

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE

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

Fabricación de intercambiadores compactos usando el método de fundición
por cera perdida

Autor:

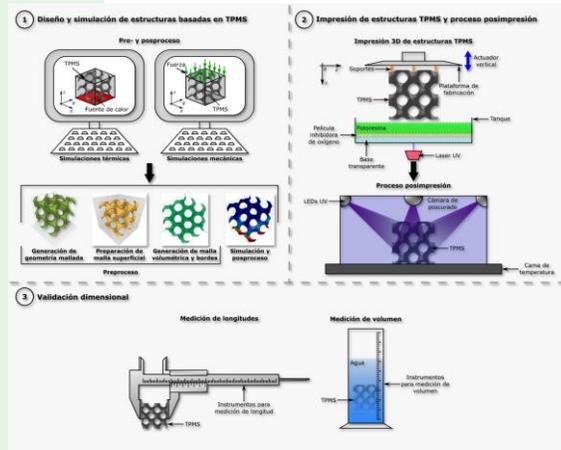
Veintimilla Bautista Fabricio

Director:

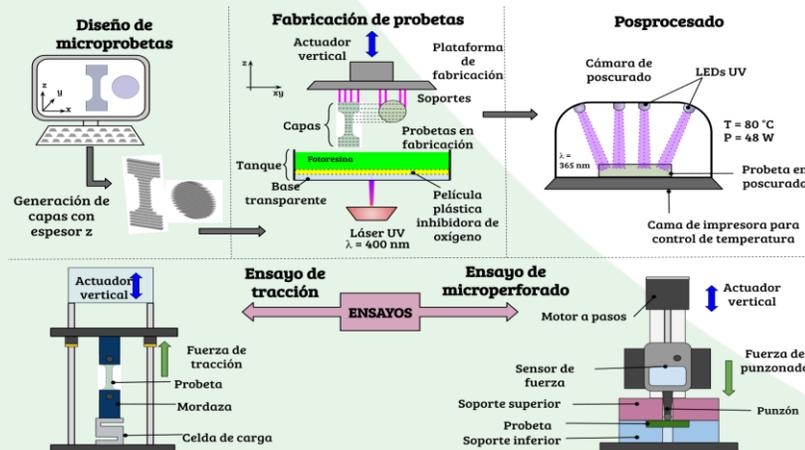
Ing. Hernán Vinicio Lara Padilla, PhD.



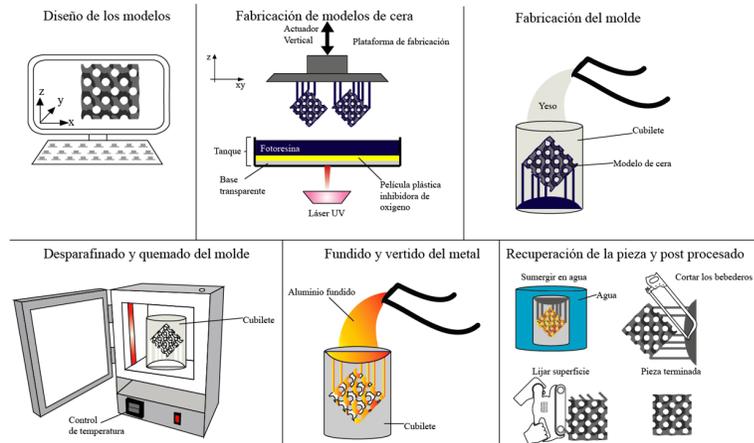
Diseño, fabricación y validación de intercambiadores de calor compactos usando núcleos de superficies mínimas triple periódicas



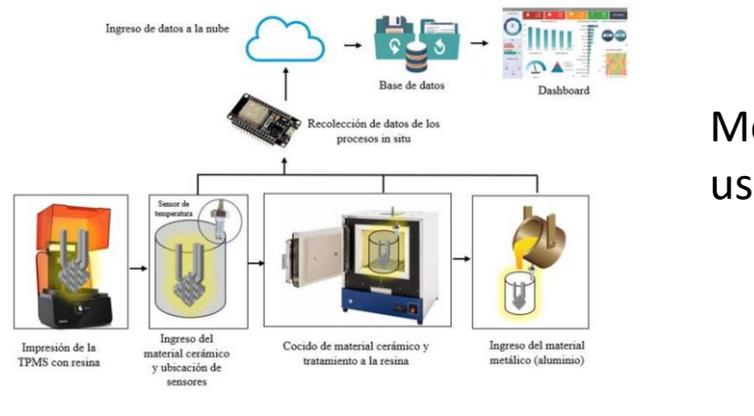
Establecer los dominios físicos a partir de estructuras TPMS matemáticamente definidas para obtener intercambiadores de calor compactos reconfigurables.



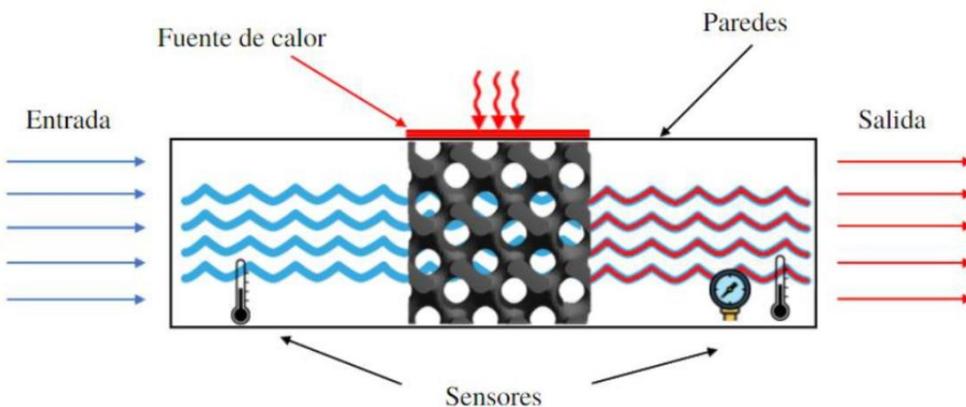
Caracterizar las fotoresinas que serán usadas como matrices de fabricación para los intercambiadores de calor compactos.



Fabricar los intercambiadores compactos usando el método de fundición por cera perdida.



Monitorear la fabricación de los intercambiadores compactos usando el método de fundición por cera perdida.



Evaluación del rendimiento térmico de los intercambiadores de calor compactos con núcleos TPMS

Aplicaciones de las TPM

Aplicaciones mecánicas

- Absorbedores de energía o de impacto
- Aislantes de vibraciones
- Estructuras ligeras para ahorrar en materiales y energía.

Aplicaciones térmicas

- Intercambiadores de calor

Aplicaciones biológicas

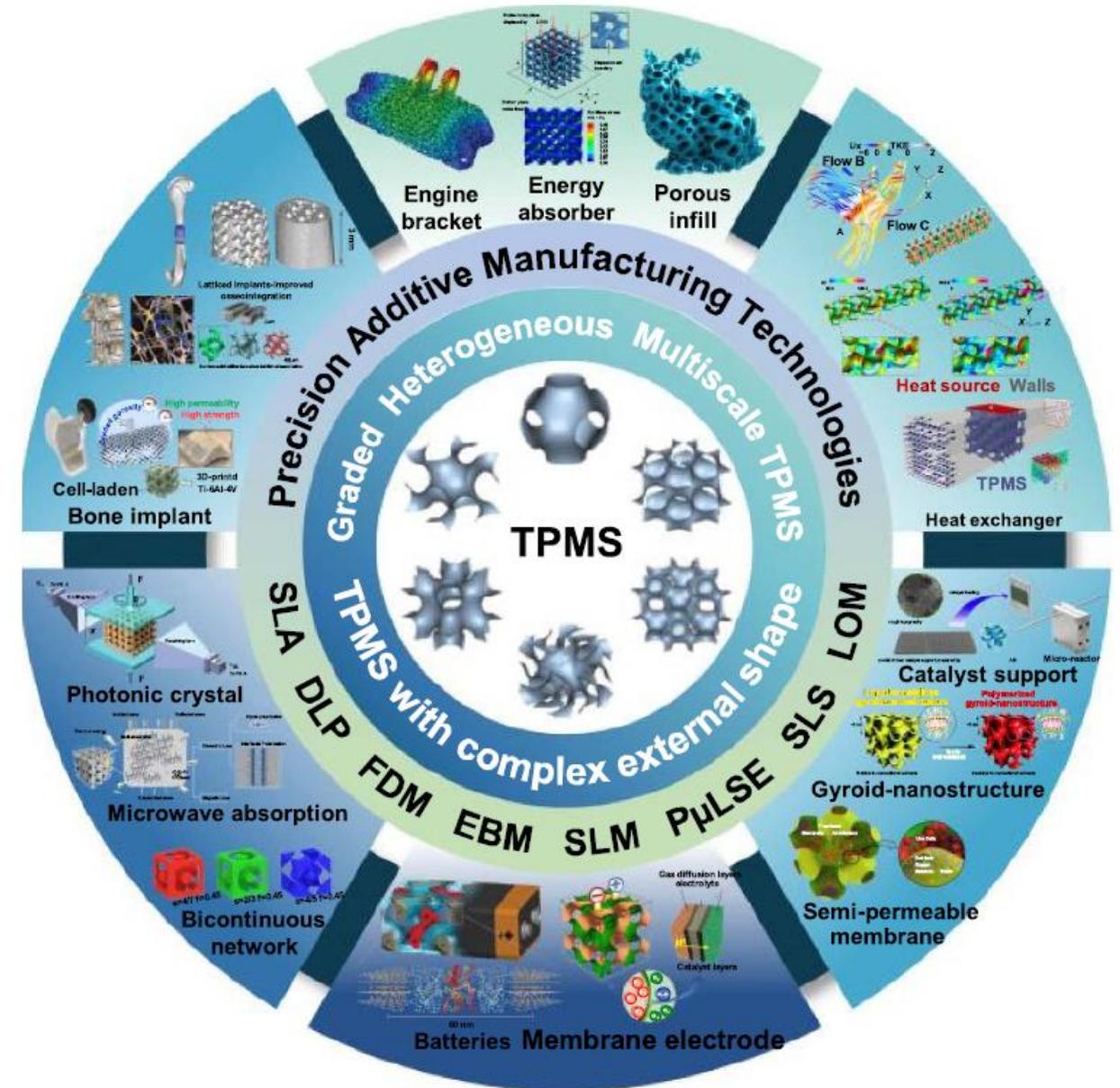
- Fabricación de estructuras tisulares

Aplicaciones químicas

- Catalizadores o reactores químicos

Aplicaciones acústicas y ópticas

- Absorción de ondas como radiación de microondas



(Feng et al., 2022)



CONTENIDO

- Visión general y antecedentes de la fabricación de estructuras TPMS
- Objetivos
- Conceptos básicos de fundición y el método a la cera perdida
- Diseño experimental y fabricación.
- Análisis de Resultados
- Conclusiones
- Recomendaciones

Visión general y antecedentes de la fabricación de estructuras TPMS

Visión general y antecedentes de la fabricación de estructuras TPMS

Objetivos

Conceptos básicos de fundición y el método a la cera perdida

Diseño experimental y fabricación.

Análisis de Resultados

Conclusiones

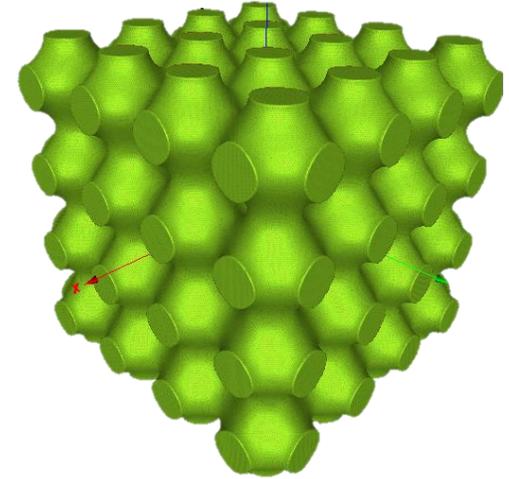
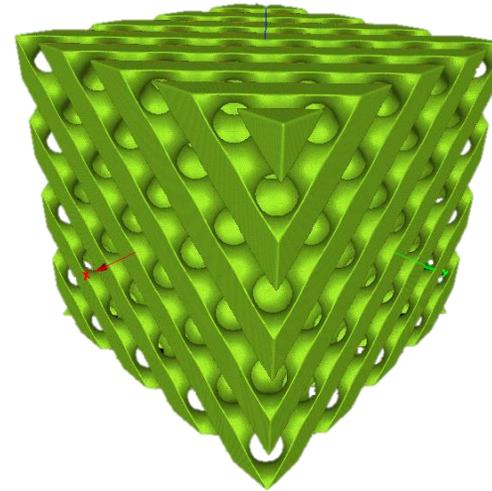
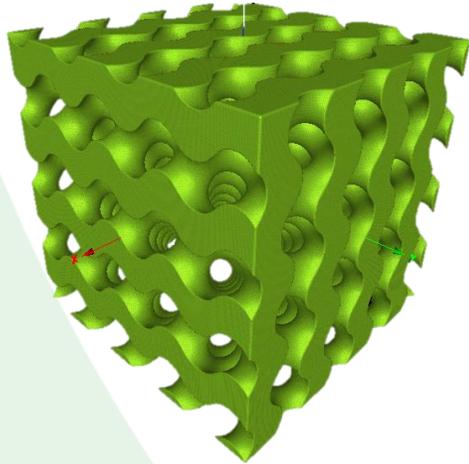
Recomendaciones

