9.80n^2L + 0.8110nL^2$$

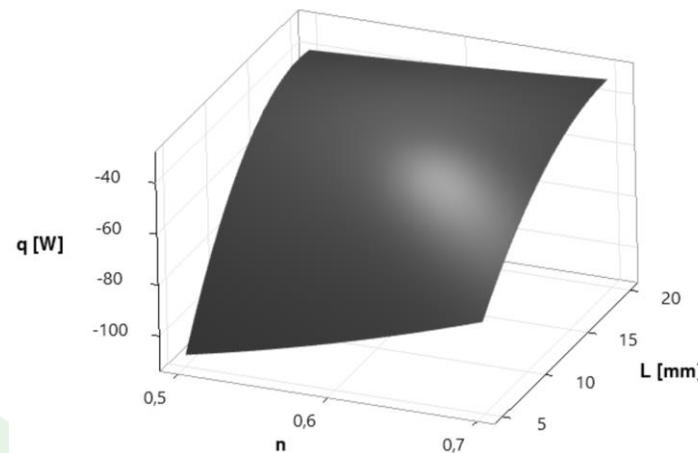
Schwarz Primitive (SP)

$$q(n, L) = -151.1 - 42.3n + 19.62L + 238.9n^2 - 0.6556L^2 - 15.48nL - 9.80n^2L + 0.8110nL^2$$

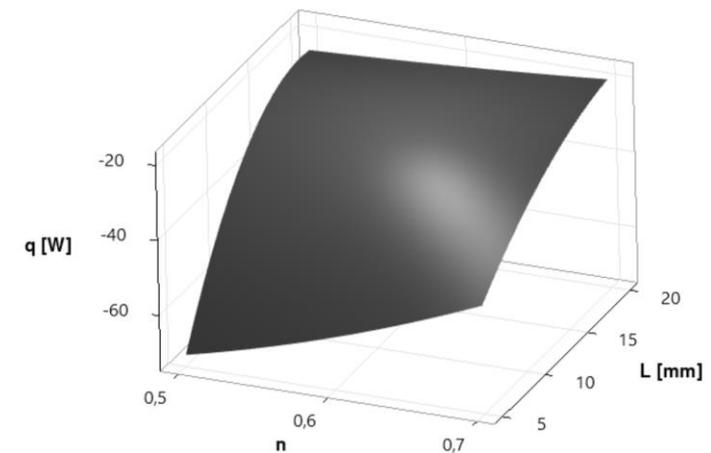
SG



SD



SP



Antecedentes y Justificación

Alcance

Objetivos

Revisión de la literatura

Metodología

Resultados, análisis y discusión

Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro

Referencias

Análisis y discusión de la parte térmica: Análisis del DOE (Efectos)

