



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

Veintimilla Bautista, Fabricio

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

PhD. Lara Padilla, Hernán Vinicio

24 de febrero 2023

Fabricación de intercambiadores compactos usando el metodo de fundicion por cera perdida-Fabricio-Veintimilla-17022023

6% Similitudes  < 1% Texto entre comillas
 0% similitudes entre comillas
 1% Idioma no reconocido

Nombre del documento: Fabricacion de intercambiadores compactos usando el metodo de fundicion por cera perdida-Fabricio-Veintimilla-17022023.pdf
 ID del documento: ba65fcb58fa872d040d094f792c1c87545b105
 Tamaño del documento original: 943,2 ko

Depositante: DAVID CESAR LOZA MATOVELLE
 Fecha de depósito: 22/2/2023
 Tipo de carga: interface
 fecha de fin de análisis: 22/2/2023

Número de palabras: 29.332
 Número de caracteres: 183.625

Ubicación de las similitudes en el documento:



Fuentes principales detectadas

N°	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	 Idoc.pub Groover Cap10y11 Fundicion [1430qk0q24j] 4 fuentes similares	2%		Palabras idénticas : 2% (626 palabras)
2	 Idoc.pub Manual Fundicion A La Cera Perdida [zpnxp2rweglvj]	1%		Palabras idénticas : 1% (437 palabras)
3	 xdocs.club Cuestionario Fundicion Cap 10 - ID:5c0366d67bb51 1 fuente similar	< 1%		Palabras idénticas : < 1% (276 palabras)
4	 www.studocu.com Tema 3 - resumen tema 3 - Warning: TT: undefined function: 32... 1 fuente similar	< 1%		Palabras idénticas : < 1% (159 palabras)
5	 Efecto de la variación de fundentes y desgasificantes en la aleación de aluminio AK...	< 1%		Palabras idénticas : < 1% (100 palabras)

Fuentes con similitudes fortuitas

N°	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	 repositorio.espe.edu.ec Repositorio de la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE: E...	< 1%		Palabras idénticas : < 1% (16 palabras)
2	 support.minitab.com Gráfica de control - Minitab Workspace	< 1%		Palabras idénticas : < 1% (17 palabras)
3	 repositorio.unl.edu.co	< 1%		Palabras idénticas : < 1% (10 palabras)
4	 1library.co Parámetros en el proceso de fundición - Efecto de la temperatura de col...	< 1%		Palabras idénticas : < 1% (10 palabras)
5	 Obtención de piezas de aluminio mediante el proceso de colado con modelos de p...	< 1%		Palabras idénticas : < 1% (10 palabras)





Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Mecatrónica

Certificación

Certifico que el trabajo de integración curricular: **"Fabricación de intercambiadores compactos usando el método de fundición por cera perdida."** fue realizado por el señor **Veintimilla Bautista, Fabricio**, el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizada en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Sangolquí, 20 de febrero del 2023

Firma:



.....
Ing. Lara Padilla, Hernán Vinicio PhD

C. C: 0603247362



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica.
Carrera de Mecatrónica

Responsabilidad de Autoría

Yo, **Veintimilla Bautista, Fabricio**, con cédula de ciudadanía n° 1722402995, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de integración curricular: **Fabricación de intercambiadores compactos usando el método de fundición por cera perdida**, es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangoquí, 20 de febrero del 2023

Firma

Veintimilla Bautista, Fabricio

C.C.: 1722402995



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica.

Carrera de Mecatrónica

Autorización de Publicación

Yo **Veintimilla Bautista, Fabricio**, con cédula de ciudadanía n° 1722402995, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de integración curricular: **Fabricación de intercambiadores compactos usando el método de fundición por cera perdida** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi/nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 20 de febrero del 2023

Firma

Veintimilla Bautista, Fabricio

C.C: 172242995

Dedicatoria

A mis padres, quienes han sido la luz en mi camino, por su amor incondicional, por su apoyo incansable y por enseñarme a luchar por mis sueños. Sus enseñanzas y valores han sido fundamentales para llegar hasta aquí.

A mis hermanos, por ser mi pilar, mi apoyo emocional y por llenar mi vida de risas y alegría.

A mi pareja, por estar siempre a mi lado y por ayudarme a superar los obstáculos.

A mis amigos, por ser mi familia lejana, por ser mi refugio y por ayudarme a crecer como persona.

Este trabajo es el resultado de todo el amor y apoyo que ustedes me han brindado, es un homenaje a cada uno de ustedes, a mi familia y amigos, porque sin ustedes no hubiera sido posible. Les agradezco de todo corazón por ser parte de mi vida y por ayudarme a convertir este sueño en realidad.

Agradecimientos

A mi tutor de tesis, por ser mi guía en este proceso, por brindarme la orientación y el apoyo necesario para desarrollar este trabajo de tesis. Sin su ayuda, no hubiera sido posible llegar hasta aquí.

A mis compañeros de nota conceptual, por compartir su conocimiento y aportes valiosos en el desarrollo de la tesis, su colaboración fue fundamental.

A mi padre, por ayudarme incansablemente en todo momento, especialmente en las fundiciones realizadas hasta altas horas de la noche, su dedicación fue invaluable.

A la universidad, por brindarme la formación y conocimientos necesarios para llevar a cabo este trabajo.

Y a todas las personas que con sus recomendaciones y consejos ayudaron en la realización de este trabajo, les agradezco de corazón por su valiosa ayuda. Este trabajo es el resultado del esfuerzo y el trabajo en equipo, y no podría haber sido posible sin el apoyo y la colaboración de todos ustedes.

Índice de contenidos

Dedicatoria.....	6
Agradecimientos.....	7
Resumen	22
Abstract.....	23
Introducción	24
Visión general de las estructuras TPMS.	24
Superficies mínimas triplemente periódicas TPMS.....	24
Antecedentes de la fabricación de estructuras TPMS.....	26
El potencial del TPMS para la fabricación.....	26
Fabricación de estructuras celulares.....	27
Fabricación de estructuras periódicas.....	27
Objetivos del proyecto de tesis.....	29
Marco Teórico.....	30
Conceptos básicos sobre fundición.	30
La fundición de metales.....	30
Solidificación de metales	31
Metales puros.	31
Aleaciones.....	34
Efectos de las velocidades de enfriamiento.	35
Fluidez de los metales líquidos	35
Tiempo de solidificación	36

Procesos de fundición de metales	39
Calidad del fundido	42
Características de las estructuras TPMS.	44
El potencial del TPMS para la manufactura aditiva.....	44
Método de fundición a la cera perdida.....	46
Antecedentes del método de fundición a la cera perdida.	46
Diseño.....	47
Realización del modelo maestro.....	47
Alimentador	47
Función del bebedero de alimentación	47
Diseño del bebedero de alimentación.....	49
Fabricación del molde de caucho.....	49
Producción de los modelos de cera	51
Ceras de fundición	51
Patronaje de cera	53
Montaje del árbol.....	54
Bases y bebederos	54
Diseño de árboles	54
Revestir el molde.....	56
Frascos	56
Revestimientos	57
Mezclar el revestimiento.....	58

Técnica de revestimiento	58
Proceso de desparafinado.....	61
Quemado y vertido.....	63
El ciclo del quemado	63
Fundición de metal	65
Vertido del metal.....	67
Enfriamiento y recuperación de las piezas fundidas	68
Diseño y fabricación.....	69
Generación de modelo computacional de TPMS.....	69
Selección de materiales para intercambiadores TPMS.	70
Consideraciones para la fabricación de los intercambiadores TPMS	76
Procesamiento computacional de la TPMS	76
Diseño del sistema de alimentación	77
Orientación del sistema de alimentación	77
Proceso de diseño del sistema de alimentación.	79
Dimensionamiento de los elementos de alimentación	81
Temperatura del molde	84
Grosor de sección	85
Defectos de fundición	86
Diseño experimental	88
Defectos más incidentes en una mala calidad de fundido.....	88
Niveles de temperatura de vertido para el DOE	91

Niveles para el número de alimentadores para el DOE.....	92
Niveles de longitud de celda unidad de la TPMS para el DOE.....	93
Planteamiento del diseño experimental	95
Cálculo del número de alimentadores para cada tipo de TPMS	96
Número de alimentadores.....	96
Unión de alimentadores y estructura TPMS.....	101
Simulación de la fundición.	104
Convergencia de malla	113
Simulaciones de llenado y solidificación	115
Índice Niyama de la fundición	122
Proceso de fundición.	124
Impresión y post procesamiento de modelos TPMS.	125
Fabricación del molde de fundición.	128
Desencerado y calcinación de la resina.	134
Vertido y solidificación.....	139
Post procesamiento	144
Coste.....	146
Control de calidad.....	147
Pruebas de funcionamiento.....	147
Resultados y discusión	152
Análisis del diseño experimental de la fabricación del intercambiador compacto TPMS.	152
Calidad superficial	152

Peso de los intercambiadores	164
Defectos de fundición encontrados.....	168
Porosidad de las TPMS	171
Capacidad del proceso.....	174
Comparación del ancho del primer experimento y el segundo experimento	177
Comparación del largo del primer experimento y el segundo experimento.....	179
Comparación del largo del primer experimento y el segundo experimento.....	181
Cartas de control para las mediciones de longitud de las TPMS	183
Análisis de capacidad del proceso	187
Comparación con otros métodos.	188
Desafíos de la fabricación de intercambiadores compactos.	189
Conclusión y recomendaciones.....	190
Conclusiones	190
Recomendaciones	191
Bibliografía	192
Apéndices.....	197

Índice de tablas

Tabla 1 <i>Resumen de procesos de fundición</i>	40
Tabla 2 <i>Etapa de traducción del problema se selección de material para el intercambiador TPMS...</i>	72
Tabla 3 <i>Materiales preseleccionados para el intercambiador TPMS</i>	75
Tabla 4 <i>Defectos de fundición más comunes en cera perdida.</i>	86
Tabla 5 <i>Causas e incidencia en la fundición en la cera perdida.</i>	89
Tabla 6 <i>Área y volumen de estructuras TPMS</i>	94
Tabla 7 <i>Factores y niveles del diseño experimental.</i>	95
Tabla 8 <i>Diseño ortogonal de Taguchi L9 para fabricación de estructura TPMS.</i>	96
Tabla 9 <i>Número máximo de alimentadores que se pueden ubicar en cada estructura TPMS.</i>	97
Tabla 10 <i>Cálculo del número y dimensiones de los alimentadores para la TPMS con L=15.</i>	98
Tabla 11 <i>Cálculo del número y dimensiones de los alimentadores para la TPMS con L=10.</i>	99
Tabla 12 <i>Cálculo del número y dimensiones de los alimentadores para la TPMS con L=5.</i>	99
Tabla 13 <i>Número de alimentadores para el diseño experimental y su reducción de la relación de volumen de alimentador y sección de la pieza.</i>	100
Tabla 14 <i>Resultados del llenado disponibles con el software Inspire Cast.</i>	105
Tabla 15 <i>Resultados de solidificación/termomecánica disponibles con el software Inspire Cast.</i>	108
Tabla 16 <i>Resultados de volumen de contracción y velocidad máxima del metal obtenidos en la simulación con Inspire Cast.</i>	116
Tabla 17 <i>Graficas de regiones con valor del índice Niyama mayor a 1.</i>	122
Tabla 18 <i>Programa de quemado de la Resina Castable Wax 40.</i>	135
Tabla 19 <i>Programa de quemado de la Resina Castable Wax 40.</i>	137
Tabla 20 <i>Costos de fabricación de una TPMS.</i>	146
Tabla 21 <i>Máxima diferencia de temperatura medida y promedio de diferencia de temperatura medida en estado estable.</i>	151

Tabla 22 <i>Resultados de la fundición y calificación de la calidad superficial del primer experimento.</i>	153
Tabla 23 <i>Resultados de la fundición y calificación de la calidad superficial del segundo experimento.</i>	158
Tabla 24 <i>Tabla de respuesta para medias (calidad superficial).</i>	162
Tabla 25 <i>Tabla de respuesta para relaciones de señal a ruido (Calidad superficial). Más grande es mejor.</i>	163
Tabla 26 <i>Promedio de pesos medidos para cada pieza fundida del primer experimento.</i>	165
Tabla 27 <i>Promedio de pesos medidos para cada pieza fundida del segundo experimento.</i>	166
Tabla 28 <i>Tabla de respuesta para medias de peso de los intercambiadores.</i>	166
Tabla 29 <i>Tabla de respuesta para relaciones de señal a ruido del peso de los intercambiadores. Más pequeño es mejor.</i>	167
Tabla 30 <i>Errores encontrados en la piezas fundidas.</i>	168
Tabla 31 <i>Medidas de volumen y porosidad de las estructuras TPMS.</i>	172
Tabla 32 <i>Estadísticas descriptivas para la porosidad de las TPMS.</i>	172
Tabla 33 <i>Prueba de hipótesis para la porosidad de las TPMS.</i>	173
Tabla 34 <i>Medidas de las longitudes y error porcentual de las TPMS fundidas en el primer experimento.</i>	175
Tabla 35 <i>Medidas de las longitudes y error porcentual de las TPMS fundidas en el primer experimento.</i>	176
Tabla 36 <i>Estadísticas descriptivas de las medidas del ancho de las TPMS.</i>	177
Tabla 37 <i>Prueba t de 2 muestras de las medidas del ancho de las TPMS.</i>	178
Tabla 38 <i>Estimación de la diferencia de las medidas del ancho de las TPMS.</i>	178
Tabla 39 <i>Estadísticas descriptivas de las medidas del largo de las TPMS</i>	180
Tabla 40 <i>Estimación de la diferencia de las medidas del largo de las TPMS.</i>	180
Tabla 41 <i>Prueba de hipótesis de las medidas del largo de las TPMS.</i>	180

Tabla 42 <i>Estadísticas descriptivas las medidas del alto de las TPMS.</i>	182
Tabla 43 <i>Estimación de la diferencia las medidas del alto de las TPMS.</i>	182
Tabla 44 <i>Prueba de hipótesis de las medidas del alto de las TPMS.</i>	182

Índice de figuras

Figura 1 <i>Celda unitaria de TPMS</i>	25
Figura 2 <i>(a) Temperatura como función del tiempo de solidificación de metales puros. (b) Densidad, como función del tiempo</i>	32
Figura 3 <i>Esquema de 3 estructuras de metales fundidos solidificados en un molde cuadrado</i>	33
Figura 4 <i>Desarrollo de una textura preferida en una pared fría del molde</i>	33
Figura 5 <i>Esquema de solidificación de una aleación y distribución de la temperatura en el metal que se solidifica</i>	34
Figura 6 <i>Ilustración esquemática de tres regímenes de contracción</i>	38
Figura 7 <i>Fases de contracción durante la solidificación</i>	39
Figura 8 <i>Defectos comunes de los fundidos</i>	43
Figura 9 <i>Porosidad de contracción en una sección transversal: la forma dendrítica es evidente</i>	48
Figura 10 <i>Modelo puesto entre dos láminas de goma lista para vulcanizar</i>	50
Figura 11 <i>Modelo de cera producido por inyección en un molde de goma</i>	50
Figura 12 <i>Base de goma utilizado en la producción de joyas</i>	54
Figura 13 <i>Árbol de fundición</i>	55
Figura 14 <i>Cilindros o cubiletes utilizados en la fundición por cera perdida de molde solido</i>	57
Figura 15 <i>Evidencia de la penetración de la cera en la porosidad del revestimiento durante el desparafinado en seco (halos más pálidos)</i>	62
Figura 16 <i>Aletas en anillos de fundición, causadas por grietas en el revestimiento</i>	63
Figura 17 <i>Superficie arenosa en una pieza de fundición, causada por el desmoronamiento del revestimiento durante fundición</i>	64
Figura 18 <i>TPMS tipo diamante con L (longitud de celda unidad) diferente: a) L=5, b) L=10, c) L=15</i> ..	70
Figura 19 <i>TPMS tipo diamante con n (porosidad) diferente: a) n=0.2, b) n=0.5, c) n=0.8</i>	70
Figura 20 <i>Gráfico de conductividad térmica vs. Coeficiente de expansión térmica materiales aplicando filtros de colabilidad y temperatura de fusión menor a 1000 °C</i>	75

Figura 21 <i>Fases principales del proceso de fabricación.</i>	76
Figura 22 <i>TPMS con orientación a 0°.</i>	77
Figura 23 <i>TPMS con orientación a 45°.</i>	78
Figura 24 <i>Forma y dimensiones del alimentador para la fundición.</i>	82
Figura 25 <i>Defecto de aleta</i>	86
Figura 26 <i>Defecto de poros superficiales</i>	86
Figura 27 <i>Defecto de desgarre en caliente</i>	87
Figura 28 <i>Defecto de inclusión no metálica</i>	87
Figura 29 <i>Defecto de Misrun.</i>	87
Figura 30 <i>Defecto de distorsión de la fundición.</i>	88
Figura 31 <i>Defecto de escoria.</i>	88
Figura 32 <i>Grafica de pastel de las Causas más comunes de defectos en la fundición a la cera perdida.</i>	90
Figura 33 <i>Diagrama de Ishikawa para la fabricación de estructuras TPMS.</i>	93
Figura 34 <i>TPMS con L=15 y 6 alimentadores.</i>	102
Figura 35 <i>TPMS con L=15 y 5 alimentadores.</i>	102
Figura 36 <i>TPMS con L=15 y 3 alimentadores.</i>	102
Figura 37 <i>TPMS con L=10 y 12 alimentadores.</i>	102
Figura 38 <i>TPMS con L=10 y 9 alimentadores.</i>	103
Figura 39 <i>TPMS con L=10 y 6 alimentadores.</i>	103
Figura 40 <i>TPMS con L=5 y 72 alimentadores.</i>	103
Figura 41 <i>TPMS con L=5 y 54 alimentadores.</i>	103
Figura 42 <i>TPMS con L=5 y 36 alimentadores</i>	104
Figura 43 <i>Pasos para transformar de elemento de malla a elemento solido en Meshmixer.</i>	111
Figura 44 <i>Pasos para transformar un archivo .stl en un archivo .obj usando MeshLab.</i>	112