Giroide

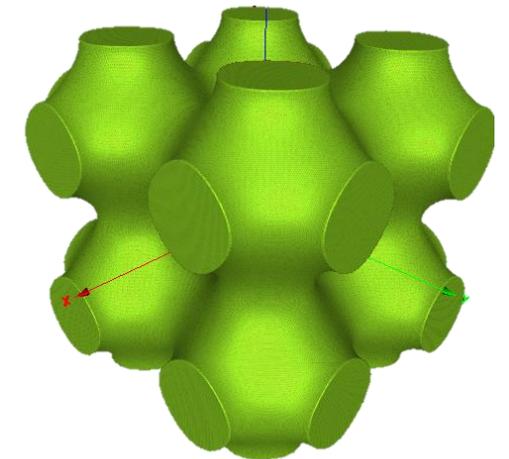
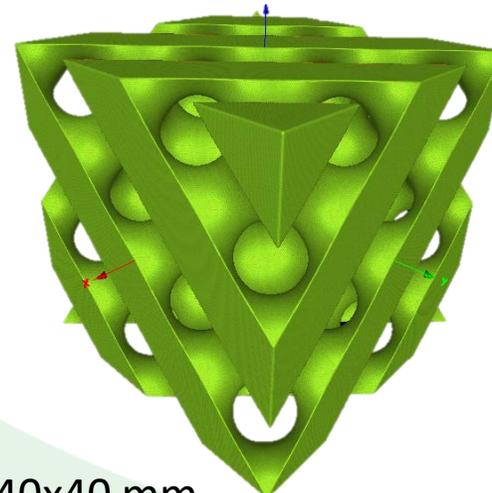
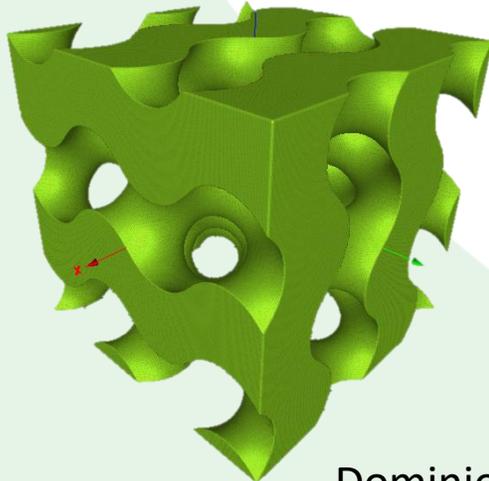
Diamante

Primitiva

L=10



L=20



Dominio es de 40x40x40 mm

Visión general y antecedentes de la fabricación de estructuras TPMS

Objetivos

Conceptos básicos de fundición y el método a la cera perdida

Diseño experimental y fabricación.

Análisis de Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Estructuras celulares



(Ashby, 2000).

Estructuras periódicas



(Wadley, 2003)

Visión general y antecedentes de la fabricación de estructuras TPMS

Objetivos

Objetivos

Conceptos básicos de fundición y el método a la cera perdida



General

Fabricar los intercambiadores compactos usando el método de fundición por cera perdida

Diseño experimental y fabricación.

Análisis de Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Visión general y antecedentes de la fabricación de estructuras TPMS

Objetivos

Conceptos básicos de fundición y el método a la cera perdida

Diseño experimental y fabricación.

Análisis de Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Objetivos

Específicos

- Preparar y refinar del modelo CAD para la fundición por cera perdida.
- Diseñar un flujo de trabajo que incluya selección de materiales y caracterización para el proceso de cera perdida usando diseño experimental.
- Imprimir y realizar el post-procesamiento del molde en cera.
- Manufacturar los intercambiadores de calor compactos.



Conceptos básicos de fundición y el método a la cera perdida

Visión general y antecedentes de la fabricación de estructuras TPMS

Objetivos

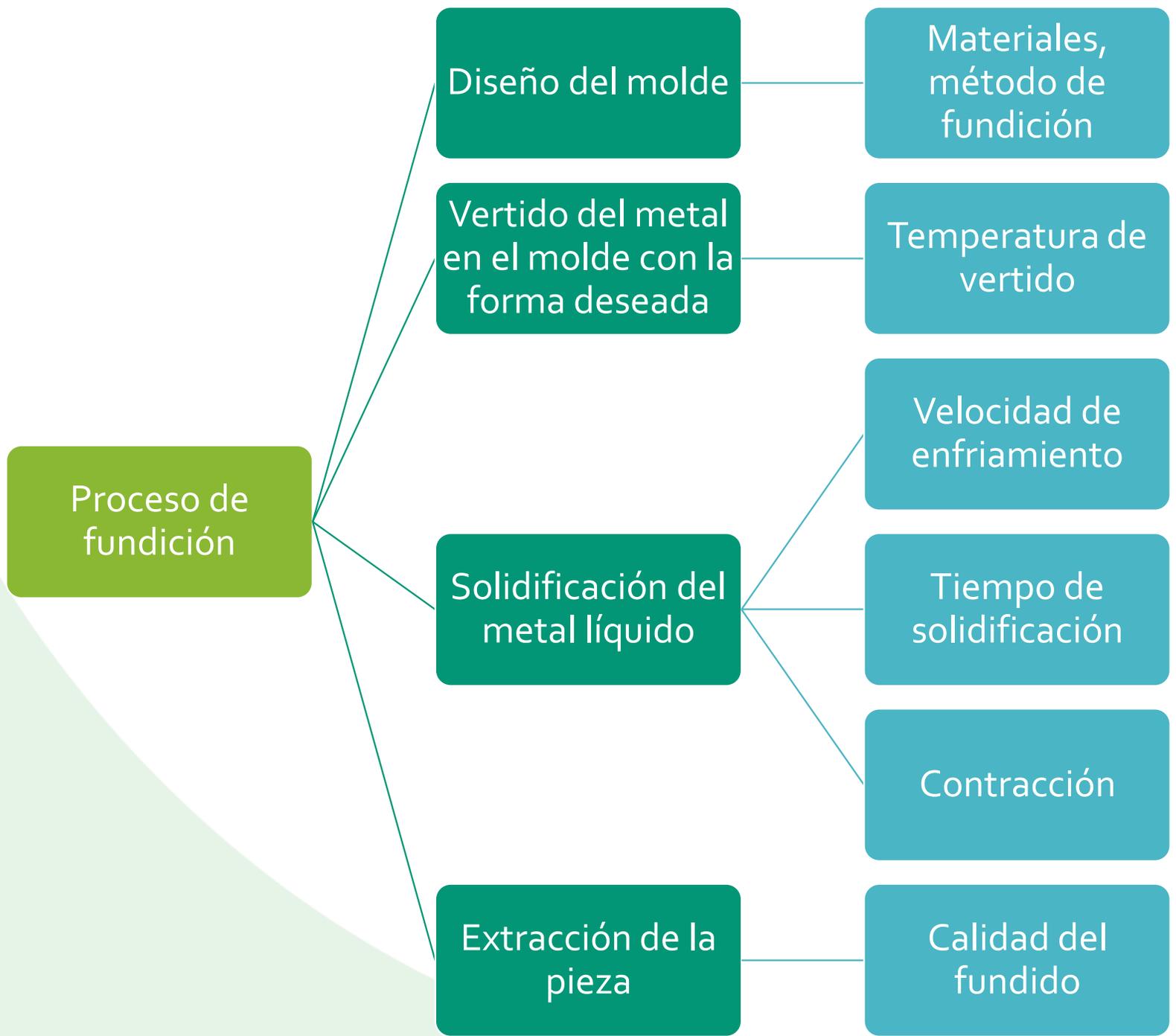
Conceptos básicos de fundición y el método a la cera perdida

Diseño experimental y fabricación.

Análisis de Resultados

Conclusiones

Recomendaciones



Visión general y antecedentes de la fabricación de estructuras TPMS

Objetivos

Conceptos básicos de fundición y el método a la cera perdida

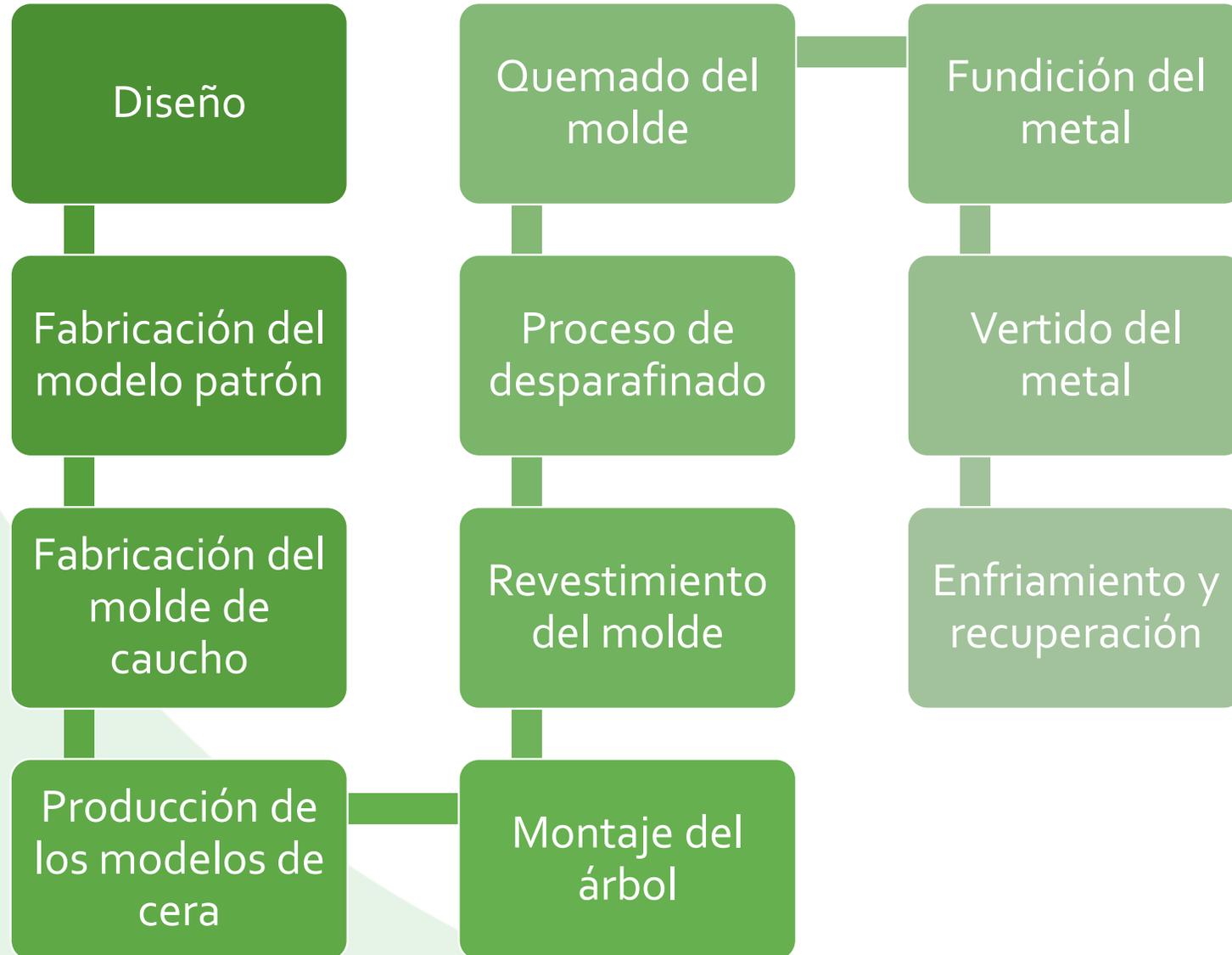
Diseño experimental y fabricación.