Antecedentes y Justificación

Alcance

Objetivos

Revisión de la literatura

Metodología

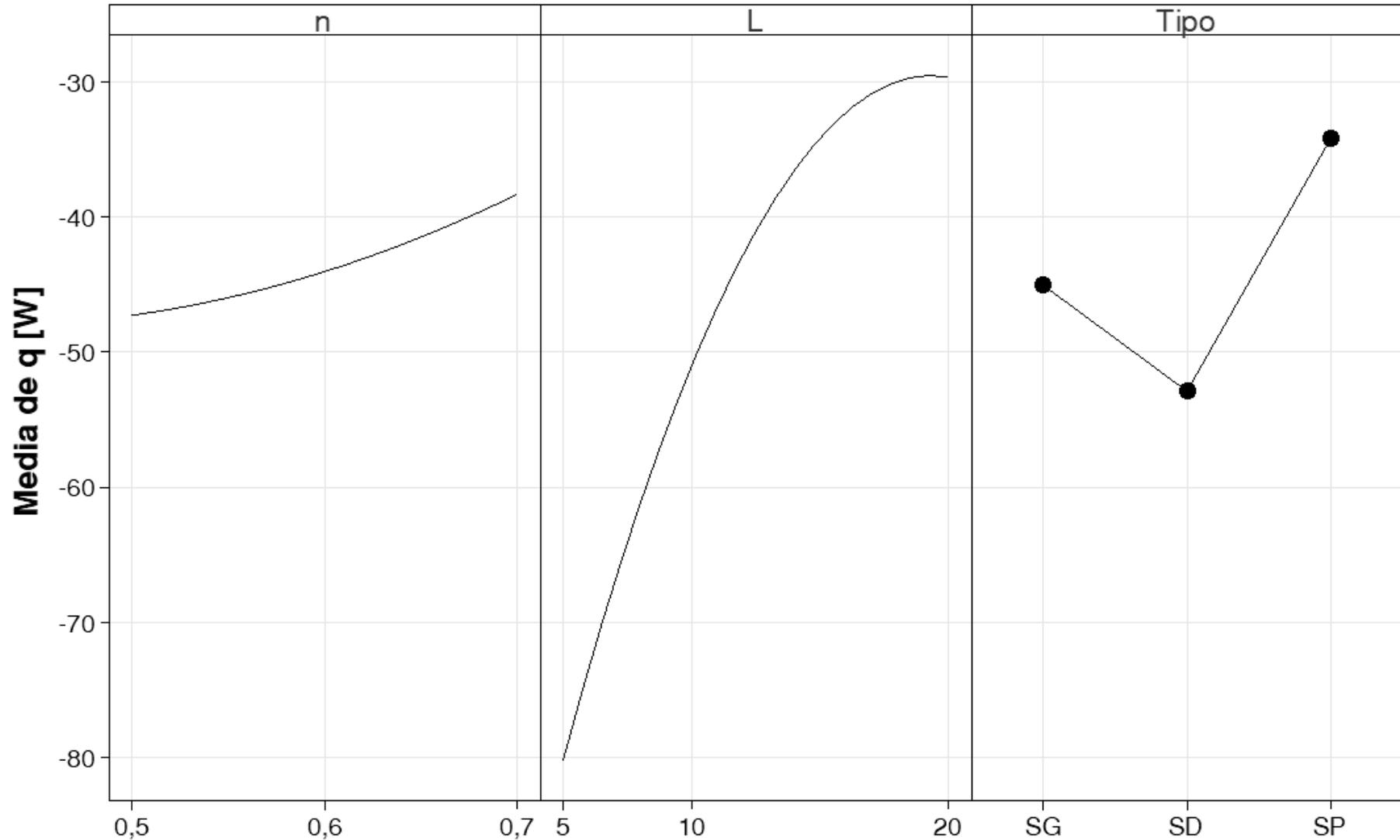
Resultados, análisis y discusión

Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro

Referencias

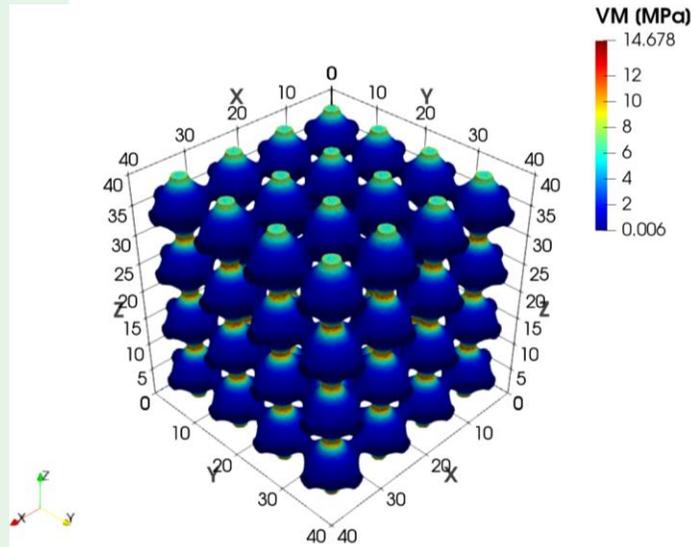
Gráfica de efectos principales para q

Medias ajustadas

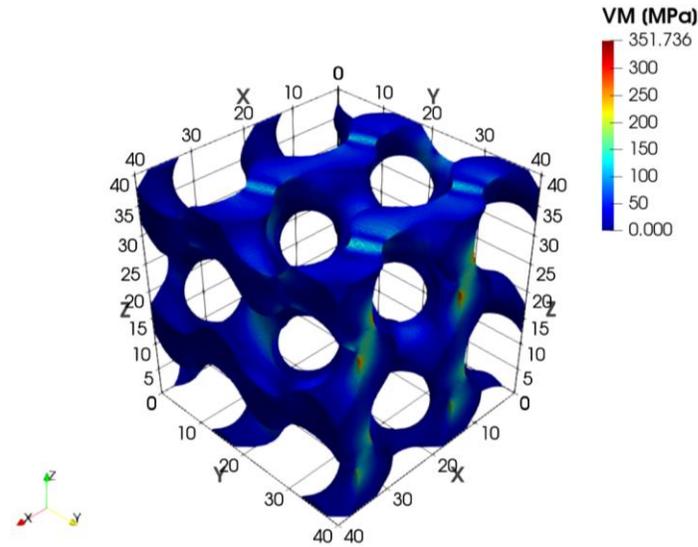


Análisis y discusión de la parte mecánica: Resultados

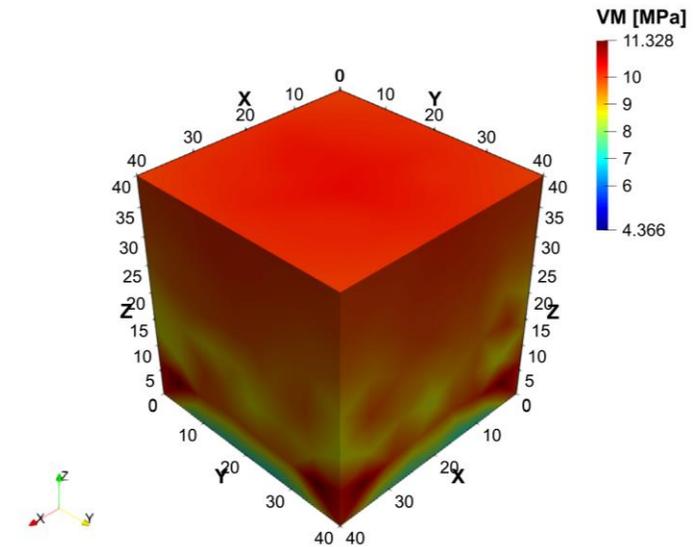
Resultados



Corrida 3:
 $VM_{max} = 14.678 [MPa]$



Corrida 7:
 $VM_{max} = 351.736 [MPa]$



Cubo:
 $VM_{max} = 11.328 [MPa]$

Tiempos de simulación

| N. Corrida | Tiempo [min] |
|------------|--------------|
| 14 (Min) | 5.99 |
| 20 (Max) | 31.47 |

Antecedentes y Justificación

Alcance

Objetivos

Revisión de la literatura

Metodología

Resultados, análisis y discusión

Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro

Referencias

Análisis y discusión de la parte mecánica: Análisis del DOE (Residuos)

Antecedentes y Justificación

Alcance

Objetivos

Revisión de la literatura

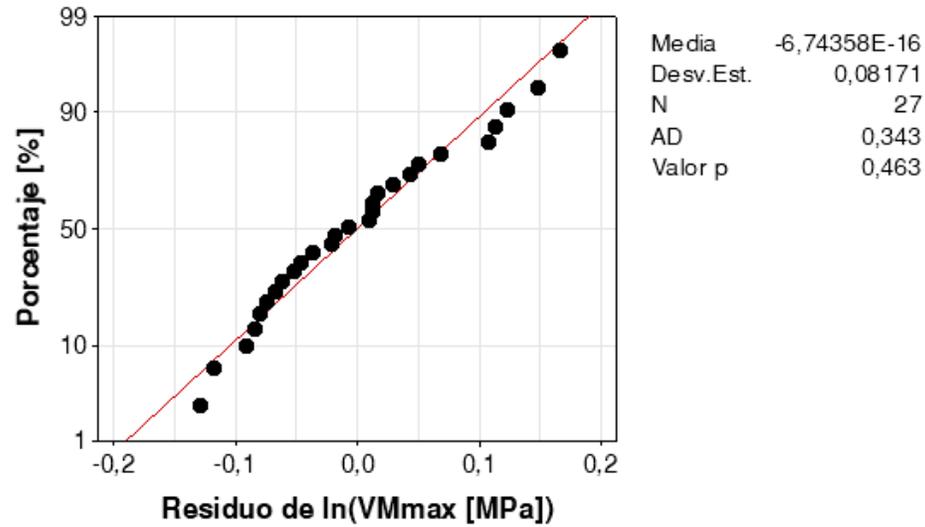
Metodología

Resultados, análisis y discusión

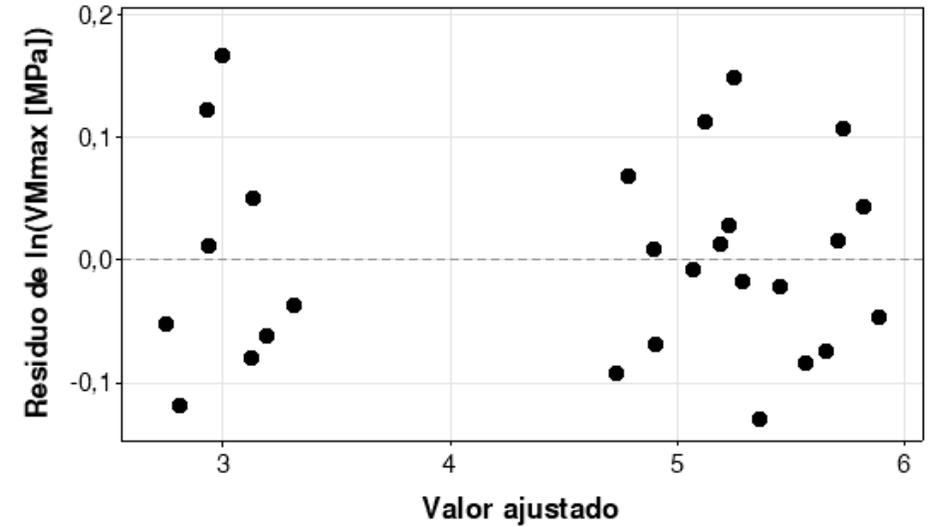
Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro

Referencias

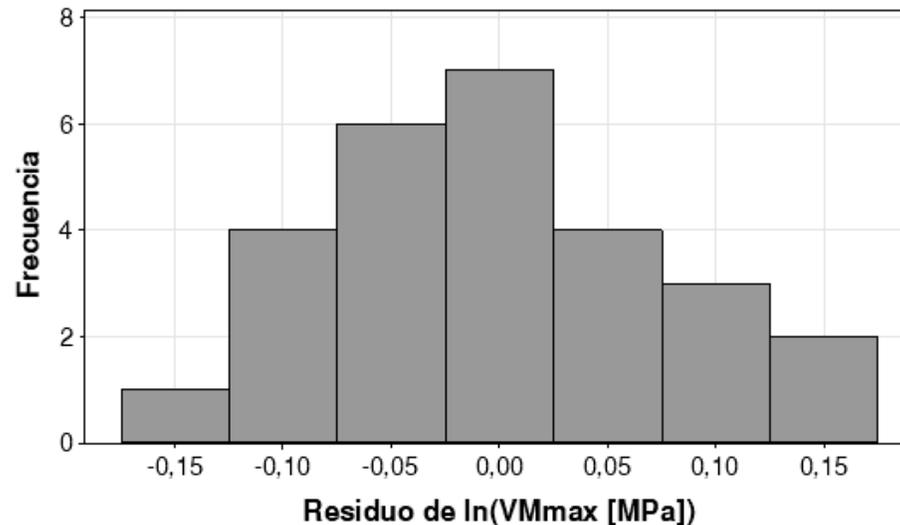
(a) Gráfica de probabilidad normal
(la respuesta es $\ln(\text{VMmax})$)



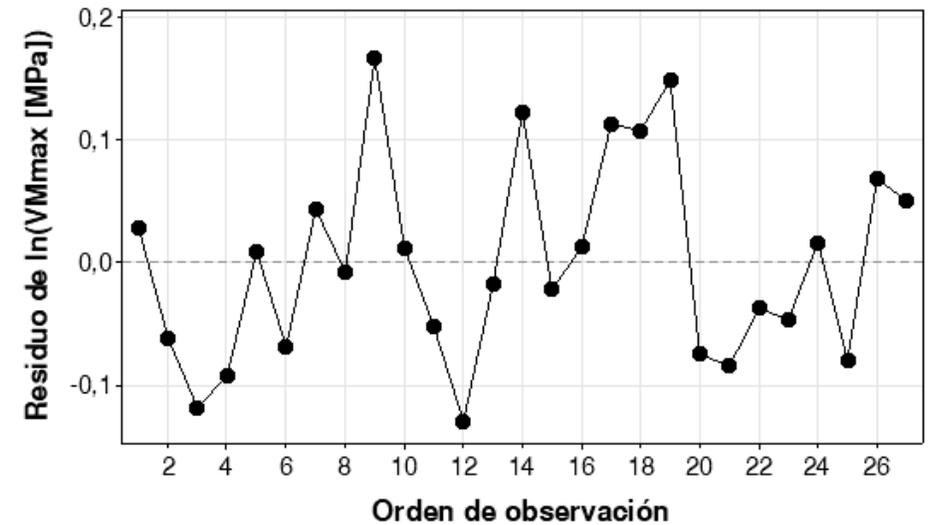
(b) vs. ajustes
(la respuesta es $\ln(\text{VMmax})$)



(c) Histograma
(la respuesta es $\ln(\text{VMmax})$)



(d) vs. orden
(la respuesta es $\ln(\text{VMmax})$)



Análisis y discusión de la parte mecánica: Análisis del DOE (Ajuste del modelo)

Antecedentes y Justificación

Alcance

Objetivos

Revisión de la literatura

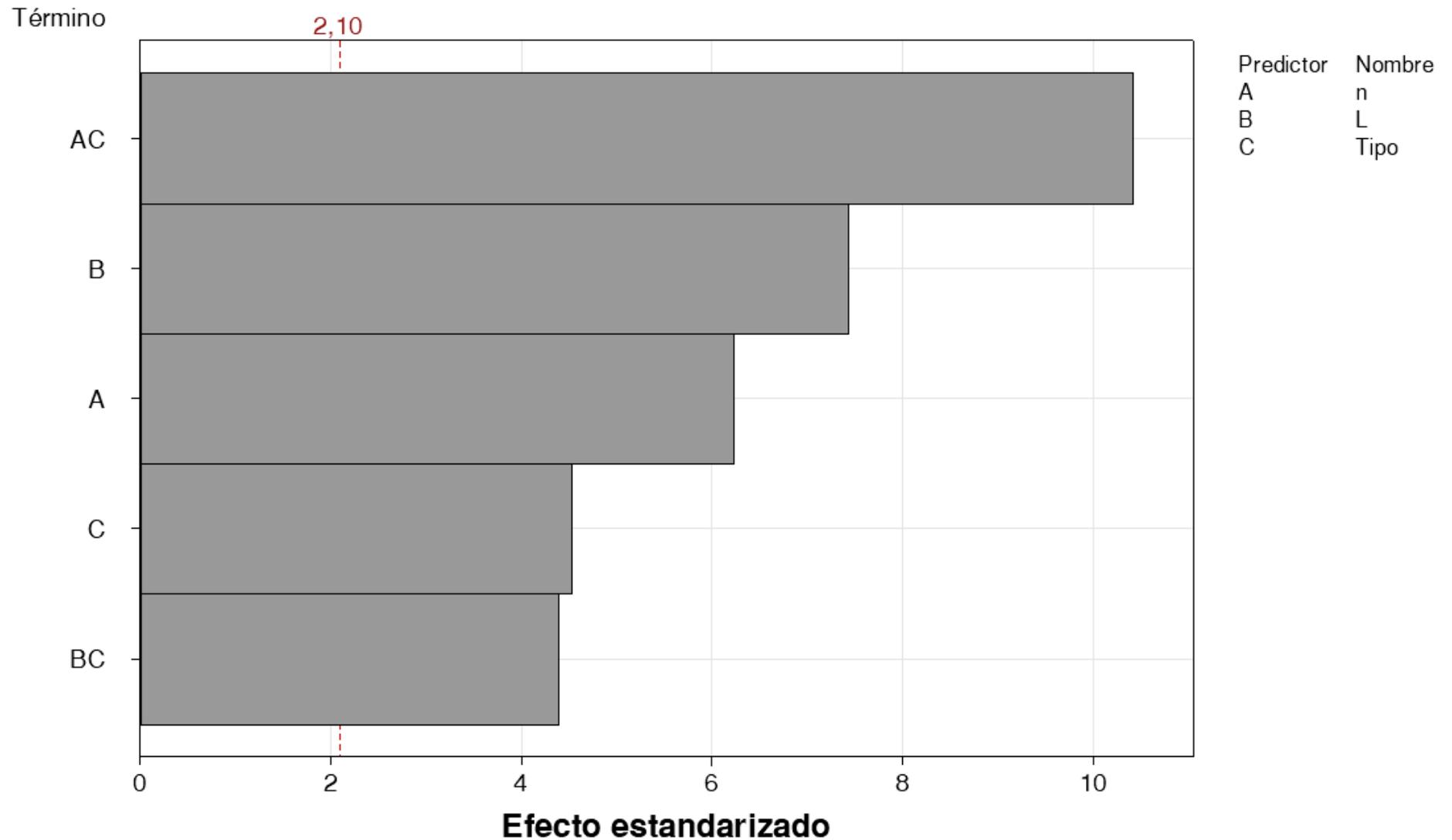
Metodología

Resultados, análisis y discusión

Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro

Referencias

Diagrama de Pareto de efectos estandarizados
(la respuesta es VMmax; $\alpha = 0,05$)