Figura 45 <i>Pasos para convertir un elemento de malla en un archivo sólido y exportarlo en formato .step para la simulación en Inspire Cast.</i>	112
Figura 46 <i>Resultados obtenidos con Inspire Cast utilizando una malla reducida al 2% de la longitud objetivo.</i>	114
Figura 47 <i>Resultados obtenidos con Inspire Cast utilizando una malla reducida al 3% de la longitud objetivo.</i>	114
Figura 48 <i>Distribución de temperatura durante el llenado para el modelo L5 – 72A – 150 °C.</i>	117
Figura 49 <i>Distribución de temperatura durante el llenado para el modelo L10 – 9A – 150 °C.</i>	117
Figura 50 <i>Distribución de temperatura durante el llenado para el modelo L15 – 3A – 150 °C.</i>	118
Figura 51 <i>Distribución de temperatura durante el llenado para el modelo L10 – 12A – 345 °C.</i>	118
Figura 52 <i>Distribución de temperatura durante el llenado para el modelo L15 – 5A – 345 °C.</i>	119
Figura 53 <i>Distribución de temperatura durante el llenado para el modelo L5 – 36A – 345 °C.</i>	119
Figura 54 <i>Distribución de temperatura durante el llenado para el modelo L15 – 6A – 540 °C.</i>	120
Figura 55 <i>Distribución de temperatura durante el llenado para el modelo L5 – 54A – 540 °C.</i>	120
Figura 56 <i>Distribución de temperatura durante el llenado para el modelo L10 – 6A – 540 °C.</i>	121
Figura 57 <i>Regiones con índice Niyama mayor a 1 del modelo L15 – 3A – 150°C</i>	123
Figura 58 <i>Regiones con índice Niyama mayor a 1 del modelo L15 – 5A – 345°C</i>	123
Figura 59 <i>Regiones con índice Niyama mayor a 1 del modelo L15 – 6A – 540°C</i>	123
Figura 60 <i>Regiones con índice Niyama mayor a 1 del modelo L10 – 6A – 540°C</i>	123
Figura 61 <i>Regiones con índice Niyama mayor a 1 del modelo L10 – 9A – 150°C</i>	123
Figura 62 <i>Regiones con índice Niyama mayor a 1 del modelo L10 – 12A – 345°C</i>	123
Figura 63 <i>Regiones con índice Niyama mayor a 1 del modelo L5 – 36A – 345°C</i>	124
Figura 64 <i>Regiones con índice Niyama mayor a 1 del modelo L5 – 54A – 540°C</i>	124
Figura 65 <i>Regiones con índice Niyama mayor a 1 del modelo L5 – 72A – 150°C</i>	124
Figura 66 <i>Modelos L=15 y L=10 impresos en resina Castable Wax 40.</i>	126
Figura 67 <i>Errores de impresión para los modelos con L=5.</i>	126

Figura 68 <i>Impresiones de los modelos con L=5 en resina Castable Wax.</i>	127
Figura 69 <i>Paso 1. Dibujar el contorno del cubilete en una hoja de papel y cubrirlo con cera.</i>	128
Figura 70 <i>Paso 2. Con plastilina formar un domo.</i>	128
Figura 71 <i>Paso 3. Insertar el modelo de resina y donde se insertó sellar con cera alrededor.</i>	129
Figura 72 <i>Paso 4. Sellar la base del cubilete con cera y envolver con cinta de ducto la base para que no pueda filtrar el agua o el yeso.</i>	130
Figura 73 <i>Paso 5. Envolver la parte superior con una lámina plástica de manera que eleve la altura del cubilete. Esto para que durante el proceso de vacío el yeso no se desborde.</i>	131
Figura 74 <i>Paso 6. Rociar con alcohol el modelo de resina y luego cubrir con agua hasta 3/4 partes el modelo de resina. Medir el peso del agua y calcular la cantidad de yeso. Añadir el yeso al agua y mezclar de manera enérgica.</i>	131
Figura 75 <i>Paso 7. Cubrir con el yeso el modelo de resina y llevar a la cámara de vacío para extraer el aire del interior del yeso.</i>	133
Figura 76 <i>Paso 8. Dejar fraguar el yeso por al menos 2 horas. Luego retirar la base, quietar los restos de plastilina y dar forma de domo a la base del cubilete.</i>	134
Figura 77 <i>Gráfica de las rampas de temperatura para el proceso de desparafinado de la resina Castable Wax 40</i>	135
Figura 78 <i>Gráfica de las rampas de temperatura para el proceso de desparafinado de la resina Castable Wax.</i>	136
Figura 79 <i>Gráfica de las rampas de temperatura para el proceso de quemado del yeso Sigma de Certus Prestige.</i>	138
Figura 80 <i>Inicio del ciclo de desparafinado y quemado del molde.</i>	139
Figura 81 <i>Fundición de aluminio con soplete.</i>	140
Figura 82 <i>Molde después del proceso de quemado completo.</i>	141
Figura 83 <i>Molde listo para verter el metal.</i>	141
Figura 84 <i>Fundición realizada sin utilizar vacío durante el vertido.</i>	142

Figura 85 <i>Vertido del metal fundido.</i>	143
Figura 86 <i>Dejar reposar el molde durante 10 min y luego sumergirlo en agua para retirar la pieza.</i>	143
Figura 87 <i>Pieza luego de la limpieza con chorro de agua.</i>	144
Figura 88 <i>Proceso manual de retirar los alimentadores de la pieza.</i>	145
Figura 89 <i>Proceso de granallado para limpiar la superficie de la pieza fundida.</i>	145
Figura 90 <i>Banco de pruebas para medir temperatura de entrada y de salida de aire.</i>	148
Figura 91 <i>Disipador de aleta comercial de 30x30x30 mm.</i>	149
Figura 92 <i>Curvas de diferencia de temperatura medida con el banco de pruebas.</i>	150
Figura 93 <i>Modelo: L5 – 72A – 150 °C</i>	153
Figura 94 <i>Modelo: L10 – 9A – 150 °C</i>	153
Figura 95 <i>Modelo: L15 – 3A – 150 °C</i>	154
Figura 96 <i>Modelo: L10 – 12A – 345 °C</i>	154
Figura 97 <i>Modelo: L15 – 5A – 345 °C</i>	155
Figura 98 <i>Modelo: L5 – 36A – 345 °C</i>	155
Figura 99 <i>Modelo: L15 – 6A – 540 °C</i>	156
Figura 100 <i>Modelo: L5 – 54A – 540 °C</i>	156
Figura 101 <i>Modelo: L10 – 6A – 540 °C</i>	157
Figura 102 <i>Modelo: L5 – 72A – 150 °C</i>	158
Figura 103 <i>Modelo: L10 – 9A – 150 °C</i>	158
Figura 104 <i>Modelo: L15 – 3A – 150 °C</i>	159
Figura 105 <i>Modelo: L10 – 12A – 345 °C</i>	159
Figura 106 <i>Modelo: L15 – 5A – 345 °C</i>	160
Figura 107 <i>Modelo: L5 – 36A – 345 °C</i>	160
Figura 108 <i>Modelo: L15 – 6A – 540 °C</i>	161
Figura 109 <i>Modelo: L5 – 54A – 540 °C</i>	161

Figura 110 <i>Modelo: L10 – 6A – 540 °C</i>	162
Figura 111 <i>Grafica de efectos principales para la calidad superficial.</i>	163
Figura 112 <i>Grafica de efectos principales para Relaciones SN de la calidad superficial.</i>	164
Figura 113 <i>Grafica de efectos principales para medias del peso de los intercambiadores.</i>	167
Figura 114 <i>Grafica de efectos principales para Relaciones SN del peso de los intercambiadores.</i>	168
Figura 115 <i>Defecto de aletas en estructura TPMS</i>	170
Figura 116 <i>Histograma de la medidas de porosidad de las estructuras TPMS.</i>	173
Figura 117 <i>Designación de nombres para las longitudes de las TPMS.</i>	174
Figura 118 <i>Grafica de intervalos para la medidas del ancho de las TPMS.</i>	177
Figura 119 <i>Grafica de intervalos para la medidas del largo de las TPMS.</i>	179
Figura 120 <i>Grafica de intervalos para la medidas del alto de las TPMS.</i>	181
Figura 121 <i>Carta de control para el ancho de las TPMS.</i>	183
Figura 122 <i>Carta de control para el ancho de las TPMS.</i>	184
Figura 123 <i>Carta de control para el alto de las TPMS.</i>	185
Figura 124 <i>Grafica de probabilidad de datos de longitud de las TPMS.</i>	186
Figura 125 <i>Informe de capacidad de proceso.</i>	187

Resumen

En este trabajo se llevó a cabo la fabricación de intercambiadores de calor compactos de superficies mínimas triple periódicas, TPMS (por sus siglas en inglés) de tipo diamante utilizando el método de fundición a la cera perdida. Este método es ampliamente utilizado en la producción de piezas de precisión y permite la obtención de estructuras con alta resolución y precisión en términos geométricos. Se determinó que el material más adecuado para estas estructuras es el aluminio debido a sus buenas propiedades térmicas y su bajo coeficiente de expansión térmica, lo que garantiza una mayor estabilidad durante el proceso de fundición. La metodología utilizada incluyó un diseño experimental para determinar las mejores condiciones de temperatura de molde, sistema de alimentación y longitud de celda unidad de la TPMS para el proceso de fundición. Se realizaron 2 experimentos y se analizaron los resultados obtenidos para optimizar el proceso y obtener las estructuras deseadas. El proceso se detalló paso a paso, incluyendo la preparación del modelo de cera, la creación de los moldes, la eliminación de la cera y la fundición del aluminio. Se realizó una prueba rápida de transferencia de calor en el que la mejor estructura TPMS fue la de longitud unidad de 10 mm, esta logró disipar un 40% más de calor que un disipador de aletas con las mismas dimensiones. En conclusión, mediante el diseño experimental y la metodología utilizada, se logró fabricar estructuras TPMS de tipo diamante con una capacidad de proceso buena pero que se requiere mejorar. El uso del aluminio como material y el proceso de fundición a la cera perdida permitieron obtener estructuras con buenas propiedades térmicas y estabilidad térmica.

Palabras clave: Disipador, TPMS, fundición .

Abstract

In this work, the fabrication of compact heat exchangers diamond-type TPMS (Triple Periodic Minimal Surface) was carried out using the lost-wax casting method. This method is widely used in the production of precision parts and allows obtaining structures with high resolution and geometrical accuracy. It was determined that the most suitable material for these structures is aluminum due to its good thermal properties and low coefficient of thermal expansion, which guarantees greater stability during the casting process. The methodology used included an experimental design to determine the best conditions of mold temperature, feeding system and TPMS unit cell length for the casting process. Two experiments were performed, and the results obtained were analyzed to optimize the process and obtain the desired structures. The process was detailed step by step, including wax model preparation, mold creation, wax removal, and aluminum casting. A rapid heat transfer test was performed in which the best TPMS structure was the 10 mm unit length, which dissipated 40% more heat than a finned heatsink with the same dimensions. In conclusion, by means of the experimental design and the methodology used, it was possible to manufacture diamond-type TPMS structures with a good process capability, but which needs to be improved. The use of aluminum as material and the lost wax casting process allowed obtaining structures with good thermal properties and thermal stability.

Keywords: Heatsink, TPMS, cast iron.

Introducción

Visión general de las estructuras TPMS.

Superficies mínimas triplemente periódicas TPMS

Las superficies mínimas se definen en el lenguaje de la geometría diferencial como "superficies de curvatura media cero", es decir, la suma de las curvaturas principales en cada punto es cero. Esto significa que son igualmente convexas y cóncavas en todos los puntos y, por tanto, su forma es hiperbólica. Se denominan mínimas porque, dada una curva de contorno fija, el área de una "superficie mínima" es extrema con respecto a otras superficies con el mismo contorno. Resultan especialmente fascinantes las superficies mínimas que tienen una estructura cristalina en el sentido de que se repiten en tres dimensiones, es decir, que son triplemente periódicas. Las superficies mínimas triple periódicas tienen tres vectores de red, es decir, son invariantes bajo traslación en tres direcciones independientes (Yan et al. 2021a).

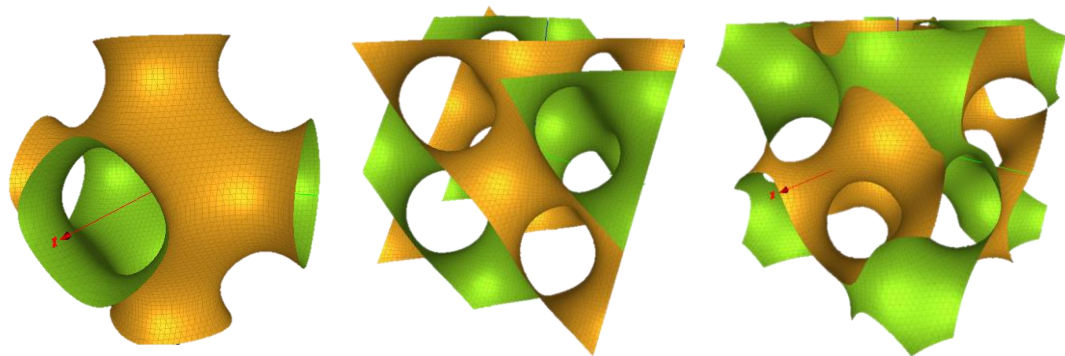
El primer TPMS que se descubrió e investigó fue el de Schwarz (1890) (Schwarz 1890). Consideró una película de jabón a través de un marco cuadrilátero, cuyas aristas son cuatro de las seis aristas de un tetraedro regular y se dio cuenta de que tal superficie podía continuarse suavemente uniendo las piezas arista con arista, convirtiéndose las aristas en ejes de simetría dobles del objeto infinito resultante. La superficie se conoce como superficie D porque sus grafos laberínticos son redes de "diamantes" de 4 conexiones. Schwarz fue capaz de obtener una expresión analítica para la superficie D, y también para la superficie primitiva P, cuyos grafos laberínticos son redes formadas por los vértices y aristas de una red cúbica primitiva. Su alumno Neovius descubrió la superficie C(P) de Neovius, el "complemento" de P, porque P y C(P) tienen el mismo grupo de simetría (Yan et al. 2021a).

El siguiente desarrollo en TPMS no tuvo lugar hasta la década de 1970, cuando A. H. Schoen investigó para la NASA si las superficies de este tipo podrían ser de utilidad como estructuras espaciales y encontró más de una docena de nuevos ejemplos. Esas superficies con simetría cúbica

se denominan "superficie Schoen gyroid-G"(Yan et al. 2021a). La Figura 1 muestra una celda unitaria cúbica de 3 TPMS.

Figura 1

Celda unitaria de TPMS



Nota: De izquierda a derecha se muestran la celda unidad de las TPMS: Schwarz-P, Schwarz-D y Gyroid.

Existen muchos procesos industriales que llegan a desperdiciar cientos de exajulios de energía anualmente en forma de emisiones de calor de baja temperatura (entre 50°C y 250 °C) y reciclar esta energía resulta muy costoso utilizando métodos convencionales. Recientemente materiales porosos con características superficiales mínimas han llamado la atención debido a su diseño compacto y propiedades térmicas. Las denominadas TPMS se han convertido en el principal foco de estudio debido a sus propiedades térmicas distintivas. Se han realizado trabajos en los que analizan de manera matemática las propiedades topológicas de diferentes estructuras TPMS y mediante simulaciones tridimensionales de transferencia de calor conjugada en estado estacionario para flujo laminar incompresible se cuantifica el rendimiento de un intercambiador de calor basado en TPMS logrando llegar a la conclusión que la transferencia de calor entre el flujo de aire y la fuente de calor es muy eficaz con una penalización de caída de presión insignificante por la cantidad de calor extraído de la fuente de calor en comparación con un canal vacío (Attarzadeh, Rovira, y Duwig 2021).

Antecedentes de la fabricación de estructuras TPMS.

El potencial del TPMS para la fabricación.

Gracias a la formación de capas, la manufactura aditiva (MA) metálica permite fabricar componentes con huecos y socavaduras. El diseñador obtiene un enorme grado de libertad en lo que respecta a la geometría de la pieza sin verse limitado por las restricciones de los métodos de fabricación convencionales. El SLM (Selective Laser Melting) y el DMLS (Direct Metal Laser Sintering) son especialmente adecuados para fabricar estructuras periódicas generadas computacionalmente y han permitido el reciente desarrollo y fabricación de estructuras reticulares periódicas abiertas más avanzadas con porosidad controlada utilizando polvos metálicos.(Yan et al. 2021a)

Se cree que los TPMS, que tienen una superficie mínima no autointersectiva triplemente periódica infinitamente conectada con uniones triples y que no contienen líneas rectas en la superficie, son adecuados para la MA de metales. Estas estructuras reticulares, como el diamante de Schwarz y las superficies girodales de Schoen, son geometrías curvas continuas y autoportantes, lo que se considera adecuado para la fabricación SLM/DMLS. Estas estructuras reticulares periódicas podrían considerarse un potencial para aplicaciones de estructuras ligeras y de soporte. (Yan et al. 2021a)

Con la llegada de las tecnologías de prototipado rápido, como SLM y DMLS, el uso de microestructuras complejas diseñadas a medida para la ingeniería tisular se ha convertido en una alternativa factible. La elección fundamentada de un diseño de andamiaje adaptado de forma óptima depende esencialmente de un conocimiento profundo de las relaciones estructura-propiedad. Las estructuras derivadas de superficies mínimas y otras superficies afines se concibieron como materiales de construcción ligeros ya en la década de 1970 y recientemente se ha descubierto que optimizan propiedades que compiten entre sí, como la rigidez del armazón sólido y el transporte en la fase complementaria. La fabricación de alta precisión de andamiajes basados en la principal ventaja de los andamiajes de superficie mínima es la estructura celular abierta, que se considera que

facilita la migración y vitalización celular, al tiempo que conserva un alto grado de rigidez estructural. La presencia de geometrías de superficie mínima en tejidos biológicos in vivo, como en caparazones de escarabajos, gorgojos, escamas de alas de mariposa y esqueletos de crustáceos, apunta aún más a su utilidad como diseños de andamios biomiméticos.(Yan et al. 2021a)

Fabricación de estructuras celulares

Existen investigaciones que se centran en la fabricación de estructuras celulares como la espuma estocástica de metal, estos procesos se caracterizan por generar gas en el metal líquido o mezclar polvos metálicos con un agente de expansión que luego se compacta y se funde (Banhart y Weaire 2002). Si bien este proceso da como resultado estructuras con celdas de forma, morfología y distribución aleatorias, colocan el material en lugares donde contribuye poco a las propiedades de la estructura(aparte de la densidad) (Ashby 2000).

La mayor limitación de las estructuras celulares estocásticas es la completa falta de control que tiene un diseñador sobre la topología de la mesoestructura; las técnicas no proporcionan resultados repetibles, ni siquiera predecibles. Además, estas técnicas limitan a un diseñador en los tipos de macroestructura que se pueden producir(Snelling et al. 2015).