Análisis de Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Fundición a la cera perdida



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



Diseño experimental

Causas comunes en los defectos de las fundiciones

Visión general y antecedentes de la fabricación de estructuras TPMS

Objetivos

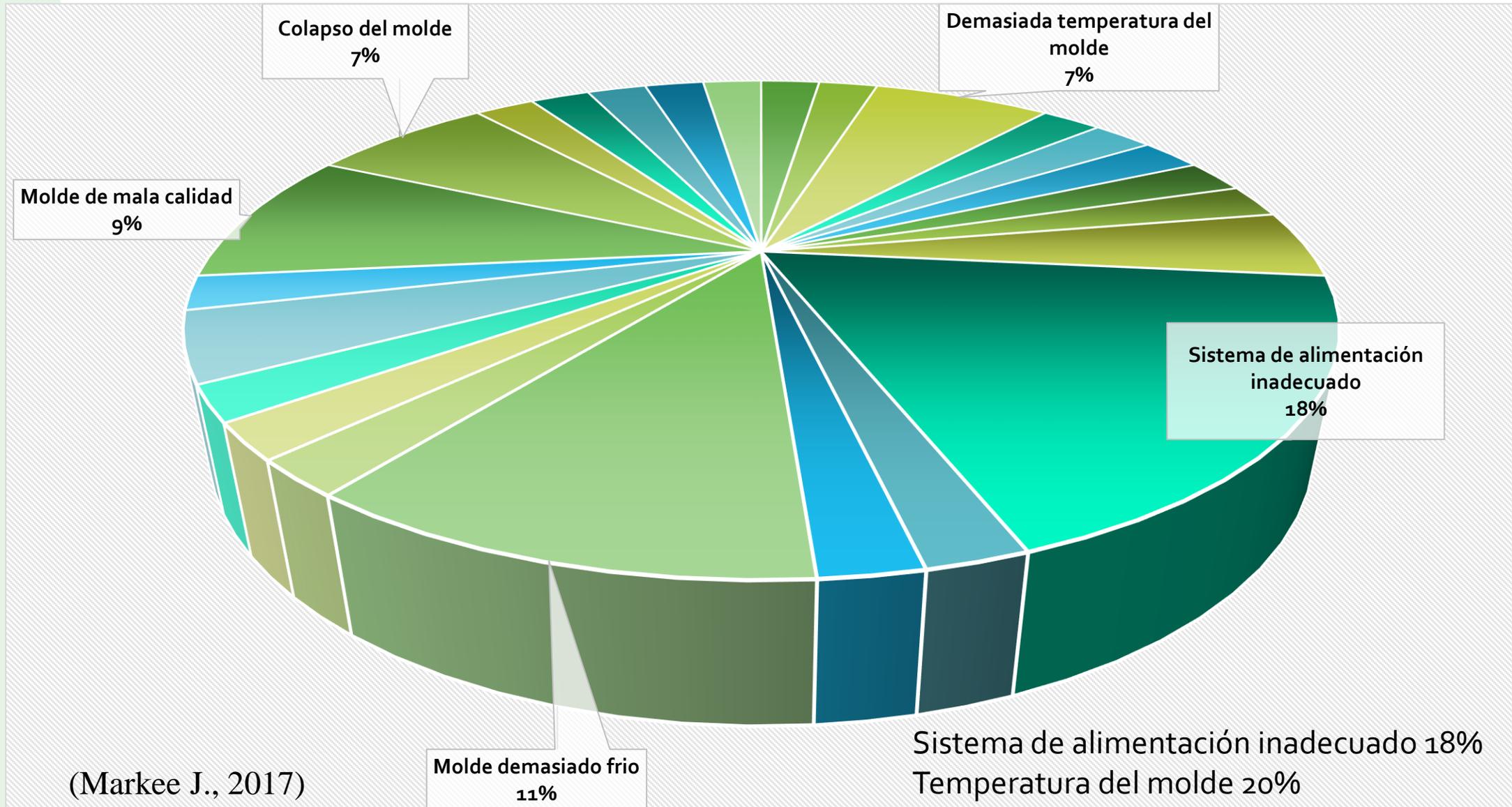
Conceptos básicos de fundición y el método a la cera perdida

Diseño experimental y fabricación.

Análisis de Resultados

Conclusiones

Recomendaciones



Visión general y antecedentes de la fabricación de estructuras TPMS

Objetivos

Conceptos básicos de fundición y el método a la cera perdida

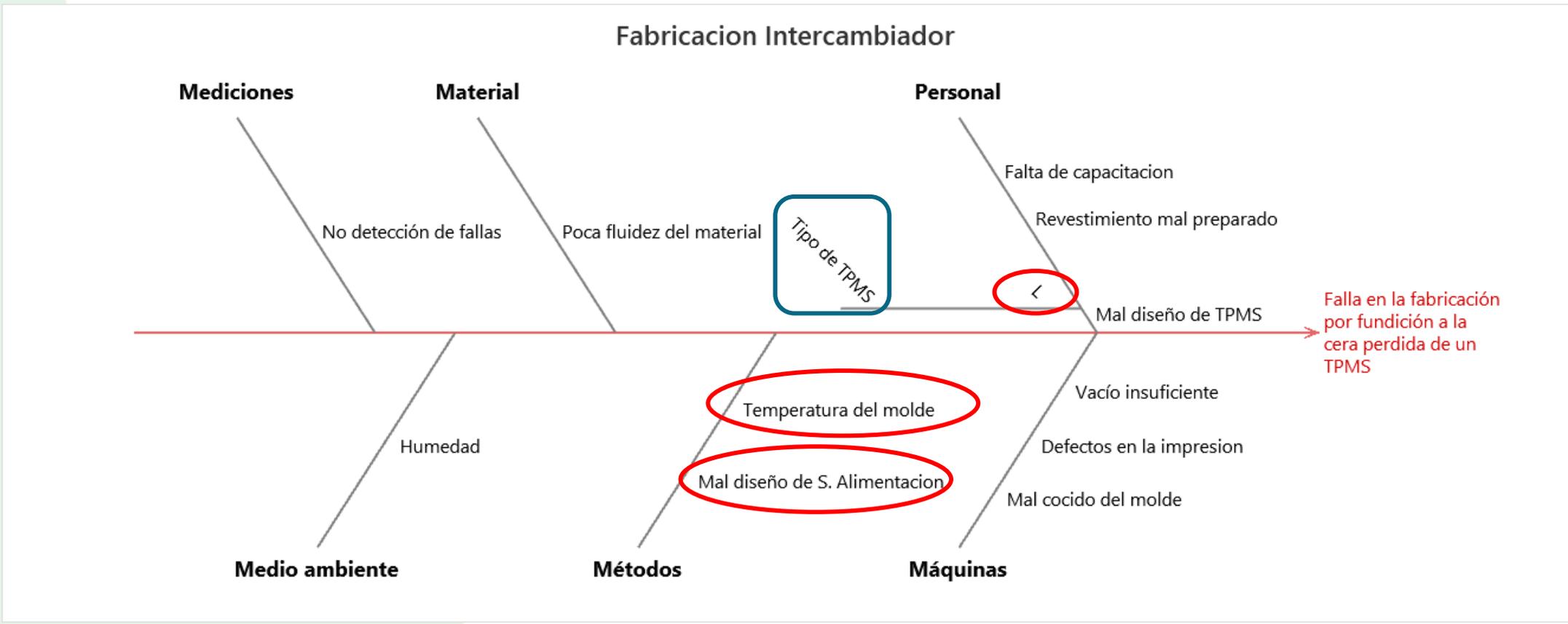
Diseño experimental y fabricación.

Análisis de Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Diagrama de Ishikawa



Visión general y antecedentes de la fabricación de estructuras TPMS

Elección del tipo de TPMS

Objetivos

Tipo	Primitiva	Giroide	Diamante
------	-----------	---------	----------

Longitud de celda unidad (L) = 5 mm

Área [mm^2]	13677	19181	23135
Volumen [mm^3]	13498	13495	13494

69,15% Mayor que la primitiva
20,61% Mayor que el Giroide

Longitud de celda unidad (L) = 10 mm

Área [mm^2]	7311	11001	13042
Volumen [mm^3]	13499	13499	13498

78,39% Mayor que la primitiva
18,55% Mayor que el giroide

Longitud de celda unidad (L) = 15 mm

Área [mm^2]	5208	8166	9568
Volumen [mm^3]	13500	13499	13499

83,71% Mayor que la primitiva
17,16% Mayor que el Giroide

Datos obtenidos de MeshLab

Se elige la TPMS tipo diamante

Conceptos básicos de fundición y el método a la cera perdida

Diseño experimental y fabricación.

Análisis de Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Diseño sistema de alimentación

Método del módulo

$$M = V/CS$$

V es el volumen de la fundación.

CS es la superficie de enfriamiento.

1. Térmicamente adecuado

$$M = k \times M_c$$

k se identifica como la relación de solidificación.
 M y M_c son los módulos del alimentador y de la fundición respectivamente.

2. Volumétricamente adecuado

$$V_f = V_c \times \left(\frac{\beta}{\eta - \beta} \right)$$

V_f y V_c son los volúmenes del alimentador y de las secciones de fundición que se alimentan,

β es la contracción de solidificación de la aleación

η es el factor de líquido de alimentación disponible, relativo a la eficiencia del alimentador y se determina empíricamente.

Visión general y antecedentes de la fabricación de estructuras TPMS

Objetivos

Conceptos básicos de fundición y el método a la cera perdida

Diseño experimental y fabricación.

Análisis de Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Diseño sistema de alimentación

Método del módulo modificado

Condición de volumétricamente adecuado

$$d^2 l \geq \frac{\beta}{\eta - \beta} V_s$$

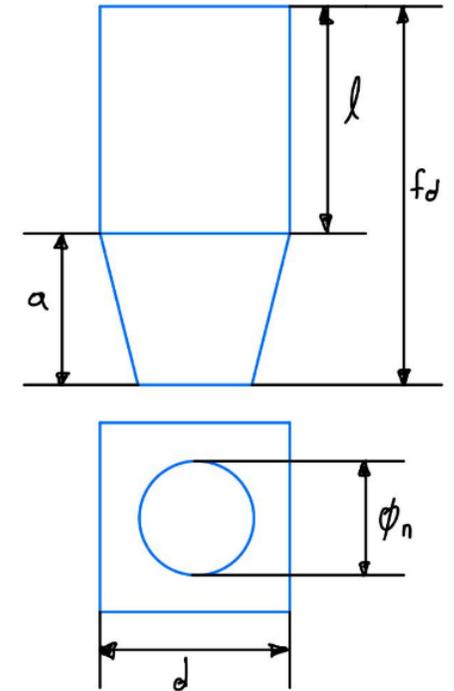
Según Prasad se debe cumplir para la longitud del alimentador que:

$$1.2S_a \geq l \geq 10S_a$$

S_a es la sección o superficie de apoyo del alimentador.

Se puede dividir la totalidad de la TPMS en partes iguales. Asumiendo n como el número de divisiones, el volumen de cada sección es $V_s = V_t/n$ siendo V_t el volumen total de la TPMS.

$$n_{min} = \frac{\gamma * V_t}{l * M_n^2}$$



Visión general y antecedentes de la fabricación de estructuras TPMS

“Las temperaturas de precalentamiento varían en función de la configuración de la pieza y de la aleación a fundir. Los rangos más comunes son: 150 a 540 °C (300 a 1000 °F) para las aleaciones de aluminio.”
(Prasad,2012)

Objetivos

Factor	Niveles
Temperatura del molde	150 °C
	345 °C
	540 °C
Sistema de alimentación	n
	$3n/2$
	$n/2$
Longitud de la celda unidad	5 mm
	10 mm
	15 mm

Conceptos básicos de fundición y el método a la cera perdida

Diseño experimental y fabricación.

Análisis de Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Visión general y antecedentes de la fabricación de estructuras TPMS

Diseño experimental

Objetivos

Temperatura del molde	Numero de alimentadores	Longitud de celda unidad
150	1	5
150	0,75	10
150	0,5	15
345	1	10
345	0,75	15
345	0,5	5
540	1	15
540	0,75	5
540	0,5	10

Conceptos básicos de fundición y el método a la cera perdida

Diseño experimental y fabricación.

Análisis de Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Taguchi

Ortogonal L9, 3 factores, 3 niveles. 2 réplicas.

ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



Diseño y fabricación.

Visión general y antecedentes de la fabricación de estructuras TPMS

Diseño computacional.

Objetivos

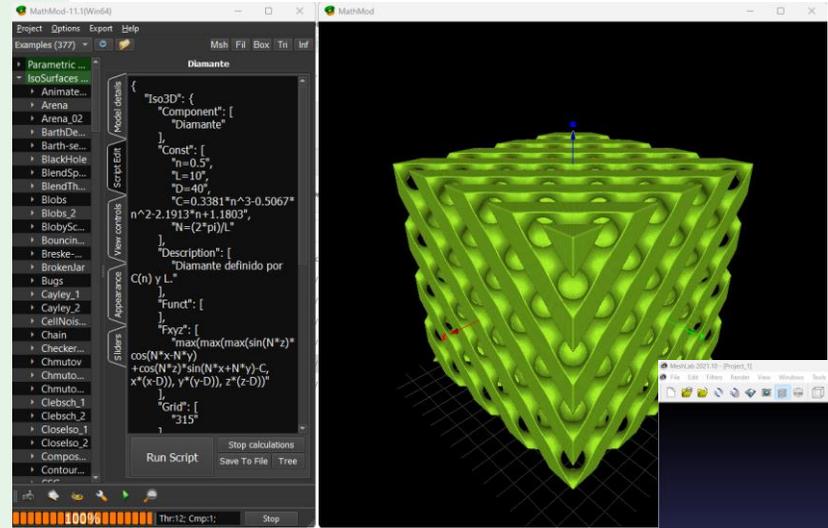
Conceptos básicos de fundición y el método a la cera perdida

Diseño experimental y fabricación.