Análisis y discusión de la parte mecánica: Análisis del DOE

Metamodelos

Schoen Gyroid (SG)

$$\ln[VM_{max}(n, L)] = 2.362 + 4.623n + 0.01110L$$

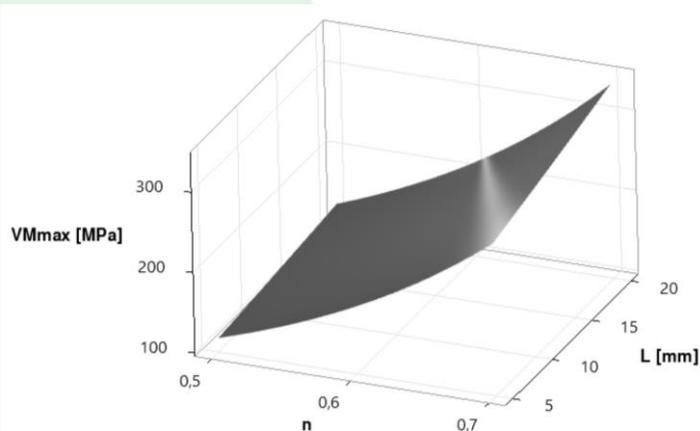
Schwarz Diamond (SD)

$$\ln[VM_{max}(n, L)] = 3.872 + 1.619n + 0.04418L$$

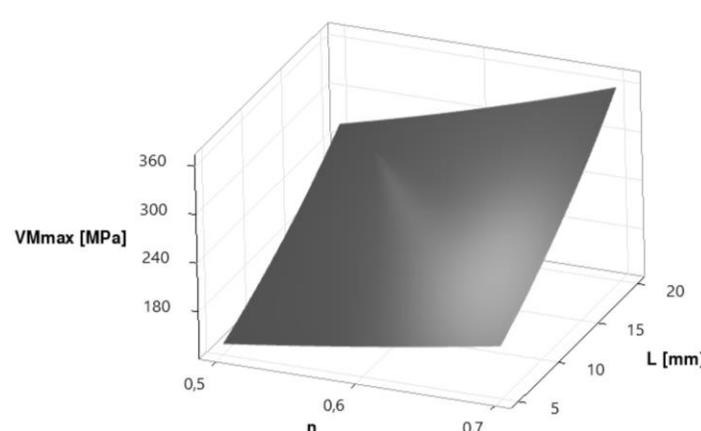
Schwarz Primitive (SP)

$$\ln[VM_{max}(n, L)] = 4.025 - 1.918n + 0.01228L$$

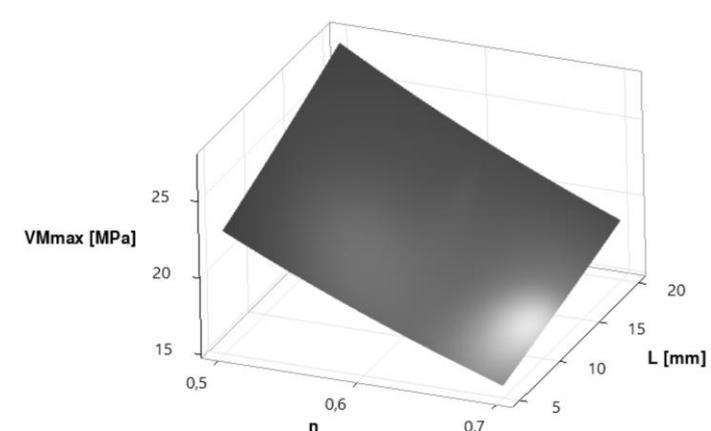
SG



SD



SP



Antecedentes y Justificación

Alcance

Objetivos

Revisión de la literatura

Metodología

Resultados, análisis y discusión

Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro

Referencias

Análisis y discusión de la parte térmica: Análisis del DOE (Efectos)