Fabricación de estructuras periódicas

Los materiales celulares ordenados se han fabricado estampando o prensando láminas delgadas de metal en forma corrugada y luego uniéndolas para crear estructuras periódicas.(Wadley 2003) Alternativamente, se han creado uniendo una sobre otra láminas de metal ranuradas,(Mori et al. 2007) maquinado por extrusión y descarga eléctrica, (Queheillalt, Murty, y Wadley 2008) y filamentos metálicos tejidos y soldados para formar un tejido periódico.(Queheillalt, Deshpande, y Wadley 2007). A principios de la década de 2000, Jamcorp Inc. exploró el uso de fundición en arena para procesar materiales de bloques de celosía (LBM's por sus siglas en ingles lattice block materials). Sin embargo, los componentes resultantes sufrieron porosidad debido a la incapacidad del fluido para acceder a todas las partes de la estructura de la armadura. Aunque estas técnicas de

fabricación para producir estructuras celulares ordenadas ofrecen una calidad de pieza repetible, limitan la macroestructura de las piezas resultantes a geometrías planas, (Sypeck y Wadley 2002) y restringen al diseñador al uso de una mesoestructura homogénea específica en toda la pieza.

Si bien las técnicas de fabricación antes mencionadas son capaces de producir materiales celulares, de alguna manera limitan la capacidad del diseñador para prescribir selectivamente la ubicación del material en toda la pieza para lograr un rendimiento óptimo.

Una alternativa para conseguir la fabricación de estructuras celulares; dentro de las cuales se incluyen las TPMS, es unir varios componentes, pero su desventaja se encuentra en que las uniones; como es bien sabido, ya sean soldadas, atornilladas o unidas con un adhesivo, sirven como concentradores de tensión. Debido a su compleja geometría interna, la fabricación de un componente con estructura TPMS es imposible con el mecanizado sustractivo tradicional. Como tal, los investigadores han buscado tecnologías de fabricación avanzadas para producir esta clase única de estructuras (Lyons et al. 2009).

Sin embargo, la fundición a la cera perdida es un proceso que permite fabricar estructuras complejas. Los patrones generalmente se moldean a partir de cera utilizando equipos de inyección especializados. Los patrones de cera están conectados por bebederos y rodeados por una mezcla refractaria denominada revestimiento. Al calentar el revestimiento por algún método de cocción instantánea, la cera se derrite dejando una réplica de gran calidad superficial que posteriormente se rellena, con metal fundido utilizando configuraciones diferentes de vertido como el inclinado, de vástago, volcado o vertido inferior. Tras retirar el revestimiento se obtienen fieles duplicados de la pieza original (Lyons et al. 2009).

Objetivos del proyecto de tesis

En el presente trabajo se plateó realizar la fabricación de piezas con estructura TPMS mediante la técnica de fundición por cera perdida obteniendo los patrones para crear el molde con impresión 3D con tecnología de estereolitografía. Para ello se propuso los siguientes objetivos específicos.

Objetivo Específico 1: Preparar y refinar del modelo CAD para la fundición por cera perdida.

Objetivo Específico 2: Diseñar un flujo de trabajo que incluya selección de materiales y caracterización para el proceso de cera perdida usando diseño experimental.

Objetivo Específico 3: Imprimir y realizar el postprocesamiento del molde en cera.

Objetivo Específico 4: Manufacturar los intercambiadores de calor compactos.

Marco Teórico

Conceptos básicos sobre fundición.

La fundición es un proceso en el que metal derretido fluye por gravedad u otra fuerza hacia un molde en el que se solidifica con la forma de la cavidad de éste; es uno de los procesos más antiguos de conformación, pues se remonta a 6 000 años a.C. (Groover 2007).

La fundición se compone de tres pasos principales: (a) el vertido de metal fundido en un molde con la forma deseada de la pieza, (b) la solidificación del metal líquido, y (c) la extracción de la pieza del molde. Es importante comprender los principios básicos de la fundición para poder fabricar piezas fundidas de buena calidad a un costo razonable, y para desarrollar técnicas adecuadas para diseñar los moldes y llevar a cabo las prácticas correspondientes. (Kalpakjian, Schmid, y Espinoza Limón Jaime 2008).

La fundición de metales

Algunos metales líquidos pueden ser realmente líquidos puros. Entre estos metales se encuentra el oro líquido puro y, posiblemente, algunos aceros al carbono-manganeso que se encuentran en el horno de fusión en una fase tardía de la fusión. Sin embargo, son poco frecuentes. (Campbell 2011)

Muchos metales líquidos están muy llenos de fases sólidas diversas flotando de tal manera que se parecen más a un lodo que a un líquido. Este hecho puede observarse con frecuencia cuando se vierten algunos metales, hay una masa fundida que desborda el horno de fusión como si fuera una mezcla de cemento. Por ello, muchos de los modelos de metales líquidos formulados para explicar la aparición de defectos no tienen en cuenta este hecho, pero a medida que las técnicas han ido mejorando en los últimos años, cada vez hay más pruebas de la verdadera estructura interna de los metales líquidos, lo que revela que las fundiciones están repletas de defectos. (Campbell 2011)

Muchas de las propiedades de los metales relacionadas con la resistencia sólo pueden explicarse suponiendo que la masa fundida original estaba llena de defectos. Lo que no sucede con

la metalurgia clásica y la ciencia de solidificación que han considerado a los metales como metales puros y no pueden explicar propiedades importantes de los materiales fundidos, como el efecto del espaciado de los brazos dendríticos; la existencia de poros, su densidad de área y la razón del agrietamiento de los precipitados formados a partir de la fundición. (Campbell 2011)

Un metal líquido es una sustancia química muy reactiva. Reaccionará tanto con los gases que haya sobre él como con cualquier tipo de escoria o fundente que flote sobre la masa fundida. Muchas fusiones también reaccionan con sus recipientes, como crisoles y revestimientos de hornos. (Campbell 2011)

Los gases disueltos en líquidos se desplazan más rápidamente cuando el líquido está en movimiento, ya que son simplemente arrastrados por el líquido. (Campbell 2011)

Sin embargo, en muchas situaciones de interés el líquido es estacionario, o casi. Este es el caso de la capa en la superficie del líquido. La presencia de una película sólida en la superficie mantendrá la superficie estacionaria y, debido al efecto de la viscosidad, esta zona se extenderá a cierta distancia en el líquido, aunque el espesor de la capa se reducirá si el líquido se agita violentamente. (Campbell 2011)

Cuando el metal fundido interactúa con su entorno, muchas de las reacciones dan lugar a productos, que suelen ser películas y se disuelven rápidamente en el metal y se difunden en su interior. Al fundir metales, las temperaturas suelen ser lo suficientemente altas como para que algunos componentes de la aleación se estén evaporando. (Campbell 2011)

Solidificación de metales

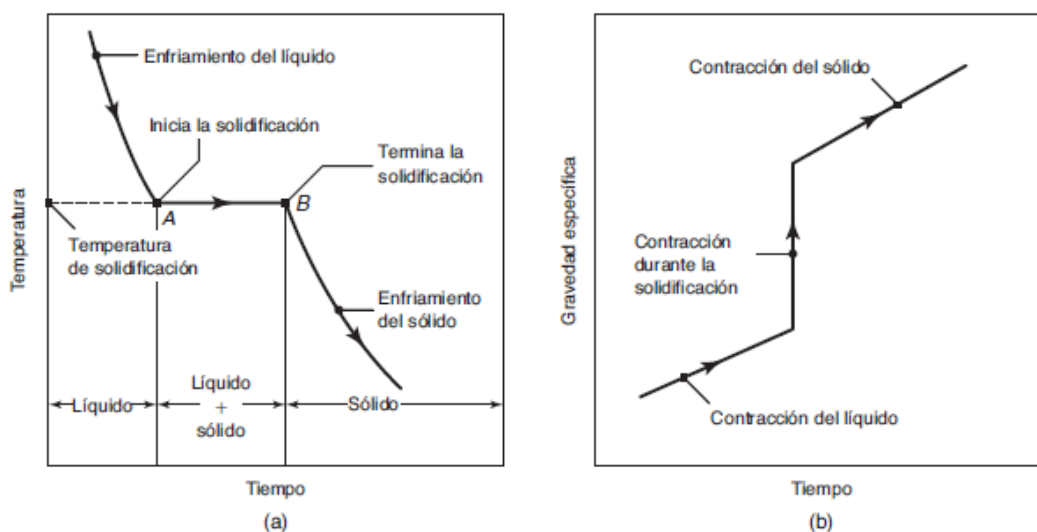
Metales puros.

Debido a que un metal puro tiene un punto de fusión (o de solidificación) bien definido, se solidifica a una temperatura constante, como se muestra en la figura 2. Por ejemplo, el aluminio puro se solidifica a 660 °C, el hierro a 1537 °C y el tungsteno a 3410 °C. Luego que la temperatura del

metal fundido desciende a su punto de solidificación, permanece constante mientras se disipa su calor latente. El frente de solidificación (interfaz sólido- líquido) se mueve a través del metal fundido de las paredes del molde hacia el centro. (Kalpakjian et al. 2008)

Figura 2

(a) Temperatura como función del tiempo de solidificación de metales puros. (b) Densidad, como función del tiempo

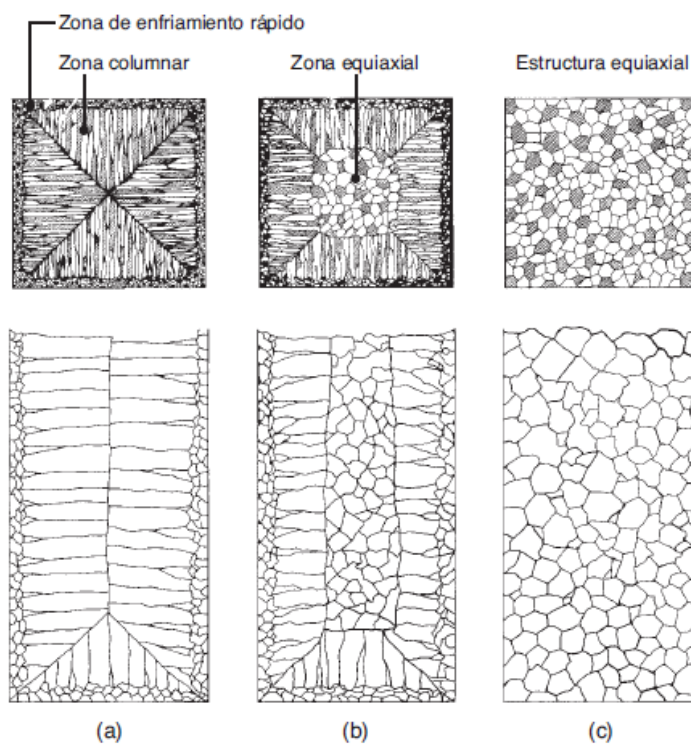


Nota: La solidificación en la figura (a) ocurre a temperatura constante. Tomada de *Manufactura, ingeniería y tecnología*, (p.262), por Kalpakjian et al, 2008.

En la figura 3a se muestra la estructura del grano de la fundición de un metal puro en un molde cuadrado. Las paredes del molde se encuentran mucho más frías que el metal fundido así el metal se enfría con rapidez y produce una capa superficial solidificada, de finos granos equiaxiales. Éstos crecen en dirección opuesta a la de la transferencia de calor a través del molde; los que tienen una orientación favorable crecen de manera preferencial y se les llama granos columnares (figura 4). Conforme la transferencia de calor se reduce, alejándose de las paredes, los granos se vuelven equiaxiales y gruesos. (Kalpakjian et al. 2008)

Figura 3

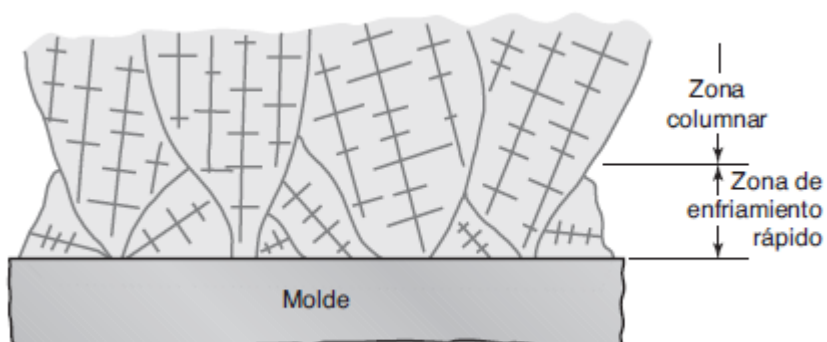
Esquema de 3 estructuras de metales fundidos solidificados en un molde cuadrado.



Nota: (a) metales puros; (b) aleaciones de solución sólida; y (c) estructura obtenida utilizando agentes nucleantes. Tomada de *Manufactura, ingeniería y tecnología*, (p.263), por Kalpakjian et al, 2008.

Figura 4

Desarrollo de una textura preferida en una pared fría del molde.



Nota: Los únicos granos orientados favorablemente crecen alejándose de la superficie del molde.

Tomada de *Manufactura, ingeniería y tecnología*, (p.263), por Kalpakjian et al, 2008.

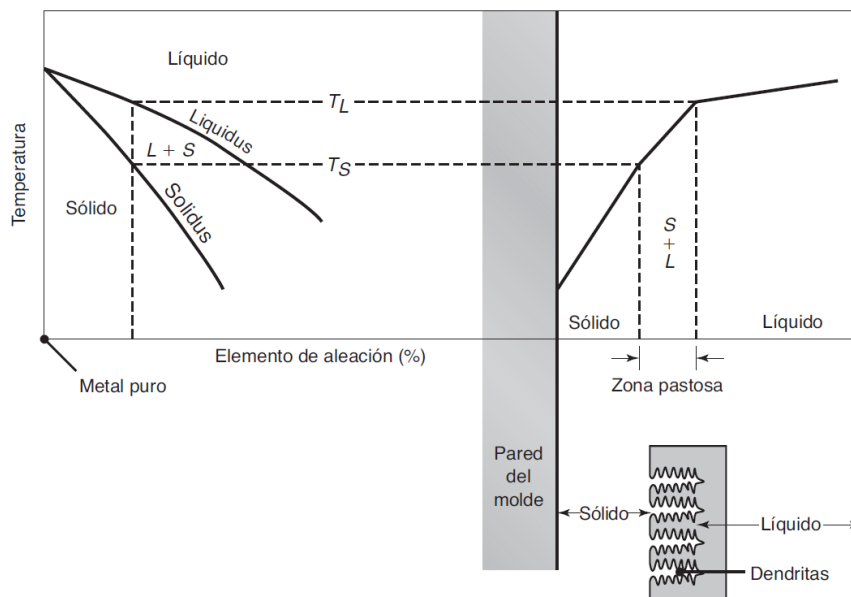
Aleaciones

La solidificación en las aleaciones comienza cuando la temperatura desciende por debajo del liquidus (T_L) y termina cuando alcanza el solidus, T_S (figura 6). En este intervalo de temperaturas, la aleación se encuentra en un estado blando o pastoso que consiste en dendritas columnares.

(Kalpakjian et al. 2008)

Figura 5

Esquema de solidificación de una aleación y distribución de la temperatura en el metal que se solidifica.



Nota: Observe la formación de dendritas en la zona pastosa. Tomada de *Manufactura, ingeniería y tecnología*, (p.264), por Kalpakjian et al, 2008.

El ancho de la zona pastosa (donde coinciden las fases líquida y sólida) es un factor importante durante la solidificación. Esta zona se describe en términos de una diferencia de

temperatura, conocida como rango de solidificación o de congelamiento, de la siguiente manera:

$$\text{Rango de solidificación} = T_L - T_S$$

En la figura 6 se puede ver que los metales puros tienen un rango de solidificación próximo a cero y que el frente de solidificación se mueve como un frente plano sin formar una zona pastosa.

Las eutécticas se solidifican de manera similar, con un frente casi plano. (Kalpakjian et al. 2008)

Para las aleaciones, un rango de solidificación corto por lo común comprende una diferencia de temperatura de menos de 50 °C, y un rango de solidificación largo, más de 110 °C. En general, las fundiciones ferrosas tienen zonas pastosas estrechas, mientras que en las aleaciones de aluminio y de magnesio dichas zonas son amplias. Por lo tanto, estas aleaciones se encuentran en un estado pastoso durante la mayor parte del proceso de solidificación. (Kalpakjian et al. 2008)

Efectos de las velocidades de enfriamiento.

Las velocidades de enfriamiento bajas (del orden de 10^2 K/s), o los tiempos de solidificación largos, producen estructuras dendríticas gruesas con un gran espaciado entre los brazos de las dendritas. Si las velocidades de enfriamiento son mayores (del orden de 10^4 K/s) o los tiempos locales de solidificación cortos, la estructura se vuelve más fina, con un espaciado menor entre los brazos de las dendritas y para velocidades de enfriamiento superiores (desde 10^6 hasta 10^8 K/s) las estructuras que se desarrollan son amorfas. (Kalpakjian et al. 2008)

Fluidez de los metales líquidos

El término fluidez puede definirse como la cualidad de un metal en fase líquida que le permite fluir a través de los pasajes del molde y llenar todos los espacios de este, proporcionando contornos nítidos y una reproducción fiel de los detalles del diseño. Se puede apreciar que la fluidez no es una propiedad física única en el mismo sentido que la densidad o la viscosidad, sino una característica compleja relacionada con el comportamiento en condiciones específicas dentro de un molde de fundición. (Beeley 2001)

Los factores que afectan la fluidez incluyen la temperatura de vertido respecto del punto de fusión, la composición del metal, la viscosidad del metal líquido y la transferencia de calor al ambiente. Una temperatura de vertido más elevada respecto del punto de solidificación del metal aumenta el tiempo que permanece en estado líquido, lo que permite que fluya más antes de solidificarse. Esto tiende a agravar ciertos problemas del fundido tales como la formación de óxidos, porosidad por gases y penetración de metal líquido en los espacios intersticiales entre los granos de arena que forman el molde. (Groover 2007)

La composición también afecta la fluidez, en particular respecto al mecanismo de solidificación del metal. La mejor fluidez se obtiene con metales que se solidifican a temperatura constante (por ejemplo, metales puros y aleaciones eutécticas). Cuando la solidificación ocurre en un rango de temperatura (la mayor parte de aleaciones pertenecen a esta categoría), la porción solidificada en forma parcial interfiere con el flujo de la porción líquida, lo que reduce la fluidez. Además del mecanismo de solidificación, la composición del metal también determina el calor de fusión, la cantidad de calor que se requiere para solidificar el metal a partir de su estado líquido. Un calor de fusión más elevado tiende a incrementar la medida de la fluidez en la fundición. (Groover 2007)

Tiempo de solidificación

Independientemente de si la masa fundida es un metal puro o una aleación, la transformación de estado de líquido a sólido toma un tiempo determinado. La duración total de la solidificación se refiere al periodo que la masa fundida tarda en solidificar tras su colada. Esta cantidad de tiempo depende del volumen y la configuración de la masa fundida, según la relación empírica conocida como Regla de Chvorinov, que establece:

$$T_{TS} = C_m \left(\frac{V}{A} \right)^n$$

donde T_{TS} = tiempo total de solidificación, min; V = volumen del fundido, cm^3 ; A = área de la superficie del fundido, cm^2 ; n es un exponente que por lo general se acepta que tiene un valor de 2; y C_m es la constante del molde. (Groover 2007)

Contracción

Debido a su propiedad de dilatación térmica, los metales generalmente se reducen en tamaño durante la solidificación y se enfriarán hasta la temperatura del entorno. Esta contracción, que causa cambios dimensionales y, ocasionalmente, grietas, es el resultado de tres acontecimientos sucesivos:

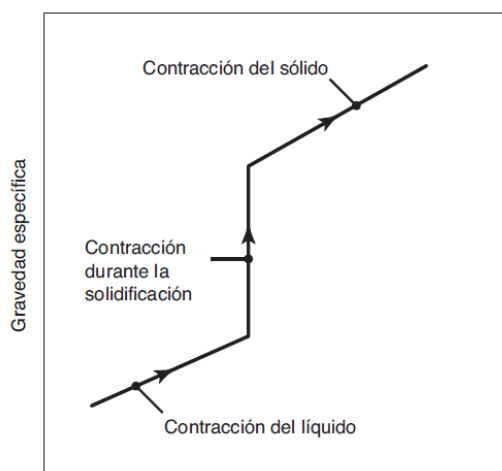
1. La contracción del metal fundido al enfriarse antes de solidificar.
2. La contracción del metal durante el cambio de fase de líquido a sólido (calor latente de fusión).
3. La contracción del metal solidificado (la fundición) conforme su temperatura se reduce a la temperatura ambiente.