Análisis de Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

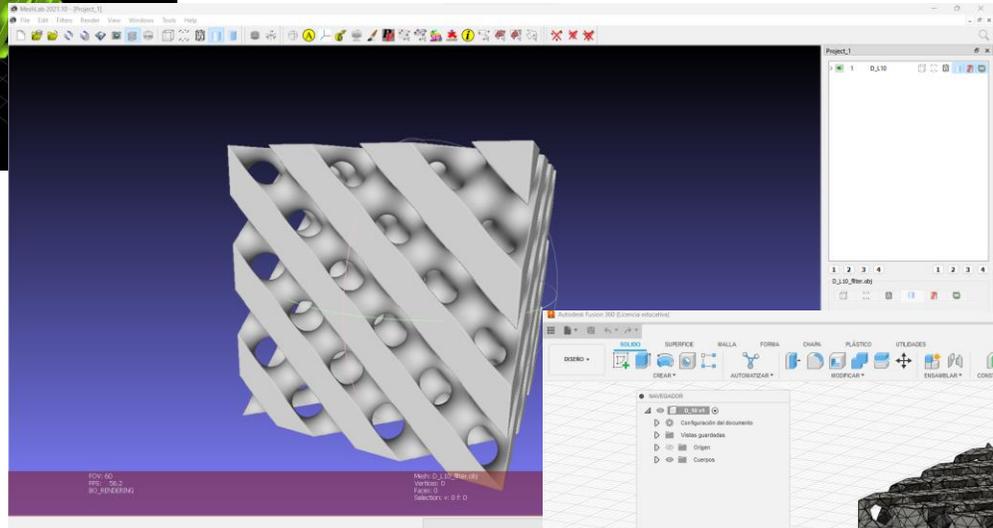


MathMod

Obtener una malla de la TPMS

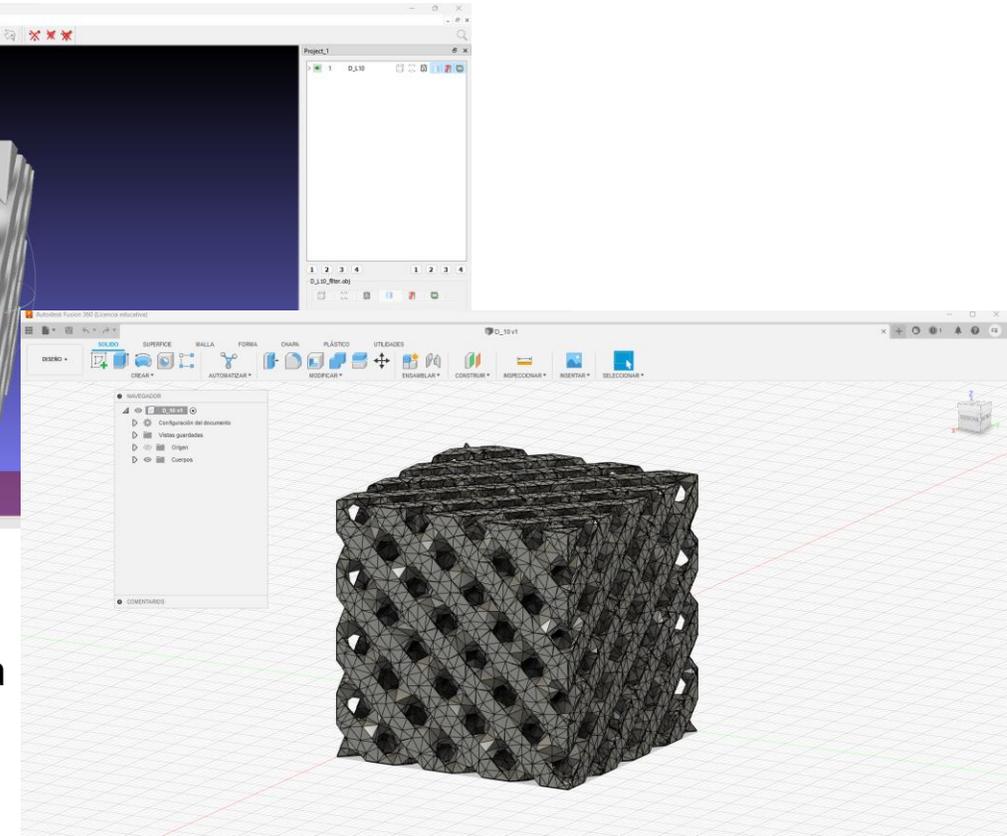
MeshLab

Refinar la malla, cerrar agujeros, etc.



Fusion 360

Convertir una malla en un sólido



Visión general y antecedentes de la fabricación de estructuras TPMS

Objetivos

Conceptos básicos de fundición y el método a la cera perdida

Diseño experimental y fabricación.

Análisis de Resultados

Conclusiones

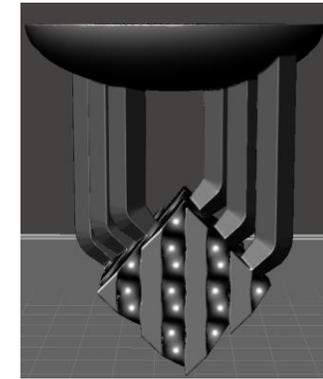
Recomendaciones

Número de alimentadores.

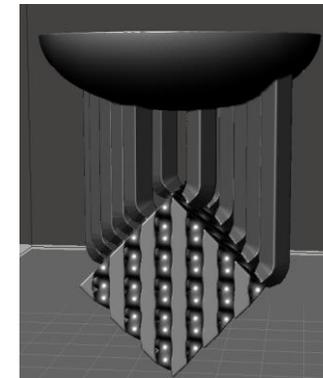
L15		
	Numero de alimentadores	V_f/V_s
n	6	0.66
$2n/3$	5	0.55
$n/2$	3	0.33

L10		
	Numero de alimentadores	V_f/V_s
n	12	0.78
$2n/3$	9	0.58
$n/2$	6	0.39

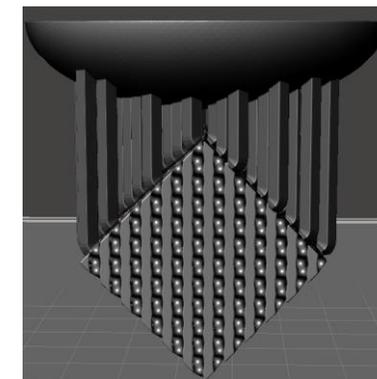
L5		
	Numero alimentadores	V_f/V_s
n	74	0.63
$2n/3$	54	0.48
$n/2$	36	0.32



L15
6 Alimentadores



L10
12 Alimentadores



L5
74 Alimentadores

Selección de material

Visión general y antecedentes de la fabricación de estructuras TPMS

Objetivos

Conceptos básicos de fundición y el método a la cera perdida

Diseño experimental y fabricación.

Análisis de Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Materiales	Conductividad térmica ($\frac{W}{m^{\circ}C}$)	Coefficiente de expansión térmica ($\frac{\mu strain}{^{\circ}C}$)	Índice de material $\frac{\lambda}{\alpha}$	Costo aprox.* \$/m³	Relación costo vs índice de material
Aleaciones de aluminio	162	23.3	6.95	6912	994.53
Aleaciones de magnesio	125	28	4.46	4484.04	1005.39
Aleaciones de zinc	129	29.3	4.40	28080	6381.82
Estaño	61.5	23.5	2.61	136510	52302.68
Zinc puro	125	28	4.46	19944	4471.75

Datos obtenidos de CES edupack

Visión general y antecedentes de la fabricación de estructuras TPMS

Objetivos

Conceptos básicos de fundición y el método a la cera perdida

Diseño experimental y fabricación.

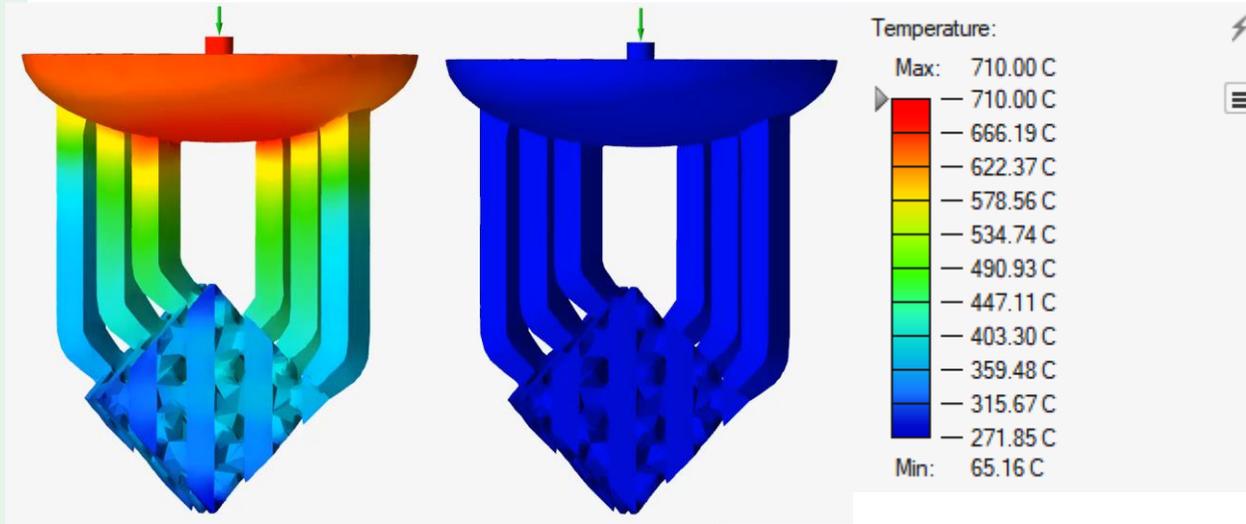
Análisis de Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

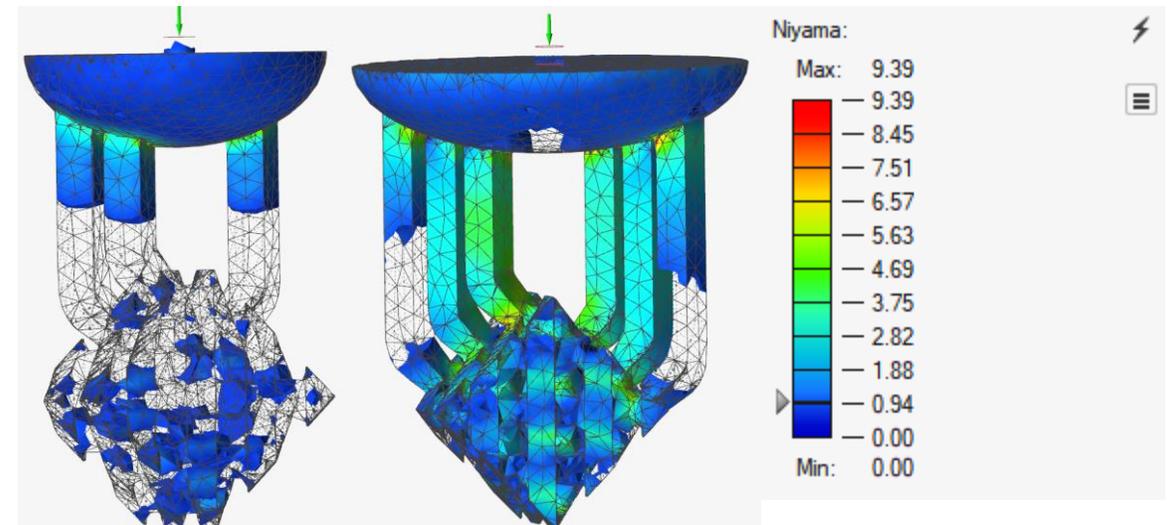
Simulación

Análisis de llenado y solidificación



Modelo L15 – 6A - 540 °C

Índice Niyama



Modelo L15 – 6A - 540 °C

Condiciones de simulación:

Temperatura de vertido: 710 °C

Radio de la entrada del material: 2.6 mm

Altura de la cuchara de fundición: 25 mm

Material: Aluminio

Visión general y antecedentes de la fabricación de estructuras TPMS

Objetivos

Conceptos básicos de fundición y el método a la cera perdida

Diseño experimental y fabricación.

Análisis de Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

	Volumen total	Velocidad
Modelo de fundición	de contracción	máxima del
	[mm^3]	metal [m/s]
<i>L5 – 72A – 150 °C.</i>	0,19	0,66
<i>L10 – 9A – 150 °C.</i>	21,17	0,67
<i>L15 – 3A – 150 °C.</i>	72,21	0,72
<i>L10 – 12A – 345 °C.</i>	0,29	0,83
<i>L15 – 5A – 345 °C.</i>	67,15	0,70
<i>L5 – 36A – 345 °C</i>	0	0,66
<i>L15 – 6A – 540 °C.</i>	0	1,14
<i>L5 – 54A – 540 °C.</i>	0	0,65
<i>L10 – 6A – 540 °C.</i>	52,29	0,68

Máximo valor de contracción:
72,21 mm^3 del volumen de cntracción

Máxima velocidad del metal:
1,14 m/s
Una velocidad alta que pueda provocar erosión del metal es por encima de 30 m/s .