Antecedentes y Justificación

Alcance

Objetivos

Revisión de la literatura

Metodología

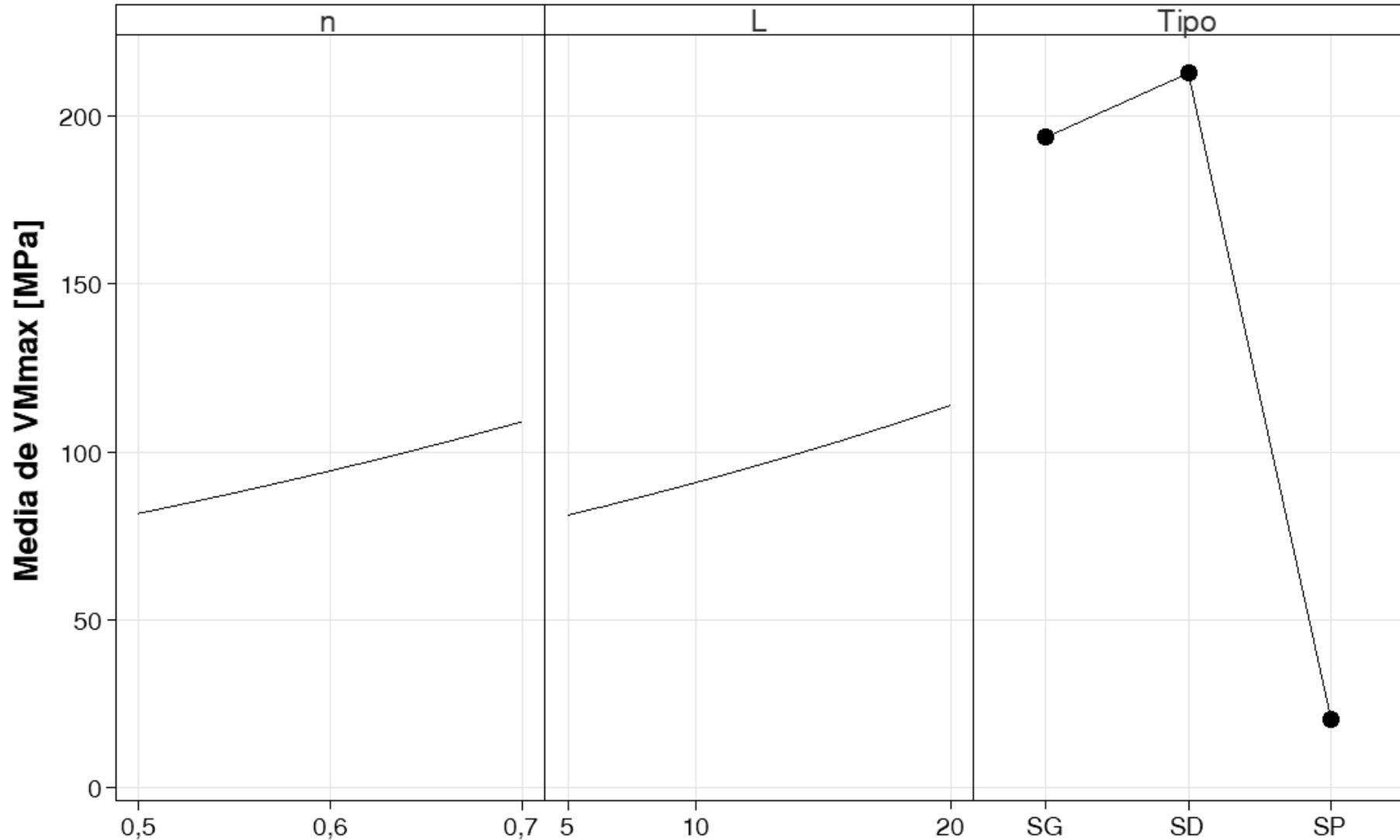
Resultados, análisis y discusión

Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro

Referencias

Gráfica de efectos principales para VMmax

Medias ajustadas



Manufactura de estructuras

Modelos impresos

Antecedentes y Justificación

Alcance

Objetivos

Revisión de la literatura

Metodología

Resultados, análisis y discusión

Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro

Referencias

Número de corrida

4

6

27

Tipo = SG,

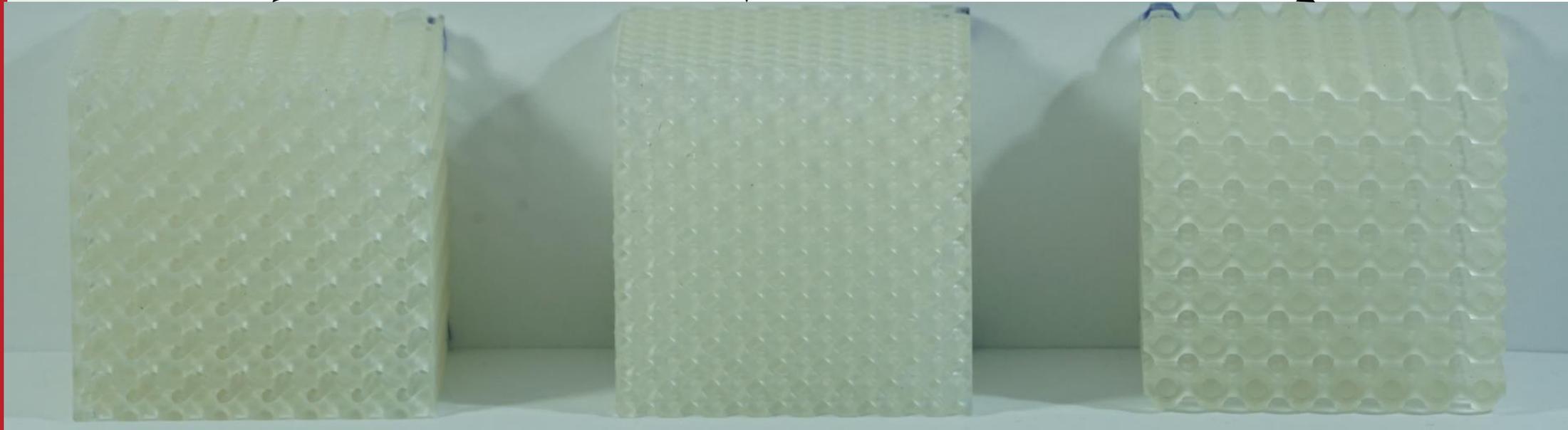
Tipo = SD,

Tipo = SP,

$L_r = 5, n = 0.5$

$L_r = 5, n = 0.5$

$L_r = 5, n = 0.5$



Análisis dimensional de longitudes y discusión: Corrida 4 (SG)

Antecedentes y Justificación

Alcance

Objetivos

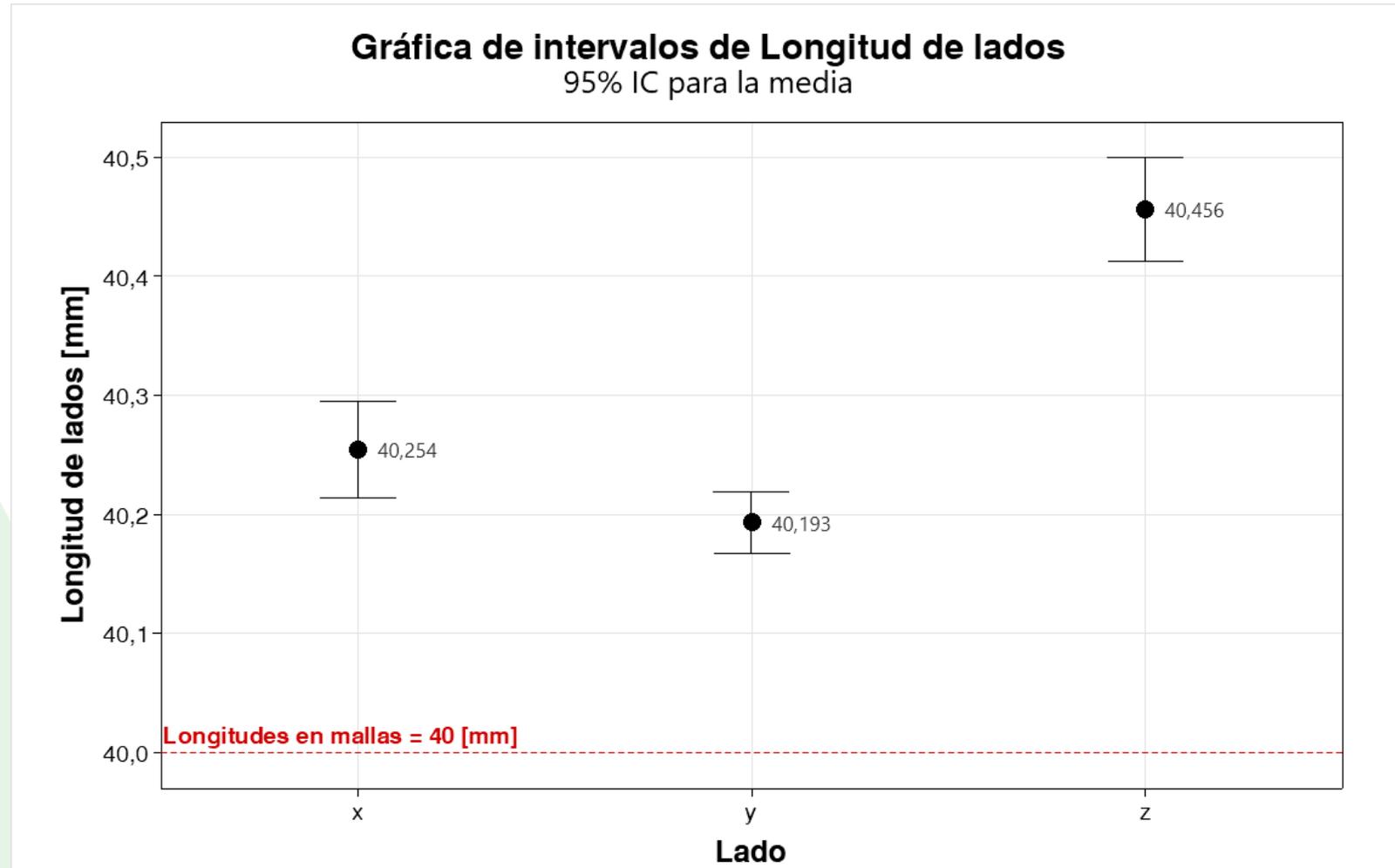
Revisión de la literatura

Metodología

Resultados, análisis y discusión

Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro

Referencias



Pruebas de hipótesis

$$H_0: \mu = 40 \text{ [mm]}$$

$$H_1: \mu \neq 40 \text{ [mm]}$$

$$D_x: p = 0.000 \quad D_y: p = 0.000 \quad D_z: p = 0.000$$

ANOVA

H_0 : Todas las medias son iguales.