La mayor medida de contracción ocurre cuando la fundición se enfría a la temperatura ambiente. (Kalpakjian et al. 2008)

El metal fundido en el horno ocupa un volumen considerablemente mayor que las piezas de fundición solidificadas que finalmente se producen, lo que plantea una serie de problemas al fundidor. El metal se contrae a tres velocidades bastante diferentes cuando se enfría desde el estado líquido hasta la temperatura ambiente, como ilustra la figura 6.

Figura 6

Ilustración esquemática de tres regímenes de contracción.

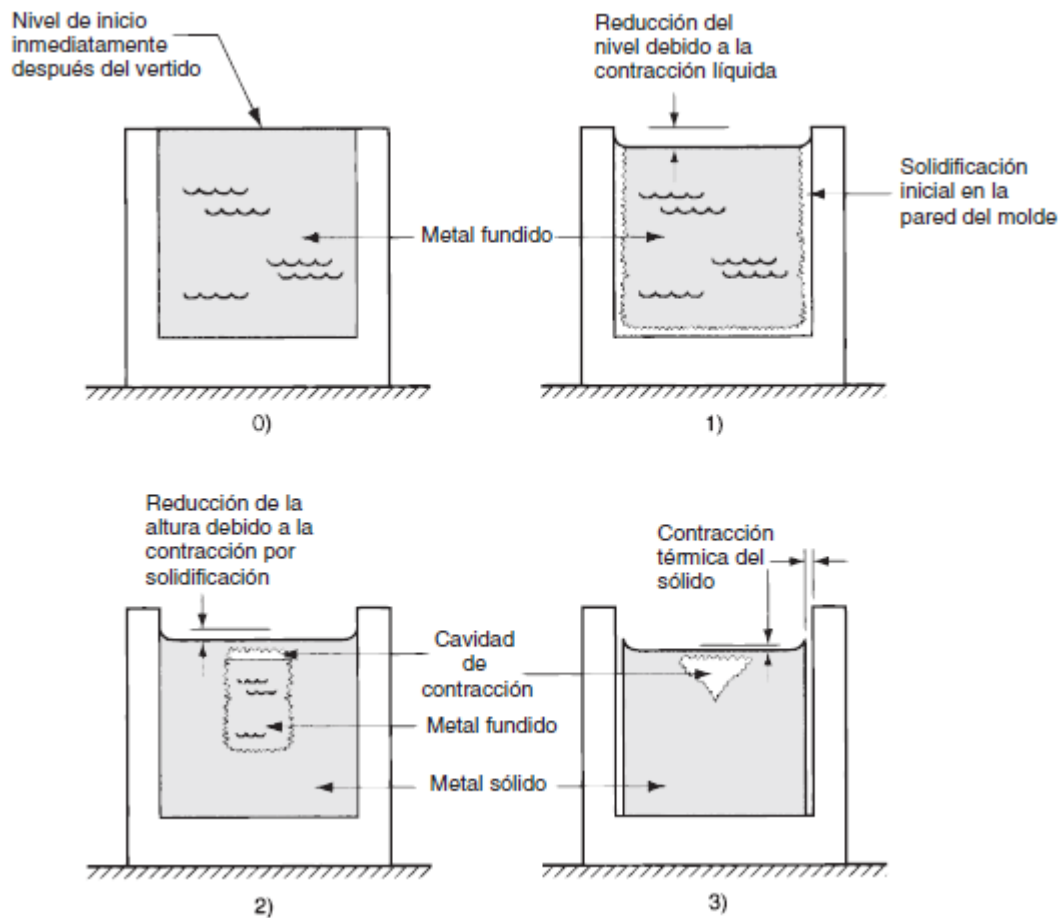


Nota: Tomada de *Manufactura, ingeniería y tecnología*, (p.262), por Kalpakjian et al, 2008.

Las tres etapas se explican en relación con un fundido cilíndrico hecho en un molde abierto, como se ilustra en la figura 7. El metal fundido inmediatamente después del vertido aparece en el inciso 0 de la serie. La contracción del metal líquido durante el enfriamiento desde la temperatura de vertido hasta la de solidificación hace que la altura del líquido se reduzca de su nivel inicial, como se ilustra en el inciso 1 de la figura. La cantidad de esta contracción líquida por lo general es de alrededor de 0.5%. La contracción por solidificación que se observa en el inciso 2 tiene dos efectos. En primer lugar, ocasiona una reducción adicional en la altura del fundido. En segundo, la cantidad de metal líquido disponible para alimentar la porción central superior del fundido se ve restringida. En general ésta es la última región que se solidifica, y la ausencia de metal crea un vacío en esa ubicación del fundido. Los trabajadores de la fundición llaman “rechupe” a esa cavidad por contracción. Una vez que se solidifica, el fundido experimenta más contracción de su altura y diámetro durante su enfriamiento, como se aprecia en el inciso 3 de la figura. Esta contracción está determinada por el coeficiente de expansión térmica del metal, que en este caso se aplica a la inversa para determinar la contracción.(Groover 2007).

Figura 7

Fases de contracción durante la solidificación.



Nota: Contracción de un fundido cilíndrico durante la solidificación y enfriamiento: 0) nivel de inicio del metal fundido inmediatamente después del vertido, 1) reducción del nivel ocasionado por la contracción líquida durante el enfriamiento, 2) disminución de la altura y formación de una cavidad de contracción ocasionada por la contracción de la solidificación y 3) reducción adicional de la altura y diámetro debido a la contracción térmica durante el enfriamiento del metal sólido. Por claridad, las reducciones dimensionales se han exagerado en los dibujos. Tomada de *Fundamentos de manufactura moderna*, (p.207), por Groover M., 2007.

Procesos de fundición de metales

Los procesos de fundición se clasifican en dos clases según el tipo de molde:

1. Los moldes desechables. Se fabrican normalmente con arena, yeso, cerámica u otros materiales similares que se combinan con agentes aglutinantes para mejorar sus propiedades. Un molde típico de arena se compone de un 90% de arena, un 7% de arcilla y un 3% de agua. Estos materiales son resistentes a altas temperaturas. Una vez que la fundición se ha solidificado, el molde se destruye para extraer el producto.(Groover 2007)
2. Los moldes permanentes. Hechos de metal y son la mejor opción para aquellas fundiciones que requieren repetidas aplicaciones, ya que estos mantienen su resistencia a temperaturas elevadas, pudiendo ser retiradas con facilidad a la vez que proporcionan mayor rapidez en el enfriamiento de la fundición, lo que influye en la microestructura y el tamaño de grano de esta.(Groover 2007)
3. Moldes compuestos: Estos moldes están compuestos por dos o más materiales, como arena, grafito, y metales, y se benefician de las ventajas de cada uno. Estos son diseñados para ser parcialmente desechables, de modo que puedan ser reutilizados optimizando el costo de los procesos de fundición. (Groover 2007)

A continuación, se presenta un resumen de los procesos de fundición de sus ventajas y limitaciones.

Tabla 1

Resumen de procesos de fundición

Proceso	Ventajas	Limitaciones
En arena	Casi cualquier metal fundido; sin límite en el tamaño, forma o peso de la parte; bajo costo del herramental.	Se requiere algún acabado; Acabado superficial relativamente grueso; tolerancias amplias.

Proceso	Ventajas	Limitaciones
Molde en cascara	Buena precisión dimensional y acabado superficial; alta capacidad de producción.	Tamaño limitado de la pieza; modelos y equipos costosos.
Molde evaporativo	La mayoría de los metales fundidos, sin límite de tamaño; Partes de formas complejas.	Los modelos tienen baja resistencia y suelen ser costosos para pequeñas cantidades.
Molde de yeso	Partes de formas intrincadas; buena tolerancia dimensional y acabado superficial; baja porosidad.	Limitado a metales no ferrosos; límite al tamaño de la parte y al volumen de producción; tiempo relativamente largo para fabricar el molde.
Molde cerámico	Partes de formas intrincadas; partes con tolerancias cerradas; buen acabado superficial.	tamaño limitado de la parte.
Por revestimiento	Partes de formas intrincadas; Excelente acabado superficial y precisión; casi cualquier metal fundido	Partes de tamaño limitado; modelos, moldes y mano de obra costosos

Proceso	Ventajas	Limitaciones
Molde permanente	Buen acabado superficial y tolerancia dimensional; baja porosidad; alta capacidad de producción	Alto costo del molde; Partes de tamaño y complejidad limitados; no es adecuado para metales con alto punto de fusión
A presión en matriz	Excelente precisión dimensional y acabado superficial; alta capacidad de producción	Alto costo de la matriz; partes de tamaños limitado; generalmente limitado a metales no ferrosos; largo tiempo de entrega
Centrifuga	Grandes partes cilíndricas o tubulares con buena calidad; alta capacidad de producción	Equipo costoso; partes de forma limitada

Nota: *Recuperado de Manufactura, ingeniería y tecnología*, (p.286), por Kalpakjian et al, 2008.

Calidad del fundido

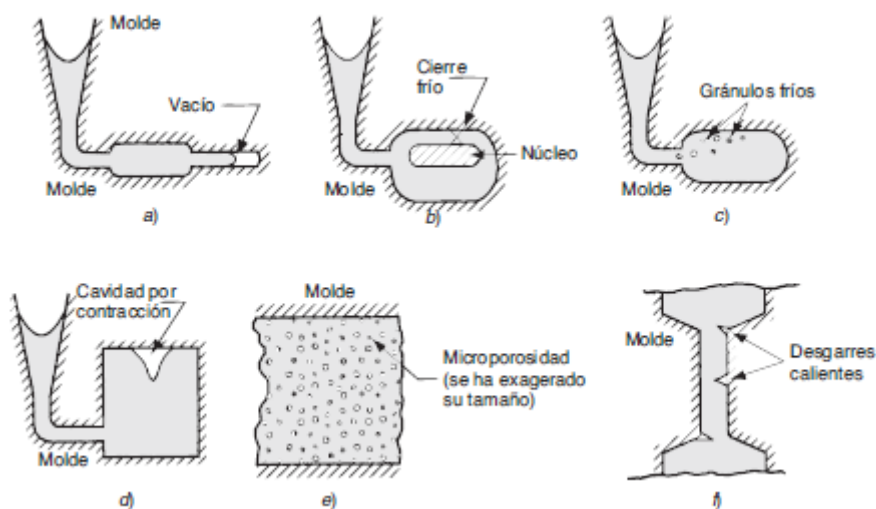
Hay muchas formas de que las cosas salgan mal en una operación de fundición, como posibles errores en la mezcla de materiales, que pueden generar defectos en el producto. Aquí se recopila una lista de los defectos comunes:

- a) Vacíos. Los moldes pueden quedar incompletos si el metal fundido se solidifica antes de llenar por completo la cavidad. (Groover 2007)
- b) Cierres fríos. Cuando dos secciones de metal se unen, pero no se fusionan debido a la solidificación prematura, esto se conoce como soldadura por fricción. (Groover 2007)

- c) Gránulos fríos. Las salpicaduras durante el vertido pueden provocar la formación de partículas sólidas de metal atrapadas en el fundido. Esto se puede prevenir al tener procedimientos de vertido y diseños del sistema de paso que impidan la aparición de salpicaduras.(Groover 2007)
- d) Cavity de fuga. La formación de un hueco en la parte superior de una fundición, debido a la falta de metal derretido en la región última a solidificar, se conoce como un "rechupe".(Groover 2007)
- e) Microporosidad. Hay una red de espacios diminutos en el enfriamiento, debido a que el metal derretido no se solidificó de forma uniforme en la estructura dendrítica. Este problema se ve comúnmente en las aleaciones, debido a que la solidificación ocurre en partes separadas. (Groover 2007)
- f) Desgarre en caliente también llamado agrietamiento caliente, Cuando el metal no puede contraerse de forma natural en las etapas finales de la solidificación o en las primeras del enfriamiento tras la solidificación debido a que el molde no lo permite, se produce un defecto conocido como desgarre caliente.(Groover 2007)

Figura 8

Defectos comunes de los fundidos



Nota: Algunos defectos comunes de los fundidos: a) vacíos, b) cierre frío, c) gránulos fríos, d) cavidad por contracción e) microporosidad y f) desgarre caliente. Tomado de *Fundamentos de manufactura moderna*, (p.238), por Groover M., 2007.

Características de las estructuras TPMS.

El potencial del TPMS para la manufactura aditiva

Se cree que las TPMS, que tienen una superficie mínima no autointersectiva triplemente periódica infinitamente conectada con uniones triples y que no contienen líneas rectas en la superficie, son adecuados para la manufactura aditiva. Estas estructuras reticulares, como el diamante de Schwarz y las superficies giroidales de Schoen, son geometrías curvas continuas y autoportantes. Estas estructuras reticulares periódicas podrían considerarse un potencial para aplicaciones de estructuras ligeras y de soporte. (Yan et al. 2021a)

La forma de la célula es un parámetro importante para la fabricabilidad de las estructuras reticulares. Los tres tipos de celda más utilizados (Shwarts-D, Shwartz-P y Gyroid) presentan diferencias en su topología, lo que se traduce en diferencias en el grosor, la curvatura y la conectividad de los puntales (es decir, el número de puntales que comparten un nodo común). En consecuencia, las cantidades de voladizo que resultan de cada diseño de célula particular afectan a la fabricabilidad en los procesos de manufactura aditiva. Además, los distintos tipos de célula tendrán distinta resistencia y capacidad de carga. (Yan et al. 2021a)

El tamaño es otro parámetro muy importante que influye en la fabricabilidad. El tamaño de la celda unidad o cantidad de poros para una fracción de volumen dada, cuanto mayor sea el tamaño de la calda unidad, menor será el tamaño del poro y viceversa. Dependiendo del tipo de celda unidad, existe un límite para el mayor tamaño que se puede fabricar con manufactura aditiva sin utilizar estructuras de soporte, ya que cuando el tamaño es grande, el poro esférico aumenta y da lugar a un puntal superior en voladizo. Es crucial comprender estas limitaciones para los distintos

tipos de celda unidad a fin de tener unas condiciones de fabricación satisfactorias y fiables.(Yan et al. 2021a)

La fracción de volumen es la fracción sólida en el volumen generado y determina el grosor del puntal de la celda. Cuanto mayor es la fracción de volumen, más grueso y resistente es el puntal que forma la celda y viceversa. Para un tamaño de celda fijo, cuando la fracción de volumen aumenta, el tamaño del poro (es decir, el espacio entre los puntales) disminuye a medida que los puntales se inflan y llenan el poro hasta que la fracción de volumen se aproxima a la unidad (sólido). (Yan et al. 2021a)

Las superficies mínimas triples periódicas (TPMS) tienen propiedades termo físicas prometedoras, lo que las convierte en un candidato adecuado para la producción de sistemas de recuperación de calor residual a baja temperatura. El rendimiento térmico de las TPMS está relacionado con los complejos patrones de flujo dentro de los poros y sus interacciones con las paredes.(Attarzadeh et al. 2021)

Las estructuras TPMS pueden modelarse matemáticamente repetidamente en tres direcciones. El patrón permite cultivar células TPMS en las tres direcciones perpendiculares entre sí, lo que da lugar a una matriz tridimensional de células TPMS. Cabe mencionar aquí que el término "superficie mínima" no se refiere a que la superficie total de la estructura sea mínima para un tamaño de celda unitaria dado; de hecho, las superficies de las estructuras TPMS son significativamente mayores que las de las celdas de otras estructuras. Esta mayor área superficial podría resultar beneficiosa para mejorar el rendimiento de transferencia de calor. Se ha prestado poca atención a la caracterización térmica y el comportamiento de transferencia de calor y las aplicaciones de las estructuras TPMS. Se ha investigado numéricamente las conductividades efectivas de las estructuras TPMS utilizando simulaciones basadas en elementos finitos. Se descubrió que las conductividades efectivas (eléctrica y térmica) eran una función tanto de la densidad relativa como de la arquitectura de la estructura TPMS. También se ha investigado experimentalmente la

conductividad térmica de las estructuras de TPMS fabricadas mediante fusión por lecho de polvo láser. (American Society of Mechanical Engineers 2020) investigaron el rendimiento de la transferencia de calor de disipadores de calor con arquitectura imprimible en 3D basados en estructuras TPMS mediante simulaciones en estado estacionario. Encontraron que el rendimiento de transferencia de calor conectivo de los disipadores de calor no sólo era una función de la porosidad de la arquitectura, sino que también dependía de la propia arquitectura. Las estructuras TPMS no se comparan con la espuma metálica convencional, en lo que respecta a su rendimiento de transferencia de calor. (Qureshi et al. 2021)

Método de fundición a la cera perdida

Antecedentes del método de fundición a la cera perdida.