Proceso de fabricación

Visión general y antecedentes de la fabricación de estructuras TPMS

Objetivos

Conceptos básicos de fundición y el método a la cera perdida

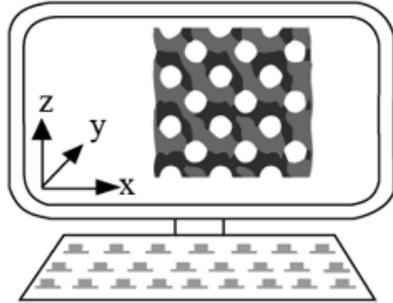
Diseño experimental y fabricación.

Análisis de Resultados

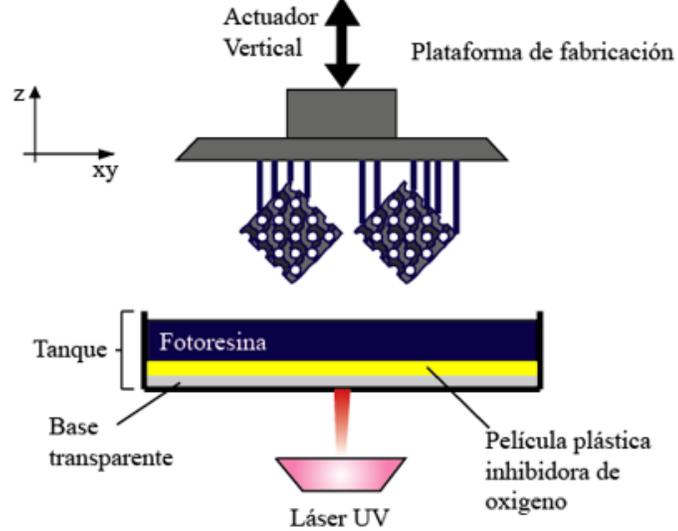
Conclusiones

Recomendaciones

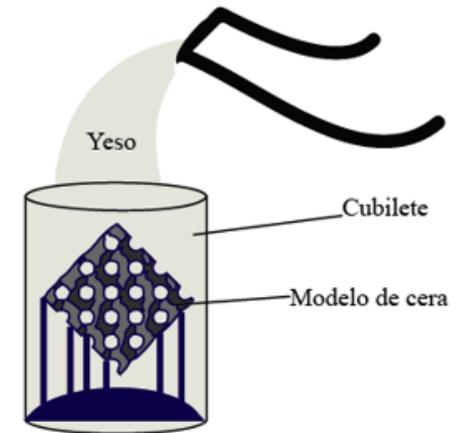
Diseño de los modelos



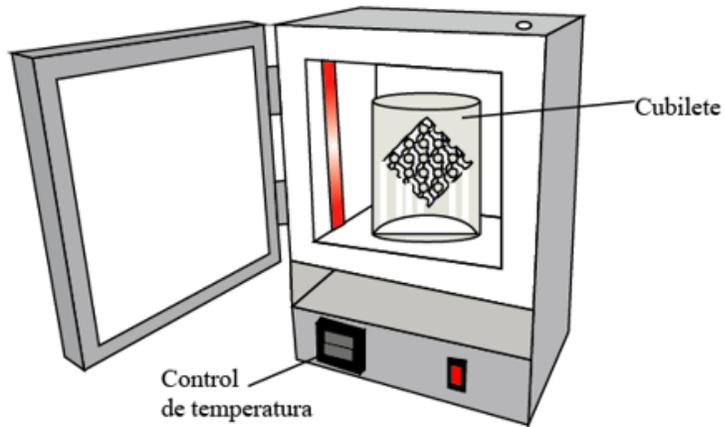
Fabricación de modelos de cera



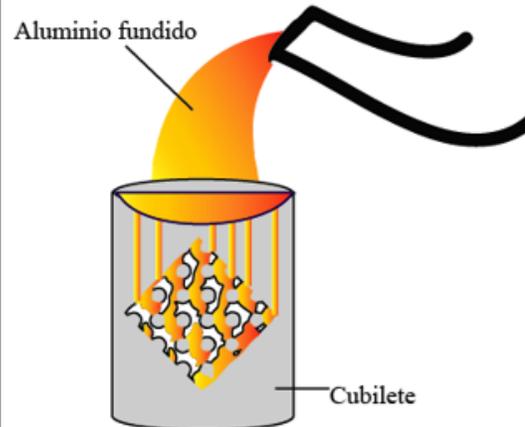
Fabricación del molde



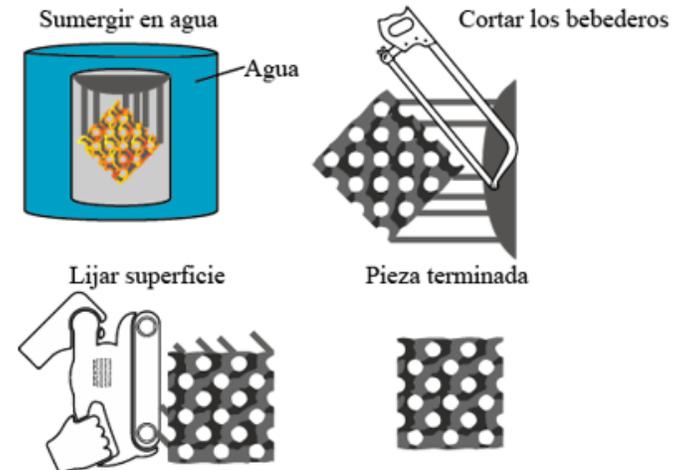
Desparafinado y quemado del molde



Fundido y vertido del metal



Recuperación de la pieza y post procesamiento



Pruebas de funcionamiento

Visión general y antecedentes de la fabricación de estructuras TPMS

Objetivos

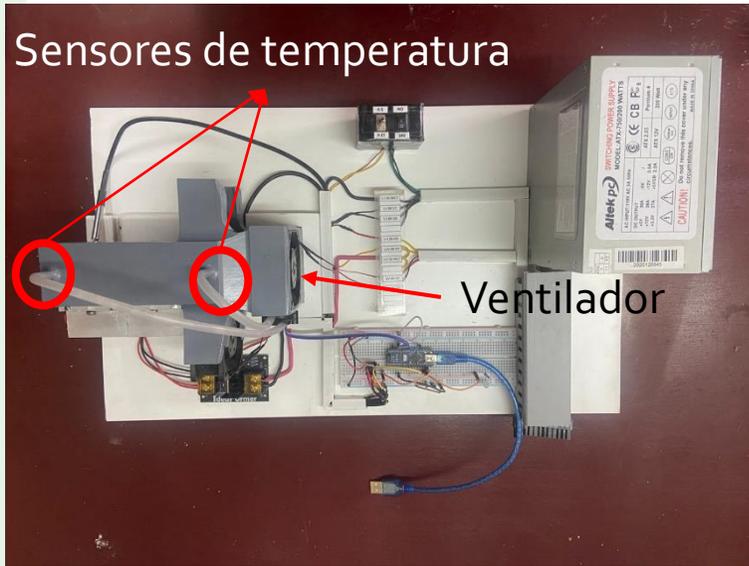
Conceptos básicos de fundición y el método a la cera perdida

Diseño experimental y fabricación.

Análisis de Resultados

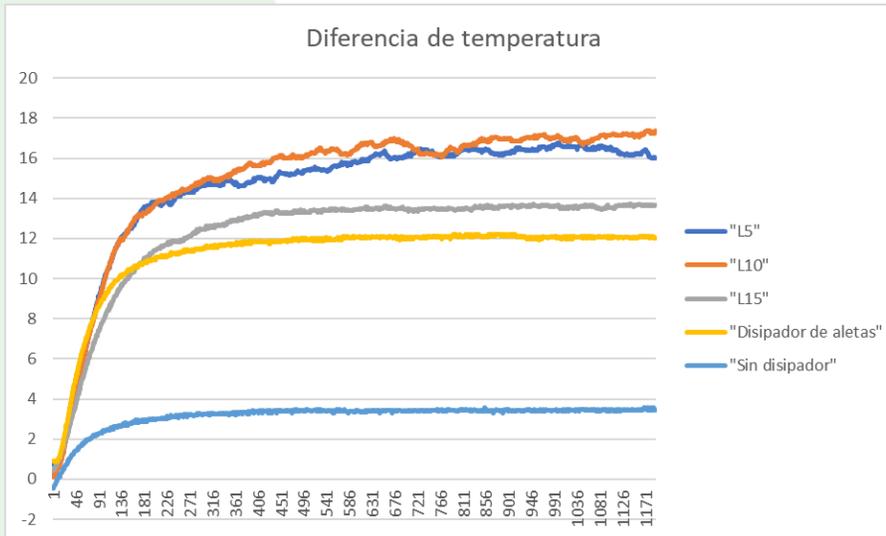
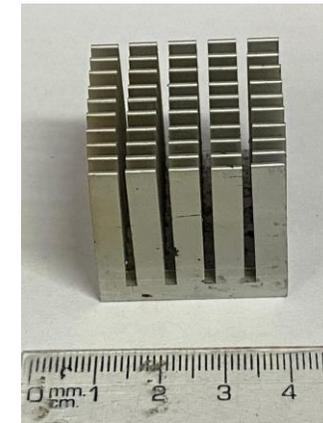
Conclusiones

Recomendaciones



Velocidad del aire: 2.5 m/s

Temperatura de la base: 50 °C



Pieza	Máxima diferencia de temperatura [°C]	Diferencia de temperatura promedio en estado estable [°C]
-------	---------------------------------------	---

Sin pieza	3.57	3.44
------------------	------	------

Disipador de aletas	12.19	12.09
----------------------------	-------	-------

TPMS L15	13.94	13.65
-----------------	-------	-------

TPMS L10	17.38	16.98
-----------------	-------	-------

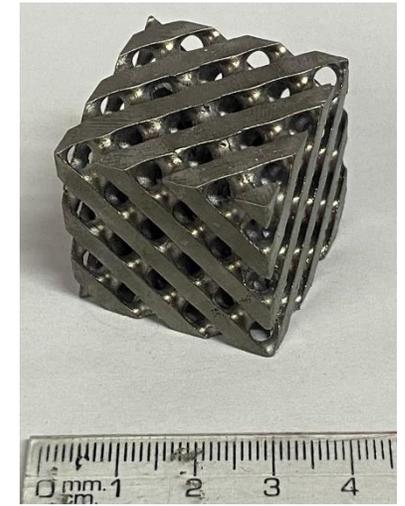
TPMS L5	17	16.33
----------------	----	-------



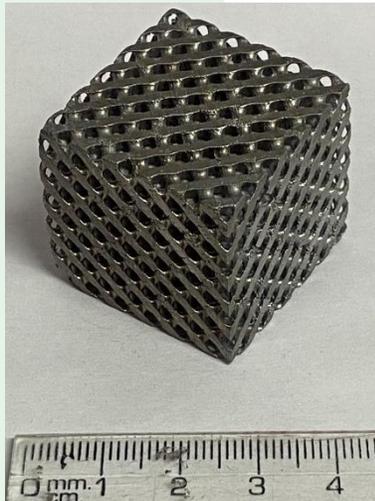
Análisis de resultados

Calidad superficial

- 1 – Presenta superficies incompletas
- 2 – Superficie con mucha porosidad superficial y la presenta porosidades profundas
- 3 – Superficie con mucha porosidad superficial
- 4 – Superficie con una cantidad moderada de porosidad superficial
- 5 – Presenta poco o ningún defecto de porosidad superficial



*L10 – 9A – 150 °C
Calificación: 5*



*L5 – 72A – 150 °C
Calificación: 4*



*L15 – 5A – 345 °C
Calificación: 3*



*L15 – 6A – 540 °C
Calificación: 2*



*L15 – 6A – 540 °C
Calificación: 1*

Visión general y antecedentes de la fabricación de estructuras TPMS

Objetivos

Conceptos básicos de fundición y el método a la cera perdida

Diseño experimental y fabricación.