H_1 : No todas las medias son iguales.

$$p = 0.000$$

Análisis dimensional de longitudes y discusión: Corrida 6 (SD)

Antecedentes y Justificación

Alcance

Objetivos

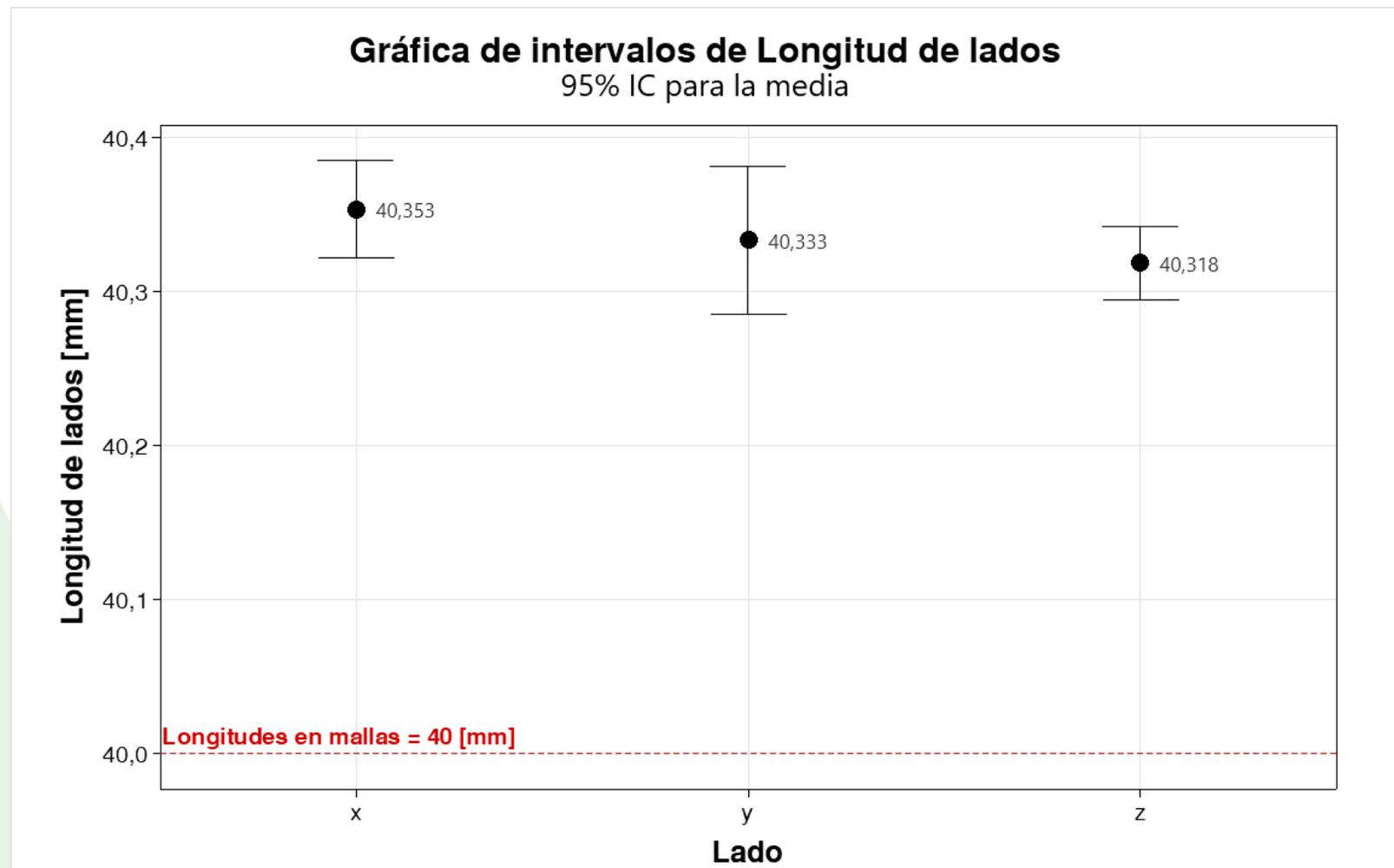
Revisión de la literatura

Metodología

Resultados, análisis y discusión

Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro

Referencias



Pruebas de hipótesis

$$H_0: \mu = 40 \text{ [mm]}$$

$$H_1: \mu \neq 40 \text{ [mm]}$$

$$D_x: p = 0.000 \quad D_y: p = 0.000 \quad D_z: p = 0.000$$

ANOVA

H_0 : Todas las medias son iguales.

H_1 : No todas las medias son iguales.

$$p = 0.311$$

Análisis dimensional de longitudes y discusión: Corrida 27 (SP)

Antecedentes y Justificación

Alcance

Objetivos

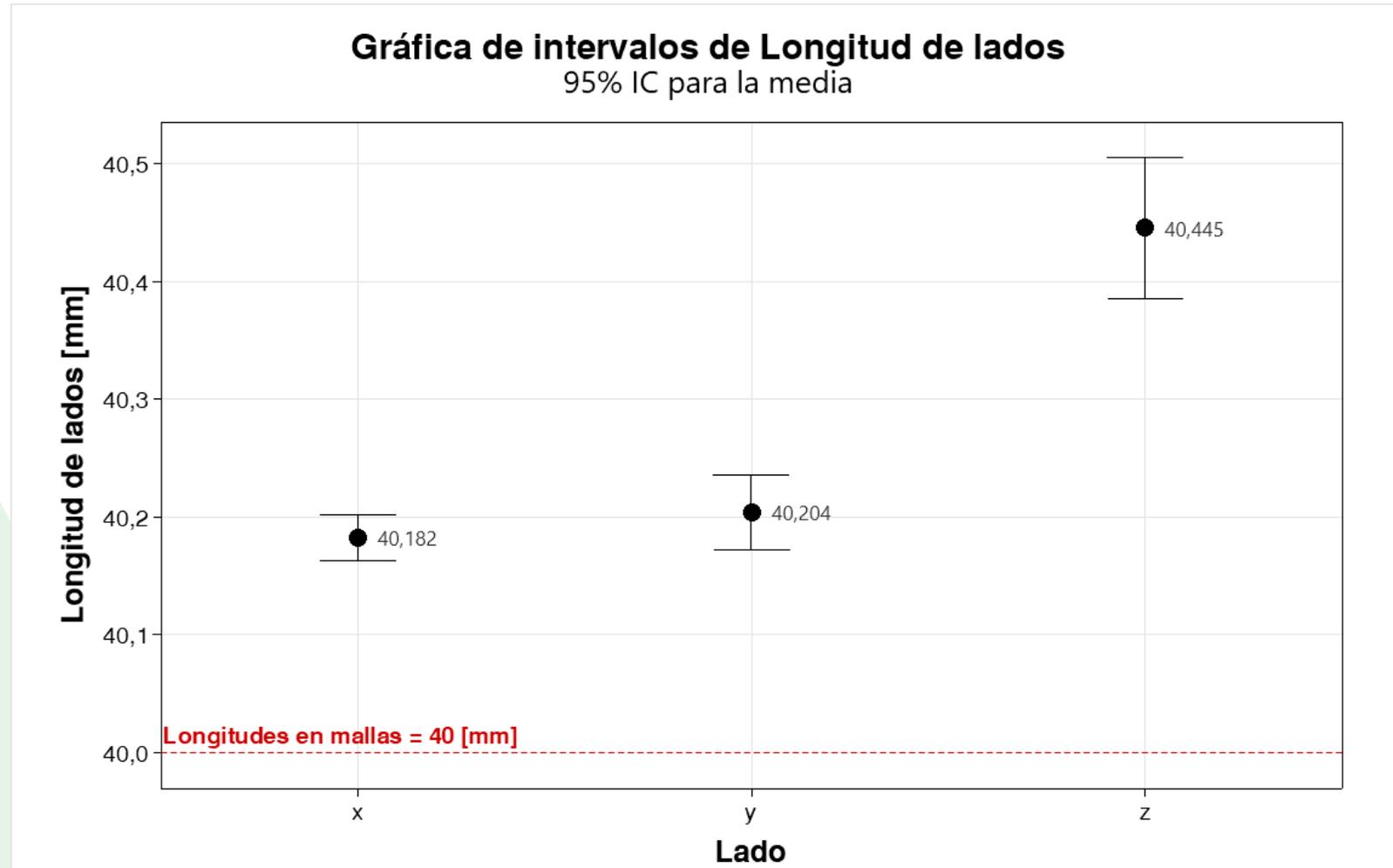
Revisión de la literatura

Metodología

Resultados, análisis y discusión

Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro

Referencias



Pruebas de hipótesis

$$H_0: \mu = 40 \text{ [mm]}$$

$$H_1: \mu \neq 40 \text{ [mm]}$$

$$D_x: p = 0.000 \quad D_y: p = 0.000 \quad D_z: p = 0.000$$

ANOVA

H_0 : Todas las medias son iguales.