El proceso de fundición por revestimiento, también llamado proceso a la cera perdida se utilizó por primera vez entre los años 4000 y 3000 a.C. Era un proceso común en gran parte del mundo antiguo desde la época en que se desarrolló por primera vez la metalurgia del cobre, mucho antes del desarrollo de la civilización sumeria. El modelo se fabrica con cera o con un plástico como el poliestireno, mediante moldeo o técnicas de elaboración rápida de prototipos. (Kalpakjian et al. 2008)

Hay dos procesos distintos para hacer moldes de fundición a la cera perdida: el proceso de revestimiento sólido (molde sólido) y el proceso de revestimiento de cerámico. En el proceso de revestimiento cerámico el modelo se sumerge en un lodo de material refractario. Una vez que se ha secado este recubrimiento inicial, el modelo se recubre varias veces para aumentar su espesor y mejorar su resistencia, este se ha convertido en la técnica predominante para aplicaciones de ingeniería, desplazando al proceso de revestimiento sólido en el cual, se puede insertar el modelo dentro de una caja de moldeo permeable y revestirla de material refractario. Después se coloca por unos minutos el revestimiento en una cámara de vacío para retirar las burbujas de aire y se deja secar el molde. En general, la caja de moldeo se coloca en una máquina de fundición de vacío para

que al momento de verter el metal fundido se introduzca en el molde produciendo detalles finos. Hoy en día, el proceso de revestimiento sólido se usa principalmente para producir piezas dentales o de joyería y solo tiene un papel pequeño en aplicaciones de ingeniería, principalmente con aleaciones no ferrosas. (ASM Handbook Committee y ASM International 1978)

Diseño

Aunque la tecnología moderna permite la fundición de formas complejas, es importante que los diseñadores tengan un conocimiento sólido del proceso de fundición para asegurar que las piezas se puedan fundir fácilmente. Para facilitar el diseño, se pueden utilizar sistemas de diseño asistido por computadora (CAD), que producen un modelo computarizado utilizado para crear un modelo maestro. Con el uso de sistemas CAD, es posible utilizar sistemas de fabricación asistidos por computadora (CAM) y varios métodos de prototipado rápido (RP) para crear un modelo maestro inicial, típicamente hecho de cera, plástico o metal.

Realización del modelo maestro

La calidad del modelo maestro tiene una importancia fundamental para la obtención de un producto de buena calidad: debe ser perfecto, con un acabado perfecto. No debe presentar el más mínimo defecto, porque cualquier defecto superficial se reproducirá en el molde de caucho y, a su vez, en el patrón de cera, en el molde refractario y, finalmente, en las piezas fundidas. En la mayoría de los casos, un defecto puede eliminarse en la fase de acabado de la pieza, para obtener el nivel de calidad deseado, pero requiere tiempo y dinero.

Alimentador

Por lo general, el bebedero de alimentación se considera parte integrante del modelo. Une el modelo que se va a fundir con el bebedero central en el que se vierte el metal fundido.

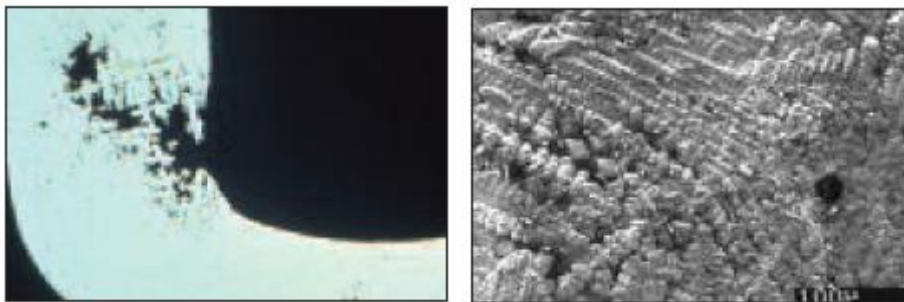
Función del bebedero de alimentación

El bebedero de alimentación es un componente muy importante de la fundición a la cera perdida, debe garantizar el perfecto llenado de las cavidades del molde y lo que es aún más

importante, debe actuar como depósito de metal líquido para compensar la inevitable contracción del volumen del metal durante la solidificación de las piezas fundidas; si el bebedero de alimentación no puede desempeñar esta segunda función, se formará un defecto: la porosidad por contracción, con su típico aspecto dendrítico. (Faccenda 2003)

Figura 9

Porosidad de contracción en una sección transversal: la forma dendrítica es evidente.



Nota: Tomada de *Handbook on investment casting*, (p.22), por Faccenda V., 2003.

Este defecto puede quedar totalmente contenido dentro de la fundición y, si éste es el caso, no hay problemas estéticos. Sin embargo, como ocurre más a menudo, si aparece en la superficie de la pieza de fundición, debe repararse o desecharse el artículo. La reparación es una operación delicada que puede resultar difícil o a veces imposible. (Faccenda 2003)

La criticidad del sistema de alimentación cambia en función del tipo de equipo de fundición. El diseño del bebedero de alimentación es más crítico con los equipos tradicionales de fundición estática y un poco menos crítico con la fundición estática asistida por vacío. La dificultad del diseño del bebedero de alimentación disminuye aún más con la fundición asistida por presión y vacío, la evolución más reciente de la tecnología de las máquinas de fundición estática. La criticidad, se refiere al llenado de la forma en la fundición de metales, ya que el sistema de alimentación nunca es crítico para la inyección de cera. Por lo tanto, los bebederos de alimentación deben diseñarse cuidadosamente, en función del tamaño y la forma del objeto que se va a fundir. Dado que la contracción por solidificación, como característica física, es inevitable, los bebederos de

alimentación, además de permitir el llenado completo de la forma, deben ser capaces de "expulsar" la porosidad por contracción del objeto fundido.(Faccenda 2003)

Diseño del bebedero de alimentación

Básicamente, un sistema de bebederos de alimentación es un tubo o un conjunto de tubos por los que el metal debe fluir con la mayor suavidad posible. Las turbulencias deben reducirse en la medida de lo posible: por tanto, deben evitarse los cambios bruscos de sección transversal, los ángulos agudos, etc. La turbulencia en el metal líquido que fluye puede provocar el atrapamiento de gas y la porosidad de gas es el resultado del gas atrapado en la fundición. En todos los casos, las turbulencias provocan una caída de presión, lo que dificulta el llenado de la forma. Por lo tanto, es importante pensar en términos de mecánica de fluidos e intentar imaginar el comportamiento del metal líquido a medida que fluye hacia la cavidad que se va a rellenar.(Faccenda 2003)

Los modelos de geometría compleja o con cambios bruscos de sección transversal suelen beneficiarse de los bebederos de alimentación múltiple. Sin embargo, no siempre se obtienen los mejores resultados con un bebedero de alimentación múltiple en el modelo maestro porque, aunque el bebedero múltiple puede ser beneficioso durante la fundición, a veces no permite obtener patrones de cera de alta calidad, a diferencia de los que se obtienen con un bebedero de alimentación más simple. (Faccenda 2003)

Fabricación del molde de caucho

Una vez que se dispone de un patrón maestro, se puede fabricar un troquel de caucho y ponerlo en producción en cuestión de una o dos horas. Si posteriormente es necesario realizar modificaciones, éstas pueden llevarse a cabo rápidamente y a bajo coste. (Faccenda 2003)

Las matrices de caucho se fabrican en simples marcos rectangulares de aluminio que a veces se dividen horizontalmente en dos mitades iguales. En una de las mitades del marco del molde se coloca una lámina de goma. El modelo maestro se coloca sobre la goma, en el centro del marco, en un extremo se coloca de la entrada de inyección taladrado en el centro de uno de los lados.

Dependiendo de la forma del patrón, la goma puede recortarse para acomodarlo y las zonas huecas pueden rellenarse toscamente con trozos de goma. (Faccenda 2003)

Figura 10

Modelo puesto entre dos láminas de goma lista para vulcanizar



Nota: Tomado de *Handbook on investment casting*, (p.25), por Faccenda V., 2003

Con un bisturí quirúrgico, el bloque se corta en dos partes, a lo largo de la línea central de las caras estrechas, empezando por la entrada del bebedero que sobresale. Durante el corte, la goma se estira y se en zigzag desde el interior de cada esquina. Cuando se alcanza el patrón, se libera cortando a lo largo de una línea de separación predeterminada y donde sea necesario. (Faccenda 2003)

Figura 11

Modelo de cera producido por inyección en un molde de goma



Nota: Tomado de *Handbook on investment casting*, (p.25), por Faccenda V., 2003

Una vez completado el troquel, se realizan inyecciones de cera de prueba. A lo largo de los años se han introducido muchas mejoras y variaciones en la técnica para tratar modelos cada vez más complejos y simplificar la producción de troqueles rutinarios, (Faccenda 2003)

Producción de los modelos de cera

Se recomienda utilizar una cera con un intervalo de fusión estrecho. Es muy importante conocer lo mejor posible las características físicas de los distintos tipos de cera. La información sobre dureza, densidad, contenido de cenizas, viscosidad y dilatación térmica lineal y volumétrica es importante para hacer la elección correcta. (ASM Handbook Committee y ASM International 1978)

Ceras de fundición

La cera es el material base preferido para la mayoría de los modelos, pero rara vez se utilizan mezclas que contienen solo ceras. Las ceras generalmente se modifican para mejorar sus propiedades mediante la adición de materiales como resinas, plásticos, rellenos, plastificantes, antioxidantes y tintes. (ASM Handbook Committee y ASM International 1978)

Las ceras más utilizadas para los patrones son las parafinas y las ceras microcristalinas. Estos dos se usan a menudo en combinación porque sus propiedades tienden a ser complementarias. Las ceras de parafina están disponibles en grados estrechamente controlados con puntos de fusión que varían en incrementos de 2.8 °C; los puntos de fusión que van desde 52 a 68 °C son los más comunes. El bajo costo de estas ceras, combinado con su fácil disponibilidad, elección conveniente de grados, alta lubricidad y baja viscosidad de fusión, explica su amplio uso. Sin embargo, las aplicaciones están algo limitadas por su fragilidad y alta contracción. Las ceras microcristalinas tienden a ser muy plásticas y otorgan dureza a las mezclas de cera. Hay disponibles ceras duras no pegajosas y ceras adhesivas blandas. Las ceras microcristalinas están disponibles con puntos de fusión más altos que las parafinas y, a menudo, se usan en combinación con parafina. (ASM Handbook Committee y ASM International 1978)

Las ceras simples poseen muchas propiedades útiles, pero hay dos áreas importantes en las que son deficientes:

- Resistencia y rigidez, especialmente cuando es necesario realizar patrones muy frágiles.
- Control dimensional, especialmente con respecto a la cavitación superficial resultante de la contracción por solidificación durante y después de la inyección del patrón.

Se pueden hacer mejoras en estas áreas con aditivos no cerosos.

La resistencia y tenacidad de las ceras se mejoran mediante la adición de plásticos de alto peso molecular bien conocidos, como polietileno, etilcelulosa, nailon, etilvinilacetato y etilvinilacrilato; estos materiales son muy viscosos a las temperaturas de trabajo de la cera, lo que tiende a limitar las cantidades que se pueden utilizar. (ASM Handbook Committee y ASM International 1978)

Las resinas utilizadas para la reducción de la contracción tienen un peso molecular más bajo que los plásticos utilizados para el endurecimiento. Las resinas más útiles se ablandan gradual y continuamente con el aumento de la temperatura, y no muestran las grandes expansiones de sólido a líquido durante el calentamiento, o las contracciones inversas durante el enfriamiento, que caracterizan la transformación de sólido a líquido en las ceras. (ASM Handbook Committee y ASM International 1978) Así, las resinas reducen este efecto en proporción directa a la cantidad utilizada. La cantidad utilizada puede ser bastante grande porque las resinas producen masas fundidas de viscosidad relativamente baja a las temperaturas de procesamiento de la cera. (ASM Handbook Committee y ASM International 1978)

Patronaje de cera

La producción de patrones de cera múltiples se realiza invariablemente mediante alguna forma de inyección a presión de aire, con inyectores cuya capacidad varía entre unos 500 ml y varios litros. La temperatura de inyección de la cera es de unos 60°C, con una presión de aire de hasta 80 kN/m^2 . (ASM Handbook Committee y ASM International 1978)

Para la inyección manual, el troquel se sujeta firmemente entre dos placas planas y la abertura de inyección se presiona contra la boquilla accionada por resorte. Se dejan pasar unos segundos, en función del volumen del patrón, y después se libera la presión y se aparta el troquel para que se endurezca la cera. Los troqueles de caucho fabricados correctamente requieren poco tratamiento para facilitar el desprendimiento de la cera. Normalmente, sólo es necesario espolvorear ligeramente con talco. (Faccenda 2003)

Las inyectoras automáticas de vacío que evacúan la matriz antes de inyectar la cera se utilizan cada vez más en la fundición a la cera perdida y pueden accionarse presentando el troquel a mano, aunque las máquinas más sofisticadas sujetan y presentan automáticamente el troquel a la boquilla de inyección. (Faccenda 2003)

Aunque la mayor parte de la producción en serie se basa en el uso de matrices de caucho, existen muchas aplicaciones para patrones de fundición originales moldeados directamente en cera, ya sea para piezas únicas o para la producción de los patrones maestros de metal fundido. Las ceras duras que se suministran para este fin pueden serrarse, rellenarse, tallarse o incluso mecanizarse suavemente y su uso puede suponer un gran ahorro de chatarra de metales y de tiempo en la producción de piezas únicas o prototipos. (Faccenda 2003)

Montaje del árbol

Bases y bebederos

La base de goma para el árbol es el punto de partida para construir el árbol de cera. Debe seleccionarse con cuidado. Normalmente, la base de goma incluye la parte que se convierte en el botón del bebedero del árbol fundido.

Figura 12

Base de goma utilizado en la producción de joyas



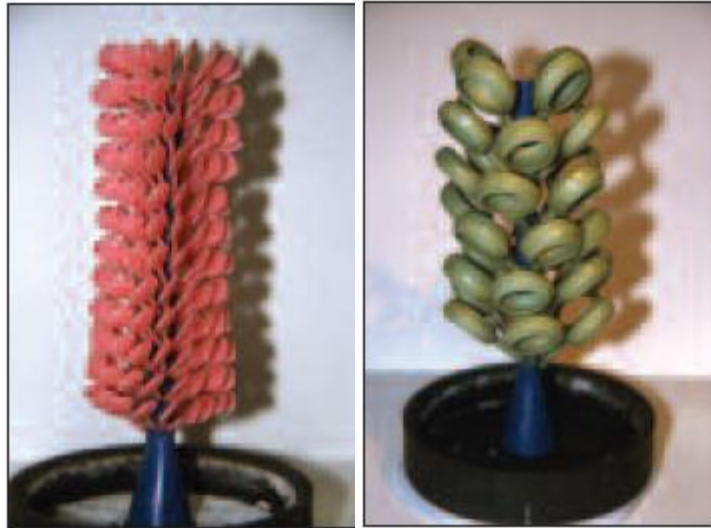
Nota: Tomado de *Handbook on investment casting*, (p.33), por Faccenda V., 2003

Se debe comprobar cuidadosamente que la base esté limpia y libre de residuos de revestimiento usado. Los residuos de revestimiento usado pueden alterar sensiblemente el tiempo de fraguado del nuevo revestimiento, lo que repercute en la calidad del molde. (Faccenda 2003)

Se considera mejor utilizar bebederos principales fabricados a partir de una cera con un intervalo de fusión inferior al de la cera de los patrones. De este modo, al desparafinar, el bebedero principal se fundirá primero y se evitará la generación de tensiones en el interior de la mufla revestida, cuando los patrones de cera comiencen a fundirse.(Faccenda 2003)

Diseño de árboles

En la medida de lo posible, se debe colocar en el mismo árbol modelos de cera de forma, tamaño y peso similares. Los modelos finos y los gruesos no deben fundirse en el mismo árbol. Si la temperatura es lo suficientemente alta como para que los modelos finos queden bien fundidos, la temperatura será demasiado alta como para que los modelos gruesos queden bien fundidos si se colocan juntos en el mismo árbol. (Faccenda 2003)

Figura 13*Árbol de fundición.*

Nota: Árbol homogéneo: a la izquierda patrones a finos a la derecha patrones gruesos. Tomado de *Handbook on investment casting*, (p.35 y 36), por Faccenda V., 2003

En general, cuando se incluyen diferentes modelos en el mismo árbol, los modelos finos o más ligeros deben colocarse en la parte superior del árbol, ya que la presión es mayor allí que cerca del botón del bebedero. Si los modelos finos no se llenan en la parte inferior del árbol, es posible que el bebedero de alimentación no sea lo suficientemente grande ni esté unido al bebedero principal de la mejor manera (presencia de constricciones) o que la temperatura del metal y/o de la mufla sea demasiado baja así los modelos que se funden bien a la misma temperatura de la cuba y del metal pueden mezclarse en el mismo árbol con modelos más difíciles en la parte superior y modelos fáciles de rellenar en la parte inferior. (Faccenda 2003)

Las uniones entre el bebedero principal y los bebederos de alimentación deben ser lisas y estar bien fileteadas. Deben evitarse cuidadosamente los estrechamientos en el punto de unión. Durante la fundición, el revestimiento sobresaldrá en esta unión y puede erosionarse o romperse por el flujo del metal líquido ya que estos fragmentos de revestimiento podrían obstruir el bebedero de alimentación y/o formar inclusiones no metálicas en las piezas fundidas.

Tradicionalmente, el ángulo entre el bebedero de alimentación y el bebedero principal se ha recomendado entre 45° y 60°. Más recientemente, se ha recomendado un ángulo mayor de 70° - 80° para la fundición estática en vacío. Los mejores resultados se obtienen cuando los modelos de cera se sueldan perpendicularmente al bebedero principal. Así se obtiene una doble ventaja: la solidificación tiene lugar de forma más direccional y la probabilidad de formación de porosidad por contracción en la pieza es menor y el escape del gas de la cavidad del molde es más fácil, porque hay una capa de revestimiento más fina que atravesar para llegar a la superficie exterior de la mufla. De este modo, se reduce la probabilidad de formación de porosidad por gas atrapado. (Faccenda 2003)

Por último, los árboles montados deben pesarse para determinar el peso de la cera (restando el peso de la base de caucho), ya que así se puede calcular la cantidad de metal para la fundición. Antes de invertirlos, los árboles pueden lavarse en agua con tensioactivos para eliminar el polvo atraído electrostáticamente.