Análisis de Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Calidad superficial

Visión general y antecedentes de la fabricación de estructuras TPMS

Objetivos

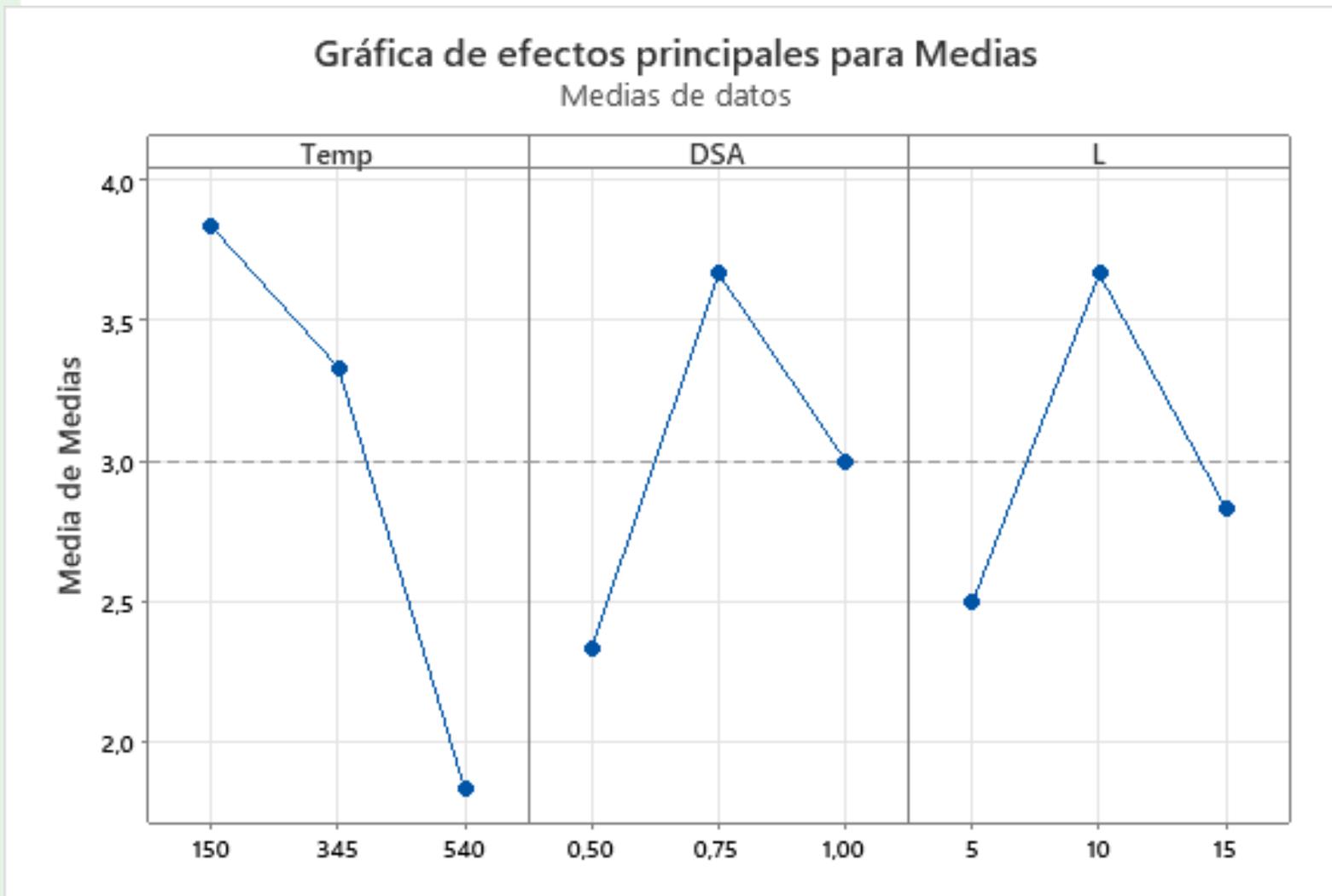
Conceptos básicos de fundición y el método a la cera perdida

Diseño experimental y fabricación.

Análisis de Resultados

Conclusiones

Recomendaciones



Nivel	Temp	DSA	L
1	3,833	2,333	2,500
2	3,333	3,667	3,667
3	1,833	3,000	2,833
Delta	2,000	1,333	1,167
Clasificar	1	2	3

La temperatura del molde afecta un 44,45%, el diseño del sistema del alimentador afecta un 29,62% y la longitud de la celda unidad afecta un 25,93%

Calidad superficial

Visión general y antecedentes de la fabricación de estructuras TPMS

Objetivos

Conceptos básicos de fundición y el método a la cera perdida

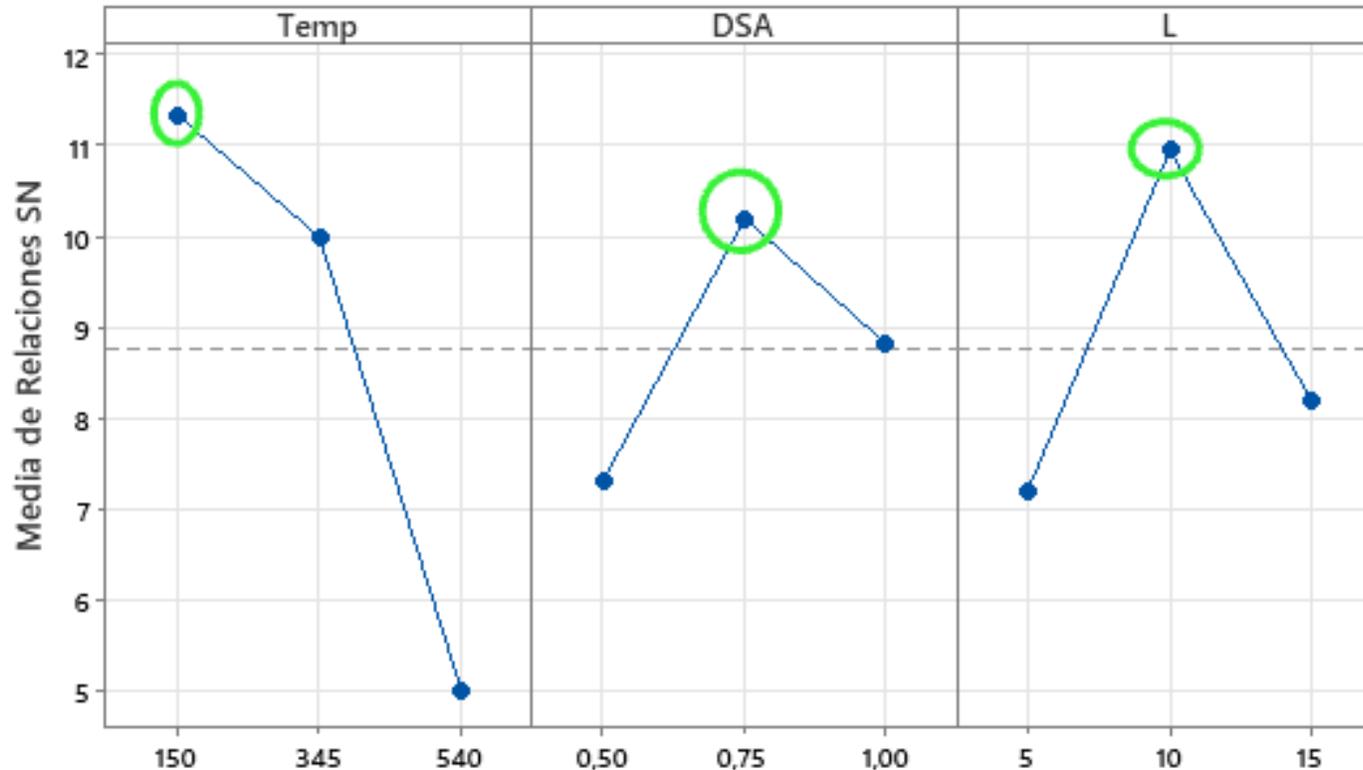
Diseño experimental y fabricación.

Análisis de Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Gráfica de efectos principales para Relaciones SN
Medias de datos



Señal a ruido: Más grande es mejor

Mejor configuración:

Temperatura del molde :150 °C

Número de alimentadores: 75% del n calculado

Longitud de celda unidad: 10 mm

Peso de los intercambiadores

Visión general y antecedentes de la fabricación de estructuras TPMS

Objetivos

Conceptos básicos de fundición y el método a la cera perdida

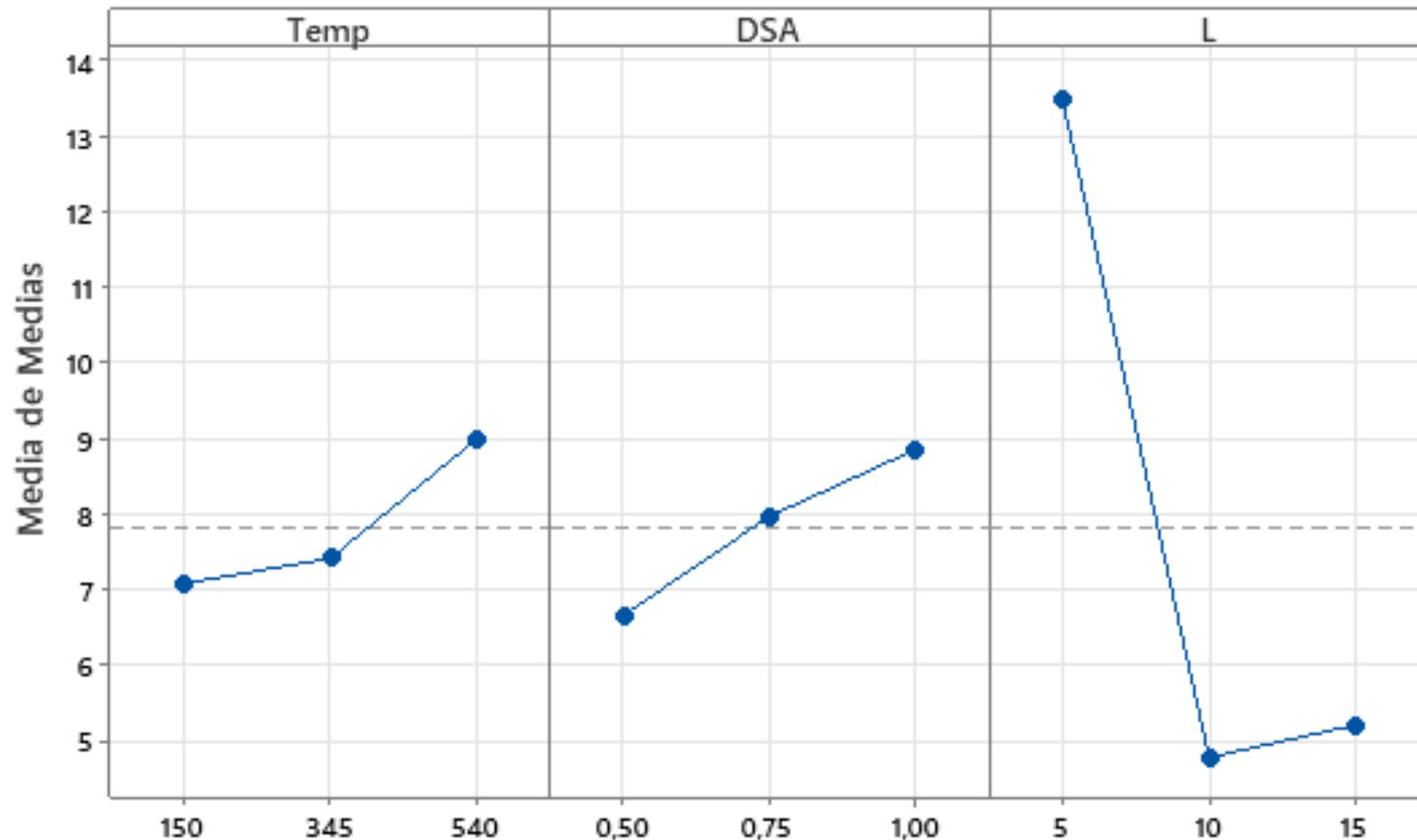
Diseño experimental y fabricación.

Análisis de Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Gráfica de efectos principales para Medias
Medias de datos



Nivel	Temp	DSA	L
1	7,079	6,665	13,498
2	7,415	7,970	4,782
3	8,997	8,855	5,210
Delta	1,919	2,190	8,716
Clasificar	3	2	1

La temperatura del molde afecta un 14,96%, el diseño del sistema del alimentador afecta un 17,08% y la longitud de la celda unidad afecta un 67,96%