H_1 : No todas las medias son iguales.

$$p = 0.000$$

Análisis dimensional de volúmenes y discusión

Corrida 4 (SG)

Normalidad

H_0 : Los datos siguen una distribución normal.

H_1 : Los datos no siguen una distribución normal.

$$p = 0.055$$

Prueba de hipótesis

$H_0: \mu = 31.98$ [ml]

$H_1: \mu \neq 31.98$ [ml]

$$p = 0.000$$

Corrida 6 (SD)

Normalidad

H_0 : Los datos siguen una distribución normal.

H_1 : Los datos no siguen una distribución normal.

$$p = 0.009$$

Prueba de hipótesis

$H_0: \eta = 31.97$ [ml]

$H_1: \eta \neq 31.97$ [ml]

$$p = 0.002$$

Corrida 27 (SP)

Normalidad

H_0 : Los datos siguen una distribución normal.

H_1 : Los datos no siguen una distribución normal.

$$p = 0.696$$

Prueba de hipótesis

$H_0: \mu = 31.99$ [ml]

$H_1: \mu \neq 31.99$ [ml]

$$p = 0.000$$

Antecedentes y
Justificación

Alcance

Objetivos

Revisión de la
literatura

Metodología

Resultados, análisis
y discusión

Conclusiones,
recomendaciones y
trabajo futuro

Referencias

Antecedentes y
Justificación

Alcance

Objetivos

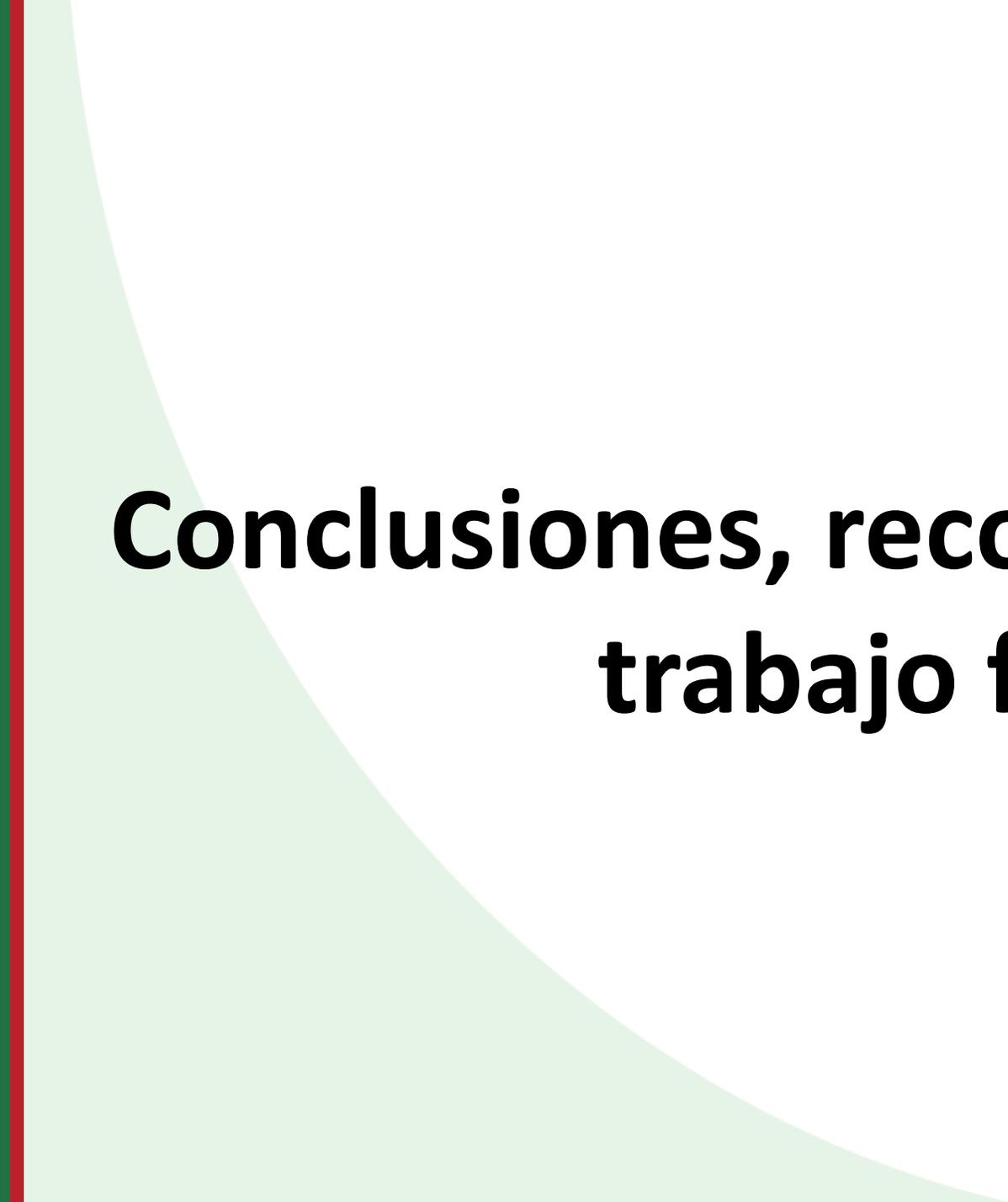
Revisión de la
literatura

Metodología

Resultados, análisis
y discusión

**Conclusiones,
recomendaciones
y trabajo futuro**

Referencias



Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro

Conclusiones

Antecedentes y
Justificación

Alcance

Objetivos

Revisión de la
literatura

Metodología

Resultados, análisis
y discusión

Conclusiones,
recomendaciones
y trabajo futuro

Referencias

- Los **códigos desarrollados permiten diseñar TPMS rectangulares y cilíndricas con grosor de pared y rotadas**. Adicionalmente, los códigos permiten obtener TPMS para manufacturar por SLA de manera inmediata.
- **Los códigos de preproceso de las mallas superficiales, funcionan de manera excelente para dominios rectangulares**, pero tienen ciertos problemas con dominios cilíndricos o rotados.
- De los factores individuales para la tasa de **transferencia de calor**, se tiene que el más **significativo es L** y para el **esfuerzo de Von Mises máximo, $Tipo$** . Además, se obtuvieron los metamodelos.
- **Para el comportamiento térmico** se concluye que sin importar el nivel de la variable categórica $Tipo$, se tiene siempre una tendencia en donde a menor n y L , se disipa más q . Siendo que la TPMS con **mejor comportamiento térmico la de la siguiente configuración: $Tipo = SD, n = 0.5$ y $L = 5 [mm]$, con un valor ajustado $q = -109.211 [W]$.**
- **Para el comportamiento mecánico** se concluye que para la TPMS SG y SD, se tiene que mientras menos n y L , menos VM_{max} . En cambio, para la SP, mientras más n y menos L se obtiene menos VM_{max} . Siendo que la TPMS con la **mayor resistencia mecánica (menor VM_{max}) es la de la siguiente configuración: $Tipo = SP, n = 0.7$ y $L = 5 [mm]$, obteniéndose un valor ajustado $VM_{max} = 15.5423 [MPa]$.**
- Se concluye también que el **método de impresión y posimpresión** utilizados **producen buenos resultados, pero no exactos**. Esto debido a los resultados obtenidos en la validación dimensional.