Revestir el molde

Frascos

Los cilindros o "matraces" de acero se utilizan para contener el revestimiento. Se prefiere el acero inoxidable. Antes de utilizarlos, los cilindros deben limpiarse con un cepillo de alambre para eliminar todo rastro de revestimiento antiguo, ya que los residuos de revestimiento usado pueden reducir el tiempo de trabajo del nuevo revestimiento, lo que influye en la calidad del molde así el matraz se coloca alrededor del árbol de cera y se sella en su base. (Faccenda 2003)

Figura 14

Cilindros o cubiletes utilizados en la fundición por cera perdida de molde solido



Nota: Tomado de *Handbook on investment casting*, (p.36), por Faccenda V., 2003

Antes del llenado, los matraces perforados, utilizados en las modernas máquinas de fundición estática, deben envolverse o colocarse en fundas adecuadas, de caucho o de papel o plástico especial, para sellar los orificios hasta que el revestimiento esté completamente fraguado. En el caso de las cubetas macizas, utilizadas principalmente en las máquinas de fundición centrífuga, se recomienda utilizar una red de cera para facilitar la evacuación del gas durante la fundición. La red de cera debe colocarse cerca de la pared del matraz, y se retirará durante el desparafinado, dejando canales de escape para los gases presentes en las cavidades del molde. (Faccenda 2003).

Revestimientos

Al principio, los revestimientos dentales de yeso y sílice eran los únicos disponibles para las fundiciones de cera perdida con molde sólido. Éstos, al estar formulados para cumplir los difíciles requisitos de expansión de la odontología, eran caros y se fabricaban como lechadas muy espesas y de fraguado rápido. En EE. UU., sin embargo, algunas de las grandes empresas de suministros dentales empezaron a comercializar revestimientos de yeso/sílice adaptados a los requisitos de la joyería. Al no tener que cumplir los rigurosos requisitos de la odontología, estos revestimientos eran más baratos y los tiempos de fraguado se controlaban entre 5 y 10 minutos; tenían la suficiente

fluidez en las proporciones correctas de polvo y agua para permitir el revestimiento de grandes moldes de patrones complejos para ser completado cómodamente. (Beeley 1995)

Mezclar el revestimiento

El tiempo de fraguado es muy importante, porque es la base para realizar todas las operaciones que intervienen en la creación del molde. Si no se respeta el tiempo requerido, se producirán moldes débiles o deficientes, que darán lugar a diversos defectos, como marcas de agua, superficies arenosas y formación de aletas.

Técnica de revestimiento

Los revestimientos dentales son espesos y de fraguado rápido. Para evitar la formación de burbujas de aire en la superficie del modelo, el revestimiento se aplica a menudo con un pequeño pincel mientras el modelo y su soporte se mantienen en una pequeña mesa vibratoria. A continuación, el conjunto se coloca en un anillo metálico, en el que se hace vibrar al revestimiento para formar el molde completo. (Beeley 1995)

Con la mayor complejidad de algunos modelos, el mayor tamaño de las piezas fundidas y la necesidad de producir moldes en grandes cantidades, el revestimiento manual se volvió impracticable. La vibración de los moldes después de llenarlos con el revestimiento no era eficaz para desalojar el aire atrapado en los modelos complejos y, con las ceras quebradizas utilizadas inicialmente, a menudo provocaba la rotura de los modelos. El problema se resolvió mediante el tratamiento al vacío de la pasta de revestimiento inmediatamente después de mezclarla y de nuevo después de verterla en el anillo del molde. Una vez establecida la desaireación por vacío, apenas hubo cambios posteriores, salvo la ampliación para utilizar moldes más grandes y la introducción de la automatización. El progreso más significativo ha sido la comprensión del mecanismo de fraguado de los revestimientos de yeso y el reconocimiento de que era necesario un control estricto de la temperatura del agua de mezcla, el tiempo de mezcla y la manipulación del molde para obtener la máxima calidad del molde. (Beeley 1995)

El fraguado del revestimiento es una reacción química, por lo que está fuertemente influenciada por la temperatura tanto del agua como del polvo de revestimiento. Por lo tanto, es muy importante utilizar agua a la temperatura recomendada, normalmente unos 20°C, para garantizar un comportamiento uniforme del revestimiento. Los revestimientos realizados con agua demasiado caliente fraguarán más rápidamente. El agua demasiado fría ralentizará el fraguado y producirá moldes débiles y defectos como marcas de agua. En cuanto a la calidad del agua, es preferible utilizar agua desionizada, ya que las sustancias disueltas en el agua del grifo pueden alterar (alargar) sensiblemente el tiempo de fraguado. Hay que tener en cuenta que los fabricantes de polvo de revestimiento desarrollan sus polvos para utilizarlos con agua desionizada y sus consejos sobre su uso se basan en agua desionizada a 20°C. (Faccenda 2003)

La secuencia de pasos para invertir el matraz es la siguiente:

1. Pesar el polvo de revestimiento y el agua. Esto debe hacerse con precisión. Debe utilizarse una probeta para el agua y una balanza para el polvo.
2. Mezclar el polvo en el agua. Añada siempre el polvo al agua para garantizar una buena mezcla sin "grumos".
3. Aplicar vacío a la mezcla. Esto elimina el aire atrapado.
4. Llenado del matraz. Para llenar el frasco alrededor del árbol de cera
5. Vibración del matraz al vacío. Para eliminar los restos de burbujas de aire que puedan adherirse a la superficie de la cera y garantizar una buena reproducción de la superficie.
6. El matraz se deja reposar para la puesta a punto de la inversión, El revestimiento es débil en el punto de ajuste y se refuerza con el tiempo. Cualquier movimiento en esta fase puede agrietar el revestimiento.

Es importante seguir las recomendaciones del fabricante del revestimiento sobre la relación polvo/agua, los tiempos de mezcla, las temperaturas, etc. A título indicativo, los datos para un polvo de revestimiento con un tiempo de brillo de unos 9 minutos son:

1. Relación polvo/agua: 100:38
2. Tiempo de mezcla: unos 3 min.
3. Aspiración: aproximadamente 1,5 min.
4. Vertido de la mezcla en el matraz: 1,5 minutos aproximadamente.
5. Vacío y vibración del matraz: 2 min.

Tiempo total de trabajo: 8 min.(Faccenda 2003)

Este proceso es capaz de producir formas intrincadas, con partes que pesan desde 1 g hasta 35 kg a partir de una amplia variedad de metales y aleaciones ferrosas y no ferrosas. Los avances recientes incluyen la fundición de componentes de titanio para motores y marcos estructurales para aeronaves con paredes de 1.5 mm de espesor. (ASM Handbook Committee y ASM International 1978)

La fundición a la cera perdida tradicional tiene unos elevados costes de utillaje para producir modelos de cera. Como tal es prohibitivamente cara para la producción de bajo volumen, como la creación de prototipos o la producción de componentes personalizados o especializados; por otro lado las técnicas de prototipado rápido se están convirtiendo rápidamente en herramientas estándar en el diseño y la fabricación de productos. (ASM Handbook Committee y ASM International 1978)

Los procesos de prototipado rápido son capaces de convertir directamente un modelo CAD tridimensional en un modelo físico sólido. Aprovechando las ventajas de las tecnologías informáticas de hardware y software, los datos CAD de un objeto tridimensional se cortan en muchas capas bidimensionales que pueden fabricarse y unirse a las capas anteriores, una a una secuencialmente. (Prasad 2012)

Proceso de desparafinado

Tras el fraguado completo del revestimiento, es decir, entre 1 y 2 horas después del llenado de la cubeta, debe retirarse la cera de los modelos, para vaciar las cavidades del molde donde se verterá el metal líquido.

El desparafinado puede realizarse de dos formas: en seco; es el método más antiguo, o mediante vapor. El desparafinado en seco suele realizarse en el horno de calcinación como parte del ciclo de calcinación, pero puede hacerse en un horno de desparafinado separado, antes del ciclo de calcinación principal. En un principio, el desparafinado con vapor se introdujo por razones ecológicas, para evitar la contaminación atmosférica provocada por el humo generado por la combustión de cera a gran escala, más tarde se ha visto que el desparafinado con vapor puede mejorar la calidad del producto al reducirse la porosidad del gas en las fundiciones. (Faccenda 2003)

Las investigaciones realizadas sobre este tema han demostrado que existen dos tipos de porosidad gaseosa: por gas atrapado y por gas de reacción. El primer tipo procede del gas presente en la cavidad del molde, en combinación con las turbulencias del metal durante la fundición; el segundo tipo procede de la descomposición del sulfato de calcio (aglutinante del revestimiento), que produce dióxido de azufre gaseoso, que permanece en gran medida en el metal que rellena el molde. (Faccenda 2003). En condiciones normales, esta reacción de descomposición comienza en torno a los 1140°C, pero se acelera por la sílice y, aún más, por sustancias reductoras como los residuos carbonosos de la cera. En este caso, la temperatura de descomposición del sulfato de calcio desciende hasta valores próximos a la temperatura de revestimiento en el momento de la fundición. (Faccenda 2003)

Figura 15

Evidencia de la penetración de la cera en la porosidad del revestimiento durante el desparafinado en seco (halos más pálidos).



Nota: Tomado de *Handbook on investment casting*, (p.41), por Faccenda V., 2003

En el desparafinado en seco, la cera impregna los poros de la superficie del revestimiento, figura 16 y es difícil eliminarla por completo. Así, durante el quemado se forman residuos carbonosos que favorecen la descomposición del sulfato cálcico tanto durante el quemado, con reducción de la resistencia del revestimiento, como durante la fundición, con formación de porosidad gaseosa. Por el contrario, con la desparafinación por vapor, la humedad satura la porosidad del revestimiento e inhibe la absorción de cera. Por tanto, se reduce la probabilidad de descomposición del sulfato cálcico. Por este motivo, desde hace algún tiempo se prefiere o, al menos, se recomienda la desparafinación con vapor.(Faccenda 2003)

Independientemente del método de desparafinado preferido, no debe permitirse que la cubeta se enfríe entre el desparafinado y el quemado; el revestimiento sufrirá tensiones térmicas y disminuirá su resistencia.(Faccenda 2003)

Quemado y vertido

El quemado, como su nombre indica, se realiza para quemar los últimos restos de cera y conferir al molde de revestimiento la refractariedad y las características necesarias para la fundición. Las características finales del molde dependerán en gran medida del ciclo de quemado seleccionado y, en particular, de la velocidad de calentamiento y la homogeneización de la temperatura en los periodos de mantenimiento. Por lo tanto, es importante seguir con precisión el ciclo de quemado recomendado por el fabricante del revestimiento. (Faccenda 2003)

El ciclo del quemado

Hay dos puntos críticos en el ciclo de calentamiento. El primero se produce a unos 100-120°C, cuando se evapora el agua absorbida y parte del agua de cristalización del yeso. Se trata de un proceso lento, que tiene lugar con contracción del volumen. Por lo tanto, la temperatura debe aumentarse lentamente, para evitar la creación de tensiones que podrían causar grietas en el molde, con la consiguiente formación de aletas en los artículos fundidos (Faccenda 2003), Figura 16.

Figura 16

Aletas en anillos de fundición, causadas por grietas en el revestimiento



Nota: Tomado de *Handbook on investment casting*, (p.42), por Faccenda V., 2003

El segundo punto crítico se sitúa en torno a los 250°C. En este caso, la temperatura debe mantenerse constante durante el tiempo suficiente para que la transformación se produzca de manera uniforme en todo el molde. (Faccenda 2003)

Por último, con el revestimiento aglomerado con yeso, no se debe superar la temperatura máxima de 750°C. Por encima de 750°C (1382°F), debido a la presencia de sílice, puede iniciarse la descomposición del sulfato de calcio, con la consiguiente degradación de la resistencia del revestimiento. Esto puede dar lugar a la formación de una superficie arenosa en las fundiciones, Figura 17.(Faccenda 2003)

Figura 17

Superficie arenosa en una pieza de fundición, causada por el desmoronamiento del revestimiento durante fundición



Nota: Tomado de *Handbook on investment casting*, (p.43), por Faccenda V., 2003

Por otro lado, para garantizar una combustión completa de los residuos carbonosos dejados por la cera, deberíamos superar los 690°C. Un compromiso casi universalmente aceptado da 730°C como temperatura máxima de combustión; con lo dicho se desprende claramente el papel fundamental de la temperatura. Por lo tanto, es muy importante comprobar periódicamente el equipo de control de temperatura del horno de calcinación con un termopar calibrado.(Faccenda 2003)

Es muy importante mantener el matraz a la temperatura de mantenimiento el tiempo suficiente para equilibrar la temperatura en todo el volumen del molde. El revestimiento es un mal conductor del calor. Las mediciones de temperatura realizadas insertando termopares en distintos puntos de los moldes han demostrado que, independientemente del nivel de temperatura, se necesitan al menos 1 ½ horas para que el centro del molde alcance la temperatura del horno. Lo

mismo ocurre con la parte de calentamiento y la parte de enfriamiento del ciclo de quemado. No se debe dejar que los matraces se enfríen a temperatura ambiente durante el ciclo de quemado y luego recalentarlos. Se agrietarán y serán de mala calidad. (Faccenda 2003)

La atmósfera del horno debe ser fuertemente oxidante, para garantizar la combustión completa de los residuos carbonosos. Por la misma razón, debe evitarse el llenado excesivo del horno con matraces que se toquen entre sí. Debe dejarse espacio suficiente para que circule el aire entre los matraces. Es importante recordar siempre seguir el ciclo de quemado recomendado por el fabricante del revestimiento. (Faccenda 2003)

Fundición de metal

Básicamente, existen tres métodos de fusión: el soplete de gas, el horno eléctrico de resistencia y el calentamiento por inducción. El soplete es el método más antiguo y se utiliza poco en las fábricas modernas. Se prefiere el propano o el gas natural para calentar, supuestamente porque dan una llama más limpia que el acetileno. La llama para fundir debe ser reductora: una llama reductora tiene un contorno irregular, es azul brillante y hace poco ruido; una llama reductora tiene un bajo contenido de oxígeno, por lo que capta el oxígeno de la atmósfera circundante y protege la masa fundida de la oxidación. (Faccenda 2003)

El calentamiento por resistencia eléctrica se ha utilizado en gran medida para la fusión hasta la introducción más reciente del calentamiento por inducción. El calentamiento por resistencia permite trabajar en un entorno cerrado, donde es posible controlar la atmósfera; la fusión puede realizarse en gas inerte (nitrógeno o argón) o en atmósfera ligeramente reductora (gas formador). (Faccenda 2003)

El calentamiento por inducción es el método más moderno y se utiliza en casi todas las máquinas de fundición de última generación. La fusión por inducción es muy rápida e induce la agitación del metal fundido, con una rápida homogeneización térmica y química. (Faccenda 2003)

La fusión es probablemente la etapa de la fundición a la cera perdida con mayor contenido "metalúrgico". Por ello, es muy importante seguir algunas normas o directrices básicas.

1. Antes de la fusión, hay que calcular la cantidad necesaria de aleación de metal: el peso del árbol de cera multiplicado por la densidad de la aleación da el peso mínimo de aleación necesario para la fusión. Se añadirá una cantidad adicional de aleación para tener en cuenta el botón del bebedero.
2. La cantidad de chatarra reciclada en la carga de fusión debe mantenerse al mínimo, pero nunca debe utilizarse más del 50% de chatarra para la carga.
3. La chatarra que se vaya a refundir debe estar perfectamente limpia y exenta de óxidos y residuos de revestimiento.
4. Es preferible utilizar aleaciones granuladas. Cuando se utilice chatarra procedente de operaciones anteriores, se recomienda refundirla y granularla antes de utilizarla para la fundición.
5. La masa fundida debe agitarse después de la fusión para garantizar una homogeneización completa. En las modernas máquinas de fundición calentadas por inducción, la agitación se induce por interacción electromagnética. En los hornos abiertos, calentados por soplete o resistencia eléctrica, la agitación debe hacerse manualmente con una varilla refractaria adecuada, para evitar la contaminación de la masa fundida.
6. El metal debe mantenerse en estado fundido el menor tiempo posible, para limitar la oxidación y la pérdida de elementos de aleación por evaporación.
7. Antes de la fundición, el metal fundido debe calentarse a una temperatura superior a la temperatura de fusión de la aleación (recalentamiento). La cantidad necesaria de recalentamiento depende de la aleación, del tipo de piezas a fundir y también del equipo de fundición. En todos los casos, el grado de recalentamiento debe mantenerse lo más bajo posible: puede oscilar entre unos 50°C con un crisol de colada inferior en

una máquina de fundición moderna y normalmente 75- 100°C en un crisol de colada superior abierto.

Vertido del metal

En las modernas máquinas de fusión/fundición, el vertido del metal fundido en el molde se realiza automáticamente. La fusión y la fundición son controladas por la máquina mediante un software específico. En la mayoría de las máquinas estáticas actuales, el vertido se realiza a través del fondo del crisol, por lo que la pérdida de temperatura del metal se reduce al mínimo. Si la máquina tiene un crisol basculante, debe tenerse en cuenta una pérdida de temperatura adicional de hasta 80-100°C al determinar la temperatura de fundición de la aleación fundida (es decir, la cantidad de recalentamiento). Las temperaturas del metal líquido y de la mufla deben mantenerse lo más bajas posible para minimizar la formación de defectos, en particular la porosidad del gas. Por lo tanto, antes de iniciar la producción de nuevos artículos, debe realizarse una serie de pruebas para encontrar la temperatura óptima del sistema; el término "temperatura del sistema" se utiliza para indicar el conjunto formado por las temperaturas del metal fundido y de la mufla. (Faccenda 2003)

La solidificación comienza inmediatamente después de que el metal líquido haya llenado la cavidad del molde. La diferencia de temperatura entre el metal líquido y la mufla es siempre considerable (unos 400°C o más). Por lo tanto, el metal líquido que llena la cavidad del molde empezará a solidificarse a partir de la superficie del molde de revestimiento, y la solidificación avanzará rápidamente hacia la parte interior del modelo. Si el árbol se ha montado correctamente, a lo mejor con los modelos formando un ángulo de 90° con el bebedero principal, si los bebederos de alimentación se han diseñado adecuadamente y si se ha utilizado un bebedero principal del diámetro adecuado para que funcione correctamente, sin exceder su función de depósito de calor, la solidificación se producirá en dirección hacia el bebedero y la porosidad de contracción se acumulará en el bebedero principal y en el botón del bebedero. (Faccenda 2003)

Si, por el contrario, hay contracción o porosidad gaseosa en las piezas fundidas, los parámetros del proceso deben modificarse de forma racional, tras considerar debidamente la situación. Hay que tener en cuenta las siguientes observaciones:

1. La temperatura del sistema es específica de cada patrón. A la hora de considerar qué patrones pueden estar en el mismo árbol, debe tenerse en cuenta la relación superficie/volumen, no sólo el grosor de la sección transversal.
2. Cuando el patrón tiene mucha superficie y poco volumen (patrones finos), la influencia de la temperatura del matraz es mayor que la de la temperatura del metal. A medida que el volumen aumenta en relación con la superficie (patrones gruesos), la influencia de la temperatura del matraz en la temperatura del sistema disminuye.
3. La temperatura del sistema depende de la aleación. La temperatura de fundición de un metal tiene que ser superior a la temperatura de liquidus y, dado que las distintas aleaciones se funden a temperaturas diferentes, las temperaturas de fundición también variarán. Para una aleación en particular, la temperatura de fundición será generalmente más baja para los modelos de sección gruesa y más alta para los modelos de sección fina, pero en todos los casos la temperatura de fundición del metal está fuertemente influenciada por el tamaño, la forma y el punto de fijación del bebedero de alimentación. Unos bebederos mejor diseñados permitirán una fundición a una temperatura más baja del sistema. (Faccenda 2003)

Enfriamiento y recuperación de las piezas fundidas

Cuanto mayor sea la temperatura de enfriamiento de la mufla de fundición, más fácil será la recuperación del árbol de fundición. El revestimiento se desmorona a causa del choque térmico. El árbol recuperado debe limpiarse a fondo de los residuos de revestimiento adheridos a su superficie. La limpieza se realiza con pistolas de agua a alta presión o mediante chorro de arena húmedo.(Faccenda 2003)

Tras el secado, el árbol de fundición se somete a una inspección visual. Los posibles defectos, como llenado incompleto, contracción o porosidad por gas, etc., deben describirse con precisión y debe registrarse la posición de las fundiciones defectuosas en el árbol. Cuanta más información se recoja sobre los defectos, mayor será la probabilidad de poder explicar lo ocurrido y adoptar medidas correctoras. (Faccenda 2003)

El siguiente paso es cortar las piezas de fundición del bebedero principal. Esto puede hacerse con cortadoras manuales o neumáticas que eliminan en gran medida el esfuerzo físico. (Faccenda 2003)

Diseño y fabricación

Generación de modelo computacional de TPMS

Para obtener una geometría TPMS generada de manera por un computador y delimitada dentro de un dominio definido, es necesario combinar superficies y entender las relaciones de los parámetros dentro de sus ecuaciones.