Peso de los intercambiadores

Visión general y antecedentes de la fabricación de estructuras TPMS

Objetivos

Conceptos básicos de fundición y el método a la cera perdida

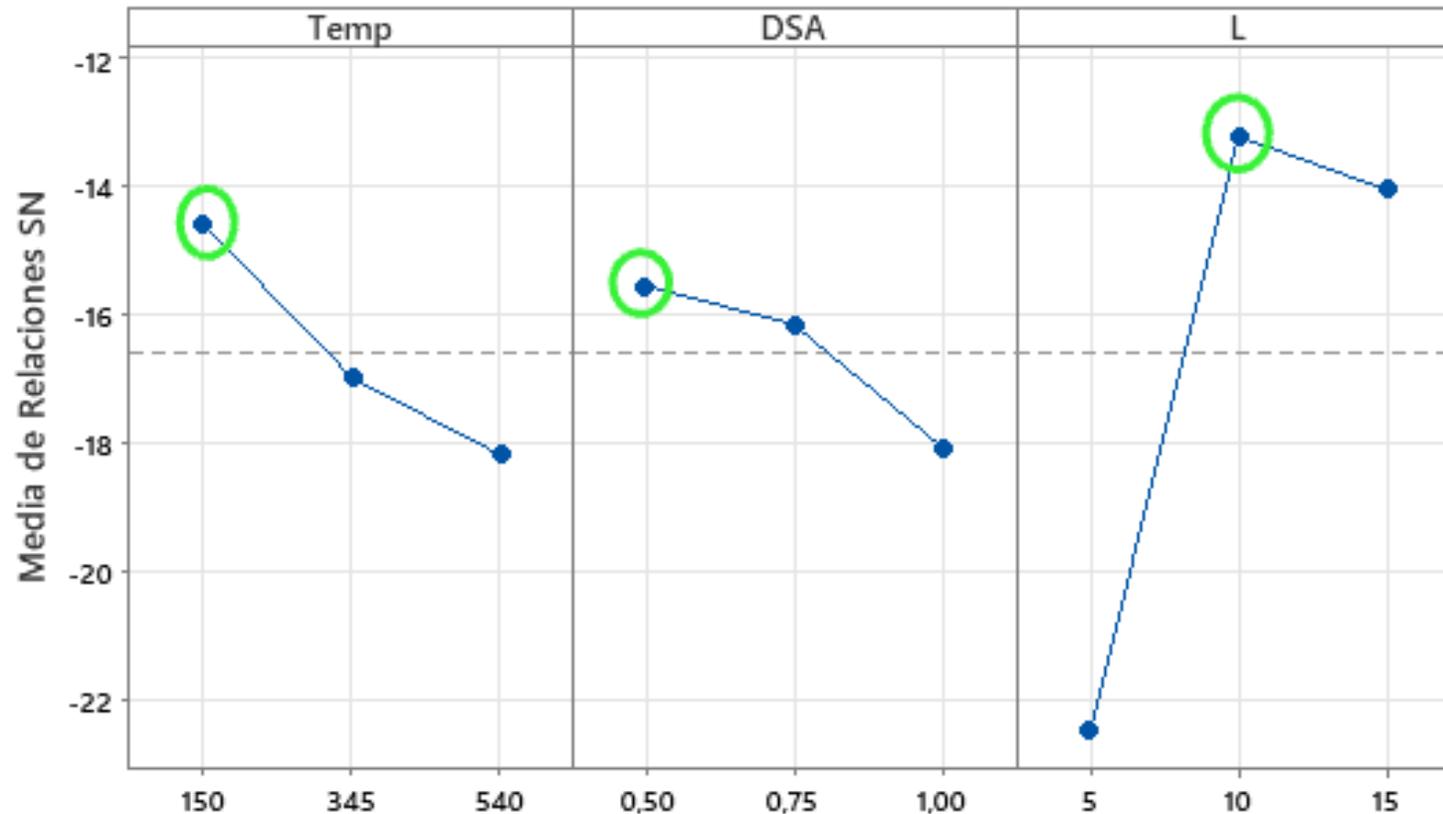
Diseño experimental y fabricación.

Análisis de Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Gráfica de efectos principales para Relaciones SN
Medias de datos



Señal a ruido: Más pequeño es mejor

Mejor configuración:

Temperatura del molde :150 °C

Número de alimentadores: 50% del n calculado

Longitud de celda unidad: 10 mm

Defectos superficiales

Visión general y antecedentes de la fabricación de estructuras TPMS

Objetivos

Conceptos básicos de fundición y el método a la cera perdida

Diseño experimental y fabricación.

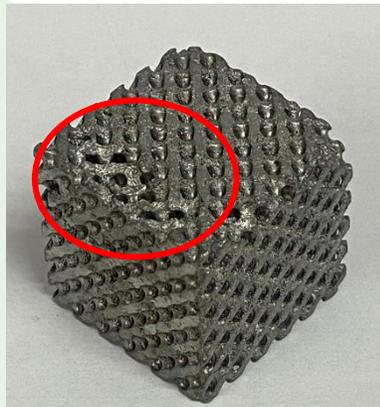
Análisis de Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Porosidad por gas:

- Demasiada turbulencia durante el vertido.
- Temperatura demasiado elevada del metal y/o de la cubilete.
- Metal contaminado con gas.
- Mal quemado del molde.



Aletas en los bordes

- El revestimiento ha absorbido humedad antes de la preparación de la pasta.
- Temperatura de quemado demasiado alta.
- El matraz se ha manipulado incorrectamente o se ha caído.
- Los matraces no se han mantenido a temperatura de quemado el tiempo suficiente.



Porosidad

Visión general y antecedentes de la fabricación de estructuras TPMS

Objetivos

Conceptos básicos de fundición y el método a la cera perdida

Diseño experimental y fabricación.

Análisis de Resultados

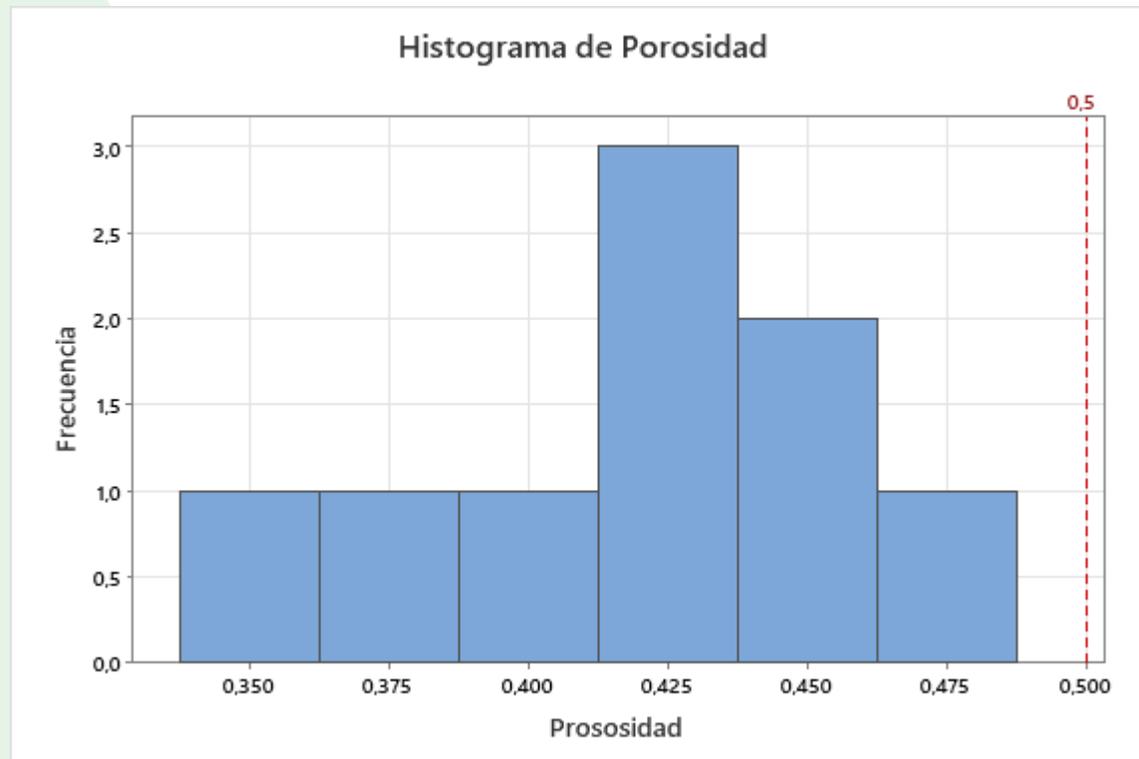
Conclusiones

Recomendaciones

N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media	IC de 95% para μ
9	0,4196	0,0444	0,0148	(0,3855; 0,4537)

Hipótesis nula	$H_0: \mu = 0,5$
Hipótesis alterna	$H_1: \mu \neq 0,5$
Valor T	Valor p
-5,44	0,001

La porosidad de las piezas no es igual a 0.5.



Capacidad de proceso

Visión general y antecedentes de la fabricación de estructuras TPMS

Objetivos

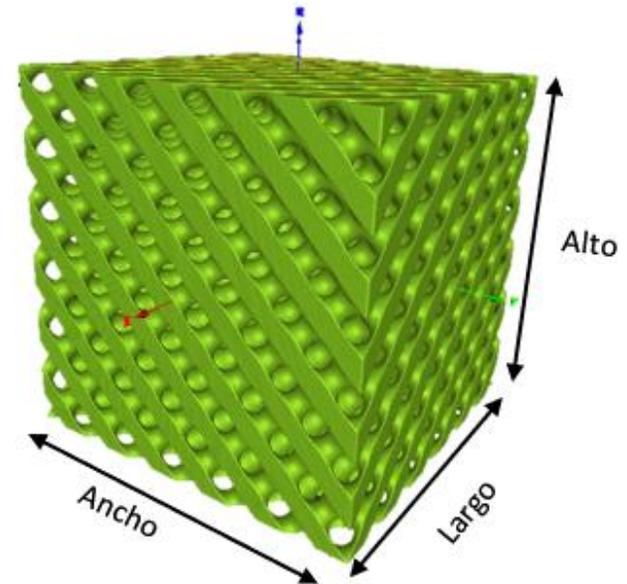
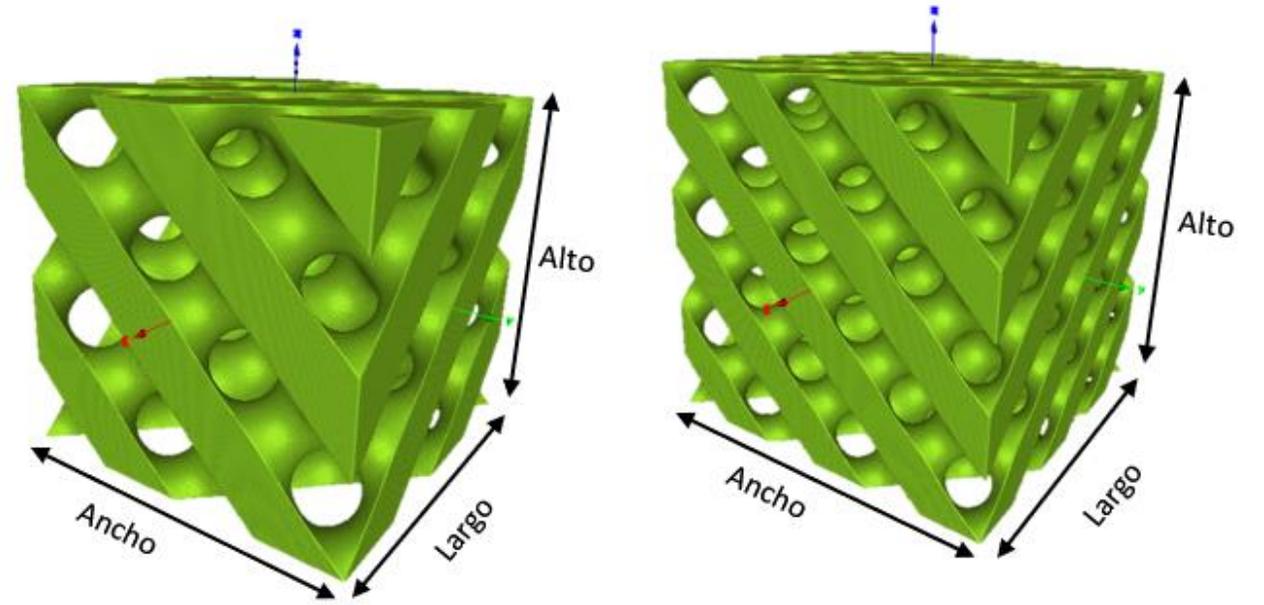
Conceptos básicos de fundición y el método a la cera perdida

Diseño experimental y fabricación.