Recomendaciones

Antecedentes y
Justificación

Alcance

Objetivos

Revisión de la
literatura

Metodología

Resultados, análisis
y discusión

**Conclusiones,
recomendaciones
y trabajo futuro**

Referencias

- **Se recomienda utilizar los códigos en Python** para la generación de las geometrías debido a su versatilidad y capacidad de generar múltiples geometrías en una corrida del programa.
- **Se recomienda usar el enlace entre SALOME** y Python para automatizar la generación de contornos.
- **Realizar las simulaciones en paralelo** ya que esto ahorraría mucho tiempo de simulación.
- **Se recomienda mejorar los equipos de lavado y de curado para las resinas impresas, o a su vez se recomienda adquirir los productos recomendados por Formlabs.**

Trabajo Futuro

Antecedentes y Justificación

Alcance

Objetivos

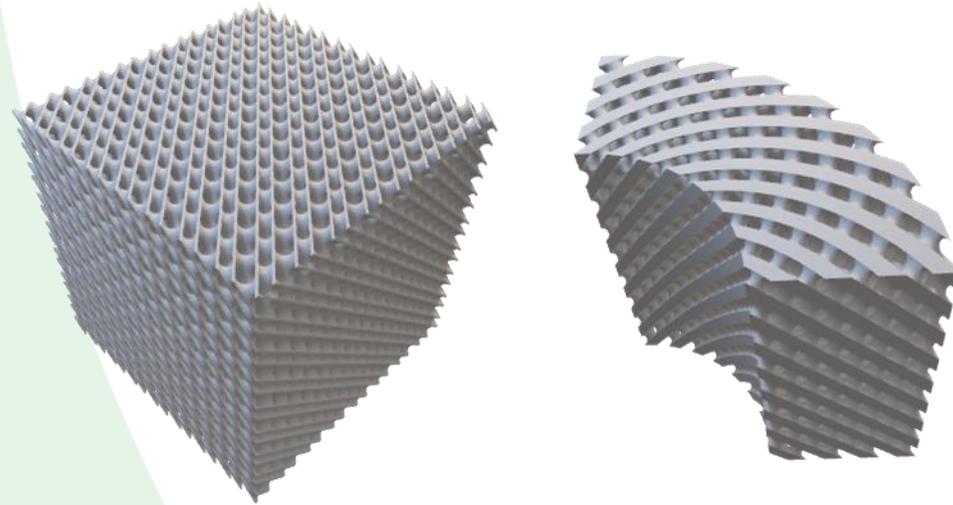
Revisión de la literatura

Metodología

Resultados, análisis y discusión

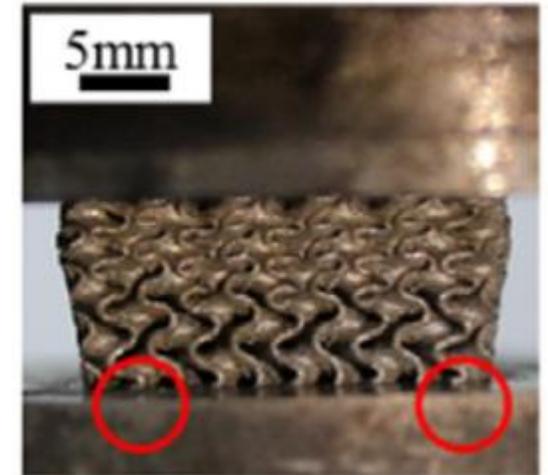
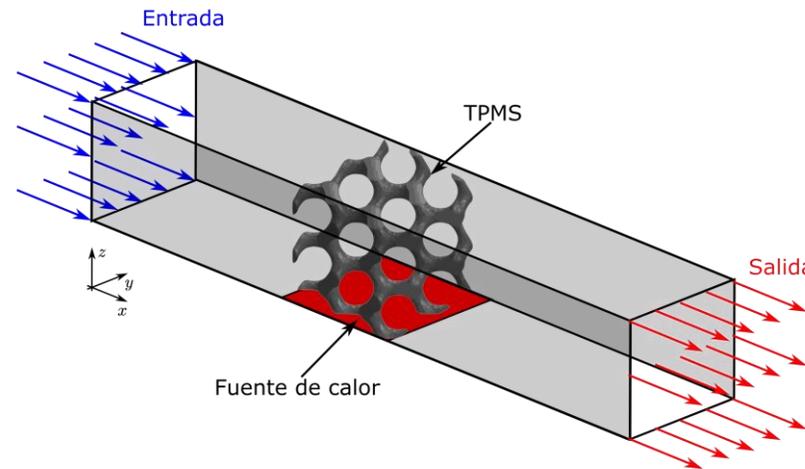
Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro

Referencias



Realizar los análisis en más tipos de TPMS y realizar la manufactura directamente en metal.

Realizar el experimento físico para constatar los resultados computacionales, adicionalmente evaluar el rendimiento térmico.



(Zhang et al., 2022)

Antecedentes y
Justificación

Alcance

Objetivos

Revisión de la
literatura

Metodología

Resultados, análisis
y discusión

Conclusiones,
recomendaciones y
trabajo futuro

Referencias

Referencias

Antecedentes y
Justificación

Alcance

Objetivos

Revisión de la
literatura

Metodología

Resultados, análisis
y discusión

Conclusiones,
recomendaciones y
trabajo futuro

Referencias

- *Aspect Ratio*. (s. f.). Recuperado 21 de noviembre de 2022, de https://docs.salome-platform.org/latest/gui/SMESH/aspect_ratio.html
- *Aspect ratio 3D*. (s. f.). Recuperado 14 de noviembre de 2022, de https://docs.salome-platform.org/latest/gui/SMESH/aspect_ratio_3d.html
- Craig, J. J. (2005). *Introduction to robotics: Mechanics and control* (3rd ed). Pearson/Prentice Hall.
- CSC – IT Center for Science. (2022). *Elmer GUI Tutorials*. <https://www.nic.funet.fi/pub/sci/physics/elmer/doc/ElmerTutorials.pdf>
- go3dprint. (s. f.). *3D Printer Types: The Complete List*. go3dprint. Recuperado 25 de enero de 2023, de <https://www.go-3dprint.com/3d-printer-types-the-complete-list/>
- Hao Peng, Feng Gao, & Wenjing Hu. (2019). *DESIGN, MODELING AND CHARACTERIZATION OF TRIPLY PERIODIC MINIMAL SURFACE HEAT EXCHANGERS WITH ADDITIVE MANUFACTURING*. Solid Freeform Fabrication Symposium. <https://utw10945.utweb.utexas.edu/sites/default/files/2019/194%20Design,%20Modeling%20and%20Characterization%20of%20Triply%20Pe.pdf>
- Kim, J., & Yoo, D.-J. (2020). 3D printed compact heat exchangers with mathematically defined core structures. *Journal of Computational Design and Engineering*, 7(4), 527-550. <https://doi.org/10.1093/jcde/qwaa032>
- Okereke, M., & Keates, S. (2018). *Finite Element Applications*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-67125-3>
- Team, E. (2019, julio 26). 3D Printer Types: The Complete List. *Pick 3D Printer*. <https://pick3dprinter.com/3d-printer-types/>

Antecedentes y
Justificación

Alcance

Objetivos

Revisión de la
literatura

Metodología

Resultados, análisis
y discusión

Conclusiones,
recomendaciones y
trabajo futuro

Referencias

- Walker, J. M., Bodamer, E., Kleinfehn, A., Luo, Y., Becker, M., & Dean, D. (2017). Design and mechanical characterization of solid and highly porous 3D printed poly(propylene fumarate) scaffolds. *Progress in Additive Manufacturing*, 2(1-2), 99-108. <https://doi.org/10.1007/s40964-017-0021-3>