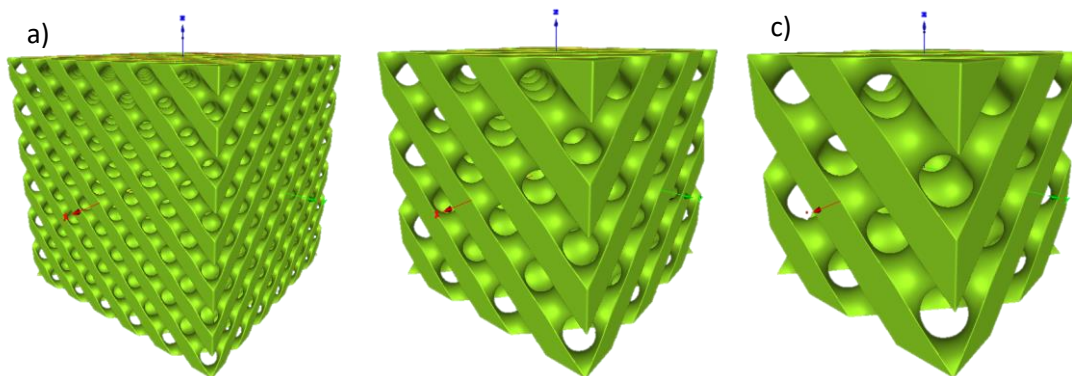
Para combinar dos o más superficies es necesario el uso de operaciones booleanas, para superficies. Las operaciones booleanas son: unión, intersección y sustracción.

En el trabajo de tesis de Iván Trujillo (Trujillo 2023), él pudo crear códigos para TPMS tipo diamante, primitiva y giroide en MathMod delimitadas en un dominio cúbico elegido por el usuario. (ver apéndices B, C y D).

Los parámetros que se varían son L que es la longitud de la celda unidad y n que es la porosidad de la TPMS.

Figura 18

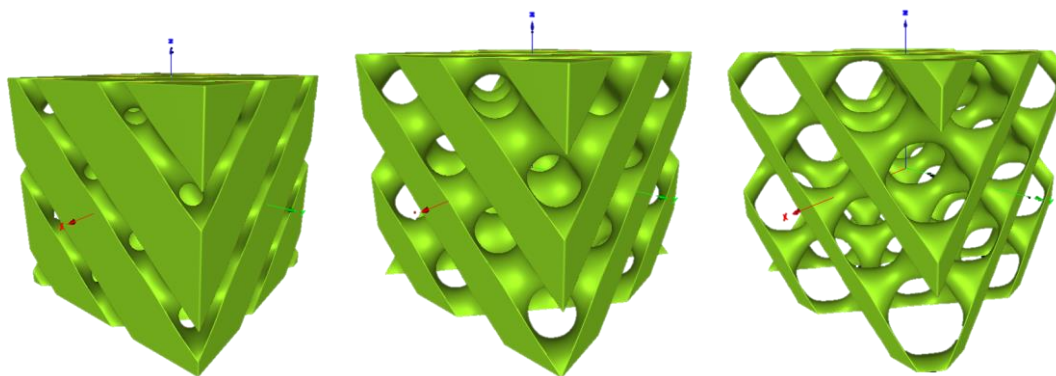
TPMS tipo diamante con L (longitud de celda unidad) diferente: a) $L=5$, b) $L=10$, c) $L=15$



Nota: Mientras más pequeñas es la longitud de la celda unidad (L) la sección de los canales de la TPMS se reduce.

Figura 19

TPMS tipo diamante con n (porosidad) diferente: a) $n=0.2$, b) $n=0.5$, c) $n=0.8$



El parámetro de la longitud del cubo donde se delimita la TPMS también se puede variar, pero para este trabajo se dejó en un valor de 30 mm para ahorrar material en la impresión 3D.

Selección de materiales para intercambiadores TPMS.

La selección de materiales consiste en buscar la mejor correspondencia entre los requisitos del diseño y las propiedades de los materiales que pueden utilizarse para realizarlo (Ashby 2011)

Para seleccionar un material, Ashby propone una metodología que consta de 4 pasos:

- Traducción: Transformar los requisitos del diseño en restricciones y objetivos relacionadas con propiedades físicas de los materiales.
- Filtrado: Seleccionar los materiales que cumplen con los requisitos del diseño.
- Clasificación: Ordenar los materiales candidatos en base a un criterio de excelencia.
- Documentación: Indagar a mayor profundidad el material y lo factible de su uso.

Es este trabajo para la selección de materiales se estableció como problema para el diseño lo siguiente: existen muchos procesos industriales que llegan a desperdiciar cientos de exajulios de energía anualmente en forma de emisiones de calor de baja temperatura (entre 50°C y 250 °C) y reciclar esta energía resulta muy costoso utilizando métodos convencionales. Los disipadores de calor con estructura TPMS aumentan el área de superficie y/o modulan las corrientes de flujo de aire.(Attarzadeh et al. 2021). Por ello en este trabajo se buscó seleccionar materiales para un intercambiador de calor basado en una estructura TPMS que sea apto para la fundición por cera perdida.

Un intercambiador de calor basado en estructura TPMS se somete a 2 tipos de transferencia de calor. El primero es la conducción que se da por el contacto entre la fuente de calor y la TPMS y la segunda la de convección que se da entre la TPMS y el fluido que transita a través de sus poros. La segunda al depender del fluido que circulará a través de la TPMS no se tomará en cuenta y la selección de materiales se concentrará en la primera forma de transferencia de calor (por conducción).

A continuación, se presenta un cuadro resumen de la etapa de traducción para este problema

Tabla 2

Etapa de traducción del problema de selección de material para el intercambiador TPMS.

Traducción	
Función	Transferir la mayor cantidad de calor desde una base caliente hacia la estructura TPMS.
Restricciones	No negociables Alto coeficiente de conductividad térmica Bajo coeficiente de expansión térmica Buena colabilidad para la fundición Disponibilidad en Ecuador Negociables
Objetivos	Económico Temperatura máxima de servicio al menos de 300 °C Maximizar la relación entre la conductividad térmica y el coeficiente de expansión térmica pues ayudaría tanto para el tema de la expansión del material durante el tiempo de empleo del intercambiador como la contracción que sufre el metal al pasar de estado líquido a sólido durante el proceso de solidificación.
Variables libres	Selección del material. Fabricación Fundición a la cera perdida

Para alcanzar los objetivos es necesario encontrar un índice del material. El flujo de calor hacia una pared por convección (W/m^2) se describe mediante la ecuación de transferencia de calor:

$$q = h * \Delta T$$

Donde h es el coeficiente de transferencia de calor y ΔT es la caída de temperatura a través de la superficie desde el fluido hacia la pared (Bergman, Lavine, y Incropera 2017). La conducción se describe mediante la ecuación de conducción (o de Fourier), que, para el flujo de calor unidimensional, toma la forma.

$$q = \lambda \frac{\Delta T}{x}$$

donde λ es la conductividad térmica de la pared (grosor x) y ΔT es la diferencia de temperatura a través de ella (Bergman et al. 2017). La continuidad del flujo de calor requiere la resistencia $1/U$ para lo cual se calcula de la siguiente manera:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h} + \frac{x}{\lambda}$$

donde U se llama el "coeficiente de transferencia de calor total".

El número de Biot es un número adimensionales que se utilizan para encontrar el coeficiente de transferencia de calor por convección entre la pared o el cuerpo sólido y el fluido que fluye sobre el cuerpo (Ashby 2011). Esta formulado como

$$B_i = \frac{hL_c}{\lambda}$$

Donde B_i es el número de Biot que se usa para sólidos, h el coeficiente de transferencia de calor, λ la conductividad térmica y L_c una longitud característica del solido.

De aquí se obtiene que

$$h = \frac{B_i \lambda}{L_c}$$

Reemplazando en el coeficiente de transferencia de calor total se obtiene:

$$U = \frac{B_i \lambda}{L_c + B_i x}$$

El flujo de calor viene dado por

$$q = U \Delta T$$

La expansión térmica viene dada por

$$\alpha = \frac{1}{x} \frac{\Delta x}{\Delta T}$$

Despejando ΔT

$$\Delta T = \frac{\Delta x}{\alpha x}$$

Reemplazando

$$q = \frac{\lambda}{\alpha} \left(\frac{B_i \Delta x}{L_c x + B_i x^2} \right)$$

Nuestro objetivo es seleccionar un material para maximizar el flujo de calor total por unidad de área:

$$Q = qA$$

$$\frac{Q}{A} = q$$

$$\frac{Q}{A} = \frac{\lambda}{\alpha} \left(\frac{B_i \Delta x}{L_c x + B_i x^2} \right)$$

De donde podemos observar que el término que describe la propiedad térmica es λ/α . El cual se buscó maximizar

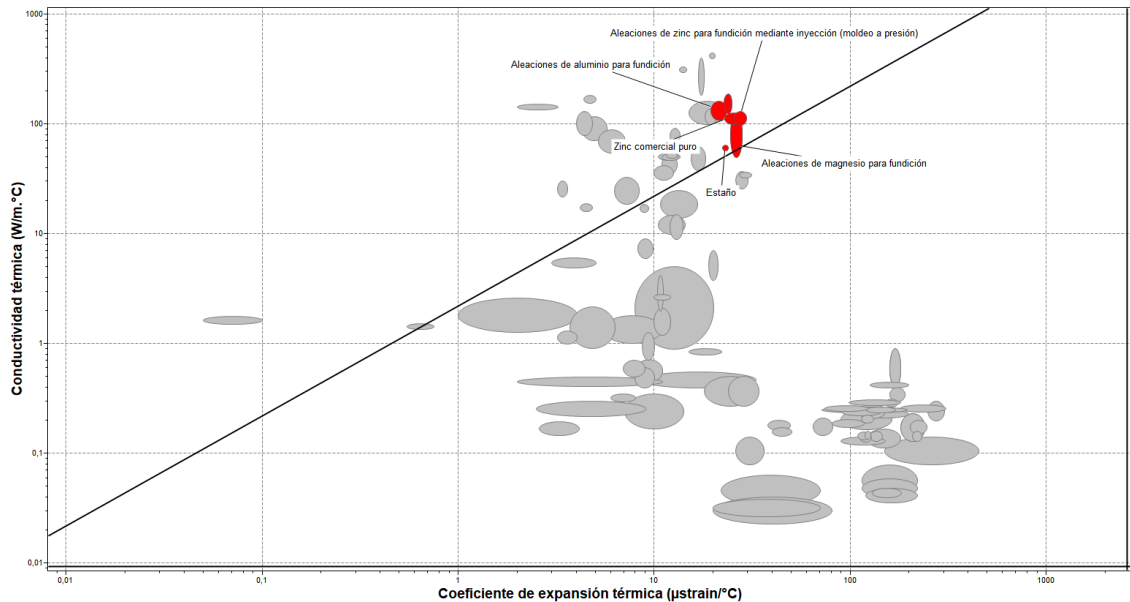
Se usó el software CES edupack para obtener el filtrado de los materiales. Se utilizó una base de datos de nivel 2 debido a que materiales específicos es difícil hallar en el mercado ecuatoriano.

La primera restricción aplicada fue la colabilidad del material. En una escala de 1 a 5 donde uno es proceso no recomendado y 5 excelente procesabilidad, se eligió un valor de 5 para trabajar con los materiales más usados en fundición.

Luego se busca los materiales que maximicen el índice del material y con una limitación que tengan un punto de fusión no mayor a los 1000 °C para poder realizar la fundición fácilmente. Así se obtuvo el siguiente gráfico.

Figura 20

Gráfico de conductividad térmica vs. Coeficiente de expansión térmica materiales aplicando filtros de colabilidad y temperatura de fusión menor a 1000 °C



Los materiales filtrados son 5 que se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 3

Materiales preseleccionados para el intercambiador TPMS

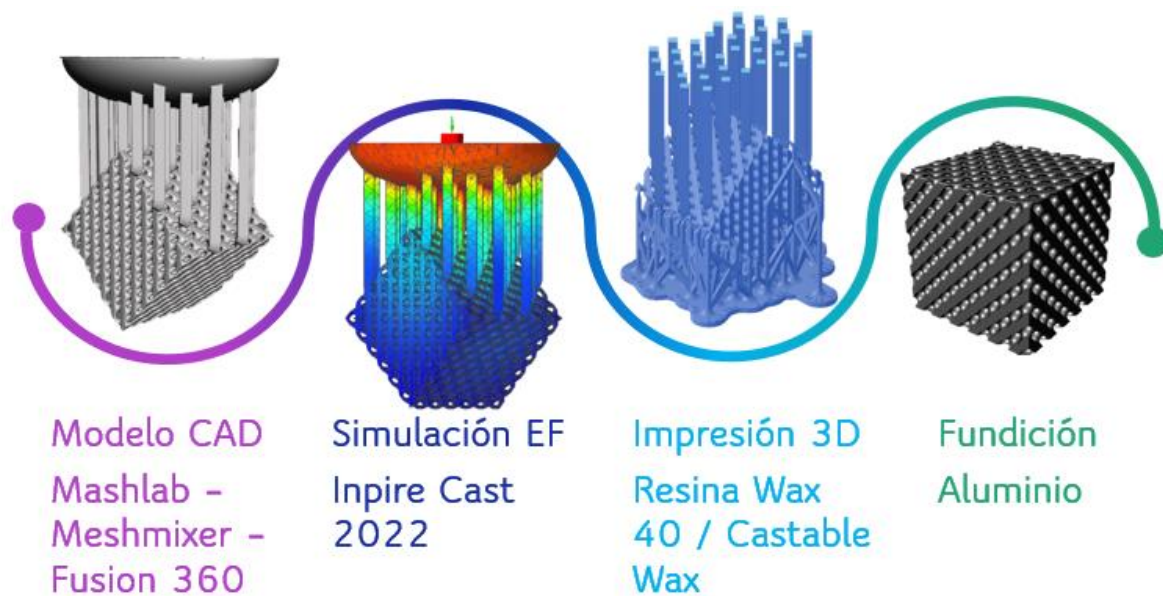
Materiales	Conductividad térmica ($\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$)	Coeficiente de expansión térmica ($\frac{\mu strain}{^\circ C}$)	Índice de material $\frac{\lambda}{\alpha}$	Costo aprox.* \$/kg	Relación costo vs índice de material
Aleaciones de aluminio	162	23.3	6.95	2.56	0.368
Aleaciones de magnesio	125	28	4.46	2.58	0.578
Aleaciones de zinc	129	29.3	4.40	3.90	0.886
Estaño	61.5	23.5	2.61	18.7	7.164
Zinc puro	125	28	4.46	2.77	0.621

Por último, se seleccionó el material con menor relación costo vs índice del material, así se decidió utilizar una aleación de aluminio para fundición que es relativamente sencillo de encontrar en el mercado nacional.

Consideraciones para la fabricación de los intercambiadores TPMS

Figura 21

Fases principales del proceso de fabricación.



Procesamiento computacional de la TPMS

Una vez obtenido la malla superficial de la TPMS con el programa MathMod que es un software de graficación matemática que permite graficar superficies descritas mediante ecuaciones paramétricas o implícitas, está distribuido mediante la licencia GNU GPL-2.0 (Abderrahman 2016) . Los archivos se exportaron en archivo TrianglesWaveFront.obj.

Se utilizó el Meshlab para refinar la malla de la TPMS y se aplicaron los siguientes filtros:

- Invert fase orientation
- Remove duplicate faces
- Remove duplicate vértices

- Remove T-vertices
- Remove unreferenced vértices
- Remove zero area faces
- Repair non manifold edges
- Remashing: Isotropic Explicit Remeshing

Desde Meshlab se exportó la TPMS como archivo obj.

Diseño del sistema de alimentación

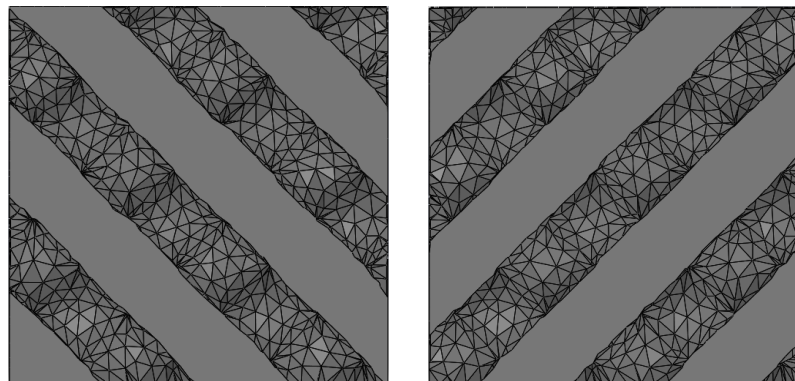
Orientación del sistema de alimentación

Para elegir la disposición de los alimentadores se tuvo que encontrar la orientación en la que la TPMS permitía un mejor paso al metal líquido y así tuviera la menor resistencia y evitar fallos como el desmoronamiento del molde al momento de ingresar el metal. Si existen varios obstáculos esto provoca turbulencias en el metal.