Análisis de Resultados

Conclusiones

Recomendaciones



Capacidad de proceso

Visión general y antecedentes de la fabricación de estructuras TPMS

Objetivos

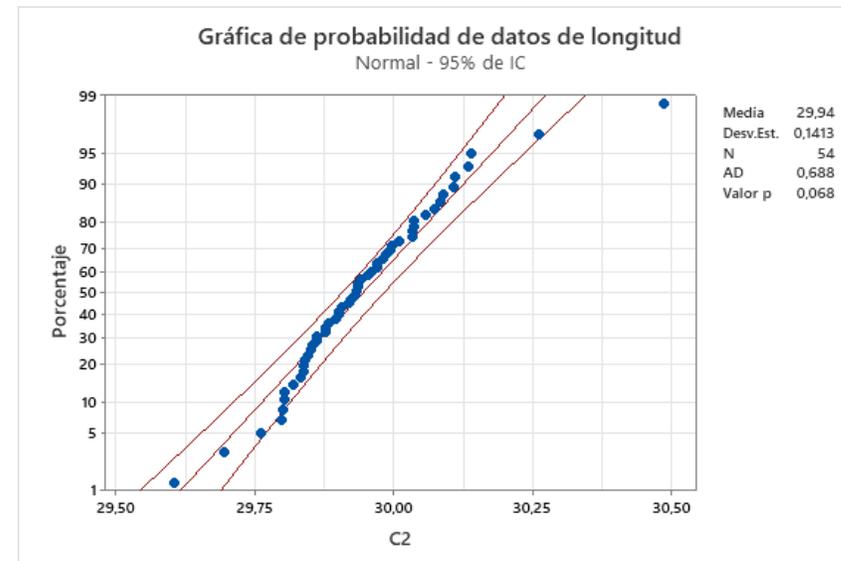
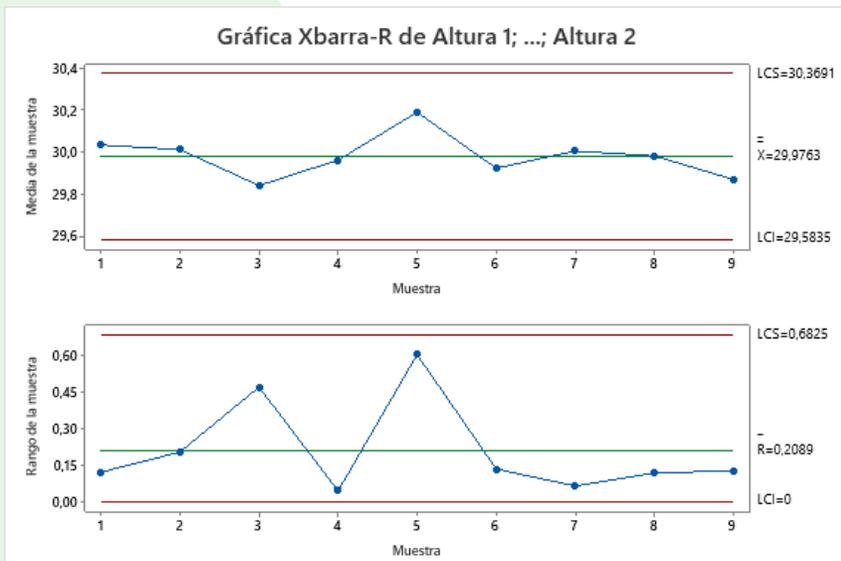
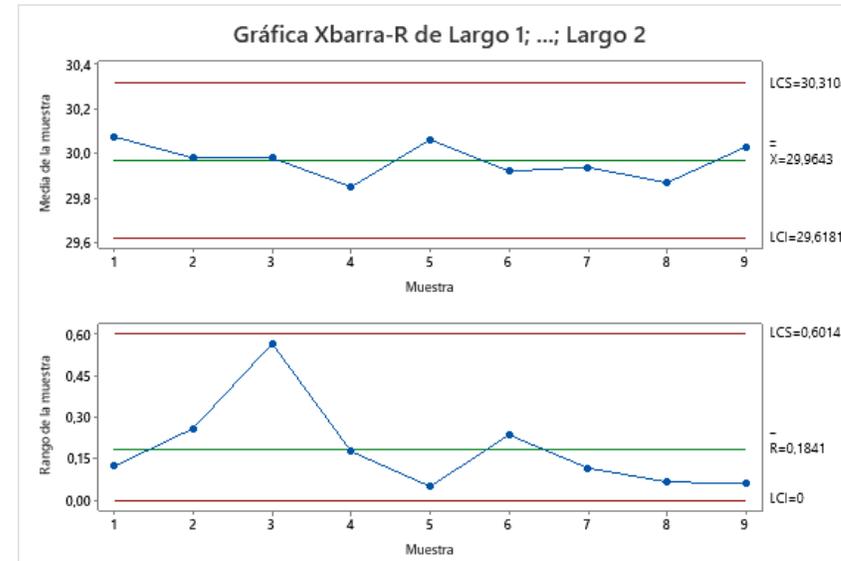
Conceptos básicos de fundición y el método a la cera perdida

Diseño experimental y fabricación.

Análisis de Resultados

Conclusiones

Recomendaciones



Visión general y antecedentes de la fabricación de estructuras TPMS

Objetivos

Conceptos básicos de fundición y el método a la cera perdida

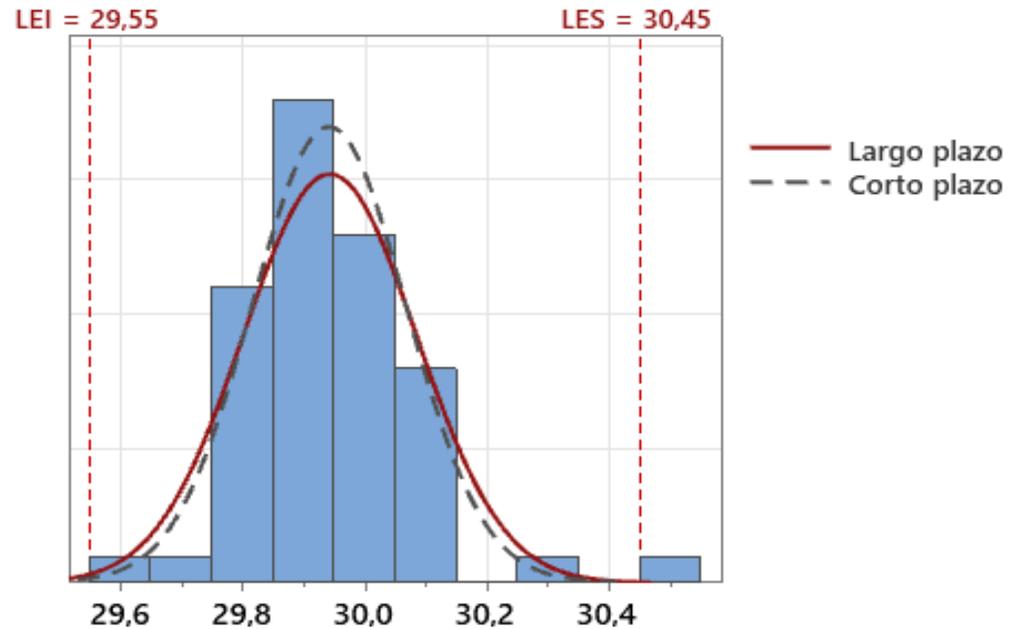
Diseño experimental y fabricación.

Análisis de Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Informe de la capacidad de proceso



Partes defectuosas por millón en total:

$PPM = 961.96.$

Índice $C_p = 1.19$

El proceso de fabricación tiene una capacidad potencial parcialmente adecuada y requiere de un control estricto de sus variables

Índice $C_{pk} = 1.04$

La media del proceso es ligeramente descentrada por lo que se recomienda que se realicen acciones para optimizar su centrado.

Índice de centrado del proceso $K = -13.33\%$

El proceso está descentrado ligeramente hacia la izquierda, pero al no ser mayor que el 20% se considera un proceso adecuado.

Comparación con otros métodos.

Visión general y antecedentes de la fabricación de estructuras TPMS

Objetivos

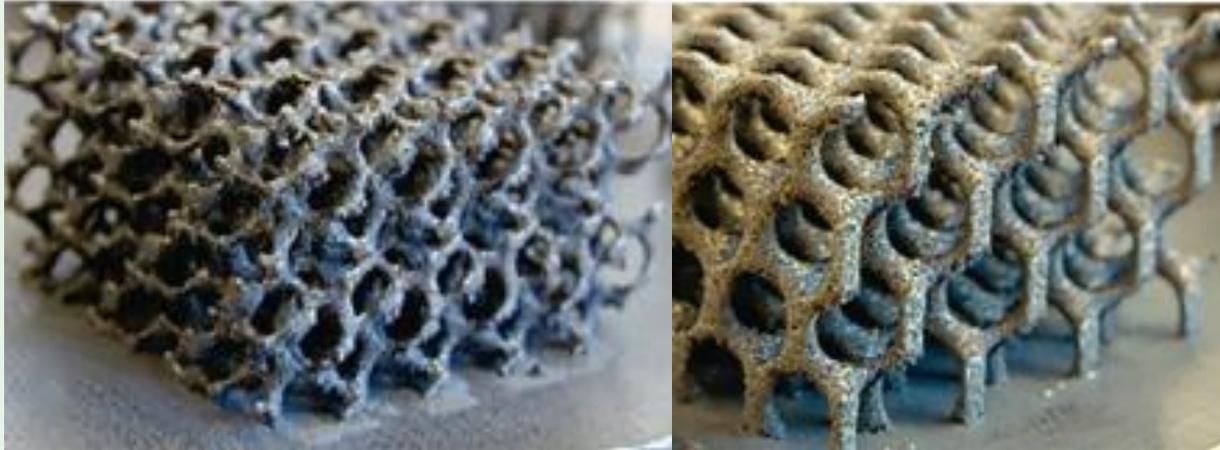
Conceptos básicos de fundición y el método a la cera perdida

Diseño experimental y fabricación.

Análisis de Resultados

Conclusiones

Recomendaciones



(Yan et al., 2021b)

Sinterización Directa de Metal con Láser



Fundición en arena

(Walker et al., 2018)

Visión general y antecedentes de la fabricación de estructuras TPMS

Objetivos

Conceptos básicos de fundición y el método a la cera perdida

Diseño experimental y fabricación.

Análisis de Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Conclusiones

- Se logró crear un modelo CAD a partir de un archivo de malla, lo que permitió una mayor precisión y detalle en el diseño del objeto. Además, se agregaron con éxito los alimentadores necesarios para la fundición por cera perdida, lo que asegura un proceso de fabricación fluido y eficiente. Esto permitió una mayor precisión en la fabricación de la TPMS.
- Se logró desarrollar una guía de trabajo para la fundición a la cera perdida que incluye la selección de materiales y el establecimiento de las mejores condiciones para la fundición de piezas utilizando un enfoque de diseño experimental. Esta guía proporciona un proceso estandarizado para garantizar la calidad y precisión en la producción de TPMS, lo que es esencial para la eficiencia en la producción. Este avance permitirá una mayor confiabilidad en la producción de TPMS y representa un importante avance en la tecnología de fundición por cera perdida.
- Para la impresión de piezas para realizar fundición en cera perdida es mejor utilizar resinas con menor cantidad de cera y mayor estabilidad dimensional para garantizar una mayor precisión en las dimensiones de la pieza final. Además, se ha observado que el postprocesado de estas piezas impresas es prácticamente nulo, lo que resulta en una mayor eficiencia y rapidez en el proceso productivo. Se recomienda seguir las instrucciones del fabricante para obtener los mejores resultados con esta tecnología.

Visión general y antecedentes de la fabricación de estructuras TPMS

Objetivos

Conceptos básicos de fundición y el método a la cera perdida

Diseño experimental y fabricación.

Análisis de Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Conclusiones

- El proceso de fabricación de estructuras TPMS ha mostrado resultados muy positivos, especialmente con los niveles de los parámetros: temperatura de molde a 150°C, un 75% del número de alimentadores calculados y un tamaño de celda unidad de 10 mm. Aunque se han encontrado algunos defectos, se han obtenido buenos resultados con los otros dos tipos de estructuras. La investigación futura puede centrarse en mejorar el material del molde y el control de las variables del proceso para obtener estructuras con mejores características y mayor precisión en el proceso de fundición.
- En el proceso de fabricación se logró obtener una capacidad de proceso adecuada, pero debido al proceso artesanal utilizado, no se pudo mejorar aún más. Es necesario un control más estricto de los parámetros del proceso para mejorar la calidad del producto. Aunque el proceso está descentrado hacia la izquierda en un 13.33%, lo cual es aceptable, se sugiere tomar medidas para corregir el desvío.

Visión general y antecedentes de la fabricación de estructuras TPMS

Objetivos

Conceptos básicos de fundición y el método a la cera perdida

Diseño experimental y fabricación.

Análisis de Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Recomendaciones

- Se debería realizar la fundición del metal en un horno que permita controlar la temperatura de vertido.
- Se recomienda que el proceso de vertido sea por inyección a baja presión para controlar la velocidad de entrada del metal y reducir la turbulencia dentro del molde.
- Se debe lijar las superficies de la TPMS impresas en resina después de retirar los soportes para eliminar marcas que se verán reproducidas en la pieza fundida.
- Se recomienda realizar una investigación para obtener un molde más resistente y reducir la aparición del defecto de aletas en los bordes. (Previtali et al., 2008) reporta que se puede obtener mayor resistencia en los moldes añadiendo Carburo de boro a la pasta de recubrimiento.



**GRACIAS POR SU
ATENCIÓN**



¿Preguntas?



Referencias

Ashby, M. F. (2000). *Metal foams: A design guide*. Butterworth-Heinemann.

Feng, J., Fu, J., Yao, X., & He, Y. (2022). Triply periodic minimal surface (TPMS) porous structures: From multi-scale design, precise additive manufacturing to multidisciplinary applications. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 4(2), 022001. <https://doi.org/10.1088/2631-7990/ac5be6>

Markee, J., Gallagher, G., Alam, N., Almaleh, E., Cavins, M., & Sullivan, T. (2017). *Atlas of Casting Defects*. Investment Casting Institute Publication.

Yan, C., Hao, L., Yang, L., Hussein, A. Y., Young, P. G., Li, Z., & Li, Y. (2021b). Metal alloys uniform TPMS structures. En *Triply Periodic Minimal Surface Lattices Additively Manufactured by Selective Laser Melting* (pp. 39–130). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824438-8.00003-0>

Walker, J., Harris, E., Lynagh, C., Beck, A., Lonardo, R., Vuksanovich, B., Thiel, J., Rogers, K., Conner, B., & MacDonald, E. (2018). 3D Printed Smart Molds for Sand Casting. *International Journal of Metalcasting*, 12(4), 785–796. <https://doi.org/10.1007/s40962-018-0211-x>

Wadley, H. (2003). Fabrication and structural performance of periodic cellular metal sandwich structures. *Composites Science and Technology*, 63(16), 2331–2343. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(03\)00266-5](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(03)00266-5)