Se tomó como orientación a 0° la disposición que se muestra en la figura 23. En esta figura se puede ver que los canales por los que entraría el metal tienen una inclinación a 45° lo que provocaría turbulencias y probablemente afectaría el molde

Figura 22

TPMS con orientación a 0°.

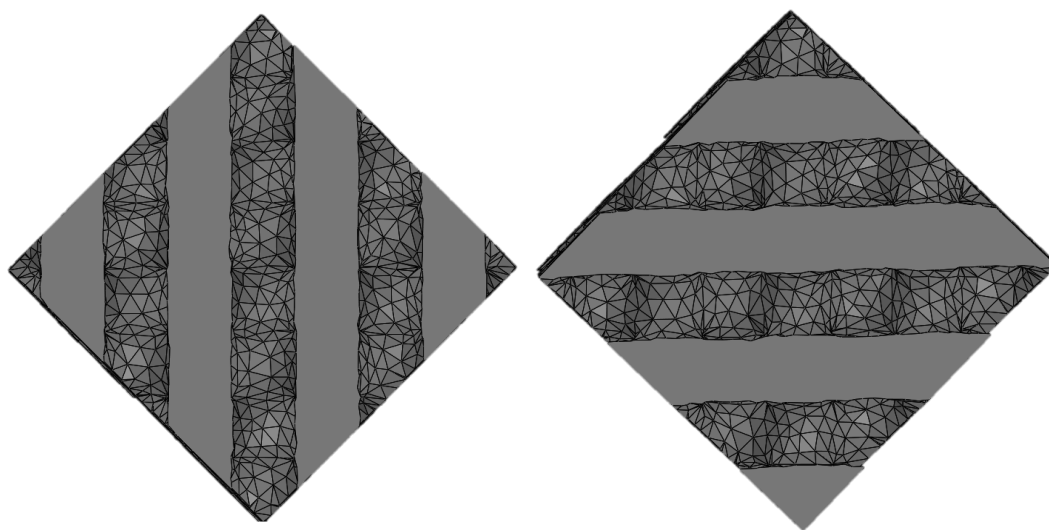


Nota. Los canales internos en esta posición presentan una inclinación a 45° lo que contribuye a que se genere turbulencia en el metal fundido.

En la figura 23 se tiene una orientación de 45° de la TPMS y aquí los canales presentan una disposición de 90° y 0° . Los canales a 0° u horizontales no son recomendados para la alimentación ya que no ayudarían a alimentar las partes más bajas de la pieza, pero los canales a 90° tienen la ventaja de presentar un camino sin resistencias para el metal fundido y no formarían turbulencias al ingresar el metal. La desventaja de esta orientación es que solo se podrían aprovechar los canales a 90° .

Figura 23

TPMS con orientación a 45° .



Nota. Con una orientación a 45° los canales internos tienen posiciones horizontales y verticales. Los canales horizontales ayudan a disminuir el riesgo de turbulencia del metal líquido.

A pesar de no poder utilizar todos los canales disponibles de la pieza se eligió la orientación a 45° de la TPMS, para no tener problemas de turbulencia dentro del molde y tener un llenado más homogéneo.

Otro parámetro muy importante para la fundición es el número de alimentadores, que son los canales por donde el metal líquido se vierte hasta llegar a la cavidad de la pieza. Un número inadecuado de alimentadores acarrea varios problemas de fundición, como contracciones del metal, encogimiento de esquinas, porosidad, desgarros en caliente, cierres en frío, etc.

Proceso de diseño del sistema de alimentación.

Se siguió la metodología de diseño propuesta por (Prasad 2012). Que se detalla a continuación:

Primero se explica el método del módulo

Basándose en los conceptos originales de Chvorinov y posteriormente elaborados por Wlodawer, se han formulado reglas para determinar el tamaño adecuado del alimentador para las piezas fundidas.

El módulo se define como la relación entre el volumen y la superficie de enfriamiento de la pieza (que está en contacto con el molde) o del alimentador.

$$M = V/CS$$

Donde, V es el volumen de la fundición, y CS es la superficie de enfriamiento.

El módulo, también denominado alternativamente "módulo de enfriamiento" o "módulo de solidificación", relaciona la cantidad de calor almacenada en la colada o el alimentador (el componente de volumen) con la tasa de disipación de calor (a través de la superficie de enfriamiento). Numerosas observaciones experimentales han demostrado que el tiempo medio de solidificación en las fundiciones de numerosas aleaciones es proporcional al cuadrado del módulo.(Prasad 2012)

En el método del módulo, se han postulado dos reglas para calcular el tamaño adecuado del alimentador:

1. La primera regla garantiza que el alimentador es "térmicamente adecuado", que se congela adecuadamente más tarde que todas las secciones de fundición que se alimentan:

$$M_f = k \times M_c$$

donde, k se identifica como la relación de solidificación y M_f y M_c son los módulos del alimentador y de la fundición respectivamente. La relación de solidificación " k " se fija inicialmente en un mínimo de 1,2, tanto para las aleaciones de corto como de largo alcance de solidificación.

2. La segunda regla garantiza que el alimentador es "volumétricamente adecuado", que el alimentador tiene un volumen adecuado de líquido de alimentación para suministrar a las secciones de fundición que se alimentan:

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

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

Importante:

- i. β se compone de las dos primeras etapas de contracción de la aleación, a saber, $\beta = \beta_L + \beta_F$, donde β_L , el volumen de contracción del líquido es del orden del 1% del volumen total del líquido, por 180 °F (100 °C), y β_F es la contracción por solidificación de la aleación, varía de 0 a 6.5%, y
- ii. η se encuentra empíricamente en alrededor del 18% bajo condiciones normales de fundición; y puede ser incrementado sustancialmente (por lo tanto, reduciendo correspondientemente el tamaño de alimentador requerido) con cambios específicos en las condiciones del proceso realizados para mejorar los gradientes

locales de temperatura, como con la conicidad de la fundición, los gradientes aplicados al molde, o el aislamiento cerámico selectivo del molde.

Dimensionamiento de los elementos de alimentación

Paso 1. Número de alimentadores: Establecer a partir del diseño de la fundición si la alimentación direccional de toda la fundición podría obtenerse con un solo alimentador. Calcular los módulos de solidificación (V/CS) de la(s) sección(es) que deben ser alimentadas por separado. Excluir el cálculo de todas las secciones "parásitas" (secciones de fundición más delgadas -como los salientes- alimentadas por secciones adyacentes más gruesas) unidas a las partes de alimentación. Excluya las superficies no refrigerantes (superficie de fundición no orientada hacia el molde) en el cálculo del módulo. Para las secciones complejas, aplique el principio de sustitución de formas.

Paso 2. Forma y ubicación de los alimentadores: Seleccione la forma y la ubicación del alimentador. Verifique que los elementos del sistema de compuertas que participan en el flujo de alimentación también obedecen las reglas del módulo de solidificación.

Paso 3. Volumen del alimentador a partir del tiempo de solidificación: Calcular el volumen del alimentador a partir de: $M_f = k \times M_c$, donde los módulos de solidificación, M_c , se obtienen a partir del paso 1, mientras que el valor de "k" se selecciona de manera empírica partiendo de un valor de 1.2 la forma del alimentador a partir del paso 2.

Paso 4. Volumen del alimentador a partir del criterio volumétrico: Comparar el volumen del alimentador obtenido a partir del paso 3 con el derivado de: $V_f = V_c \times \left(\frac{\beta}{\eta} - \beta\right)$. donde V_c es el volumen total de todas las piezas, incluidas las secciones parásitas, que se alimentan a partir de un único alimentador, β es el porcentaje de contracción total (líquido y solidificación) y η es el factor de líquido de alimentación disponible, por ejemplo, el porcentaje de entrega de volumen de alimentación de un alimentador.

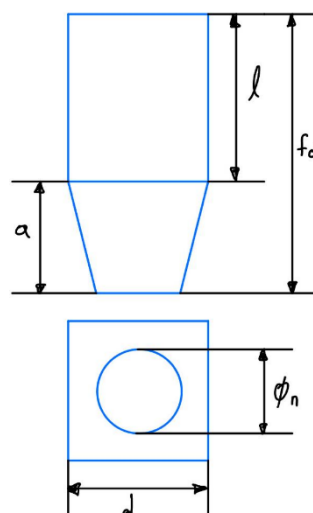
Paso 5. Cuello del alimentador: Calcule las dimensiones del cuello del alimentador a partir de: $M_n = k_n \times M_c$, donde el valor de k_n y la forma del cuello se seleccionan del paso 2. Nota: k_n puede fijarse inicialmente en 1,1.

Paso 6. Distancia de alimentación: Finalmente, calcular la distancia de alimentación, f_d de cada alimentador a partir de la ecuación, $f_d = 10 \times t$. donde t es el espesor de la sección del pieza a fundir.

Sin embargo, esta metodología aplicada a las estructuras TPMS no resultó factible por lo que bajo los mismos principios se modificó este procedimiento. Tomando en cuenta que la TPMS es una estructura periódica se asumió que se puede dividir en secciones iguales y con ello se buscó encontrar una expresión matemática que nos dé el número de canales necesarios para la alimentación de la pieza. En base a la siguiente figura para calcular el tamaño y forma del alimentador. Se asume un cuello de alimentador cónico y el cuerpo de alimentador como un paralelogramo.

Figura 24

Forma y dimensiones del alimentador para la fundición.



Nota. l es el largo del alimentador, a el alto del cuello del alimentador f_d el largo total del alimentador ϕ_n el diámetro del alimentador d la medida del ancho y largo del alimentador.

Se tomó en cuenta las siguientes consideraciones para los alimentadores:

- El volumen del alimentador debe ser $\frac{\beta}{\eta-\beta}$ veces el volumen de la pieza
- Su superficie de apoyo debe ser 120% la superficie de la sección donde se conecta o la superficie de apoyo.
- La suma del ancho del alimentador debe ser al menos igual a x , siendo x la longitud máxima de la pieza
- El alto del alimentador sea menor a 10 veces la superficie de apoyo

Estas condiciones expresadas de manera matemática son:

$$[1] \quad d^2 l \geq \frac{\beta}{\eta - \beta} V_s$$

$$[2] \quad l \geq 1.2 S_a$$

$$[3] \quad nd \leq x$$

$$[4] \quad l \leq 10 S_a$$

Donde l y d se definen en la figura 25. S_a es la sección o superficie de apoyo del alimentador y V_s el volumen de la sección de la pieza.

Las condiciones [2] y [3] limitan la longitud del alimentador a $1.2S_a \geq l \geq 10S_a$ y la condición [3] se debe verificar luego del diseño del alimentador.

Como se explicó antes, se puede dividir la totalidad de la TPMS en partes iguales, entonces cada alimentador debe ser diseñado para esa sección en particular. Asumiendo n como el número de divisiones entonces el volumen de cada sección es $V_s = V_t/n$ siendo V_t el volumen total de la TPMS.

Definiendo $\gamma = \frac{\beta}{\eta-\beta}$ y despejando d a partir de la condición [1]

$$d \geq \sqrt{\frac{\gamma * V_t}{n * l}}$$

$$d \geq \sqrt{\frac{\gamma * V_t}{l * n}}$$

Esta expresión hallada debe ser mayor al cuello del alimentador por lo que se tiene

$$d \geq \sqrt{\frac{\gamma * V_t}{n * l}} \geq M_n$$

La longitud d debe ser como mínimo el valor del cuello del alimentador por lo que si igualamos esto tenemos una condición del número de divisiones “ n ” mínimo.

$$\sqrt{\frac{\gamma * V_t}{n * l}} = M_n$$

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

Este número de divisiones también es el número de alimentadores que debería tener la estructura TPMS para poder solventar la contracción por solidificación de la pieza fundida.

Temperatura del molde

La temperatura a la que el molde se encuentra es otro parámetro muy importante en el proceso de fundición. Si el molde está a una temperatura baja con respecto al metal líquido lo que ocasiona es que al entrar en contacto el metal y el molde hay un shock térmico que puede destruir el molde y dar una mala fundición. Por el contrario, al poner el molde a una temperatura muy elevada y entrar el metal líquido este se solidifica de manera muy lenta y hace que las paredes del molde empiecen a desmoronarse por dentro debido a la temperatura o provocar una reacción química con el material del molde los que haría que se desprendan gases de las paredes del molde afectando la calidad superficial.

Los hornos de combustión funcionan con temperaturas entre 870 y 1095 °C (1600 y 2000 °F), y tienen un 10% de exceso de aire para garantizar la combustión completa de los materiales orgánicos. 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, 425 a 870 °C (800 a 1600 °F) para muchas aleaciones base de cobre, y 870 a 1095 °C (1600 a 2000 °F) para aceros y superaleaciones. Los moldes para el proceso de solidificación direccional se precalientan por encima de la temperatura de liquidus de la aleación que se está fundiendo. (Prasad 2012)

Grosor de sección

Cada uno de los métodos de fundición tienen sus ventajas, en la cera perdida algo que la hace destacar es que puede reproducir de manera precisa pequeños detalles. En una TPMS al disminuir la longitud de la celda unidad la superficie se incrementa mientras que el volumen se mantiene casi constante. Este incremento en la superficie puede superar el 200%. Entonces es evidente que para la transferencia de calor es mejor fabricar la estructura que mayor superficie pueda tener. La desventaja es que una menor longitud en la celda unidad tiene un grosor de sección más pequeño lo que vuelve más difícil la fundición.

Uno de los procesos de fundición que ofrece más esperanzas para la producción de formas muy finas es la producción en molde cerámico para fundición a la cera perdida. Con este proceso de precisión pueden fundirse secciones de pared tan finas como 0,76 mm, y pueden incorporarse a las piezas fundidas de producción intrincados núcleos y detalles a los que ni siquiera pueden aproximarse otros métodos de fundición. La fundición por cera perdida es conocida como fundición de precisión debido a que permite obtener unas tolerancias muy precisas. Con un proceso controlado se puede lograr una tolerancia lineal de ± 0.015 mm por cada milímetro. (ASM Handbook Committee y ASM International 1978)

Defectos de fundición

En la técnica de la cera perdida podemos encontrar los siguientes defectos más comunes:

Tabla 4

Defectos de fundición más comunes en cera perdida.

Tipo	Defectos	Causa
Salidas metálicas	Flash o aletas conjuntas	Residuos de cera
	Venas	Molde mal secado
Figura 25 Defecto de aleta	Molde agrietado o roto	Demasiada temperatura del molde
		Curva de calentamiento demasiado rápida
	Sudoración o aire incrustado	Poca resistencia del molde
		Fractura durante el revestimiento
Figura 26 Defecto de poros superficiales	Cavidades	Fractura durante el desparafinado
		Burbujas de aire atrapadas antes del vertido
	Poros o espiráculos	Gas atrapado durante la solidificación
	Contracción dispersa	Sistema de alimentación inadecuado
Discontinuidades	Contracción abierta o externa	Contracción de volumen durante la solidificación
	Contracción interna o ciega	Sistema de alimentación inadecuado
	Encogimiento de esquinas o filetes	Cambios de sección bruscos
		Sistema de alimentación inadecuado
	Contracción central o axial	Molde demasiado frío
	Porosidad de contracción	Sistema de alimentación inadecuado
	Desgarre en caliente	Molde demasiado frío
	Desgarre en caliente	Manipulación brusca
	Grietas de enfriamiento	Sistema de alimentación inadecuado
		Mal tratamiento térmico
	Cierre en frío	Aleación de metales con diferentes coeficientes de expansión térmica
		Sistema de alimentación inadecuado
		Molde demasiado frío

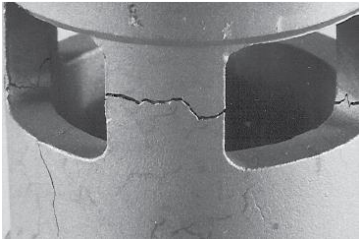
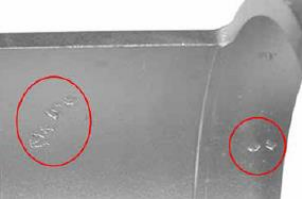

Nota. Tomado de *Atlas of casting defects*, (p.25), por Markee J., 2017

Cavidades

Figura 26

Defecto de poros superficiales

Nota. Tomado de *Atlas of casting defects*, (p.42), por Markee J., 2017

Tipo	Defectos	Causa
Figura 27		
Defecto de desgarre en caliente		
		
Nota. Tomado de <i>Atlas of casting defects</i> , (p.31), por Markee J., 2017 Superficie defectuosa	Pliegues de la superficie	Molde demasiado frio Patrón de cera con defectos
Figura 28		
Defecto de inclusión no metálica		
	Reacción metal molde	Demasiada temperatura del molde Velocidad de vertido muy rápido
Nota. Tomado de <i>Atlas of casting defects</i> , (p.36), por Markee J., 2017	Marcas de hundimiento	Molde de mala calidad Colapso del molde Patrón de cera con defectos
	Inclusiones de escorias externas	Contaminación durante el proceso de fundición Demasiada temperatura del molde
	Penetración de metales	Molde de mala calidad Demasiada temperatura del molde
	Costra Misrun	Molde de mala calidad Molde demasiado frio Sistema de alimentación inadecuado
Fundición incompleta Figura 29		
Defecto de Misrun.		
	Vaciado corto	Gas atrapado durante la solidificación Cantidad insuficiente de metal
Nota. Tomado de <i>Atlas of casting defects</i> , (p.35), por Markee J., 2017 Dimensiones o formas incorrecta	Mutilación Compensación de contracción Distorsión de la fundición	Mal postprocesamiento de Mal diseño del patrón de cera para contracción Molde de mala calidad

Tipo	Defectos	Causa
Figura 30		Sistema de alimentación inadecuado

Defecto de distorsión de la fundición.



Nota. Tomado de *Atlas of casting defects*, (p.20), por Markee J., 2017

Incrustaciones o anomalías

Figura 31

Defecto de escoria.

Escoria

Contaminación del metal

Puntos duros

Colapso del molde

Colapso del molde



Nota. Tomado de *Atlas of casting defects*, (p.40), por Markee J., 2017

Diseño experimental

Defectos más incidentes en una mala calidad de fundido

Los defectos en la fundición por cera perdida presentan causas comunes entonces se planteó que si se identificaran estas causas más comunes se podría ayudar a prevenir la mayor cantidad de defectos de la fundición.

De la guía de defectos en fundición por cera perdida (Markee et al. 2017) se obtuvo las causas más comunes de una fundición fallida y su incidencia que se muestra a continuación.

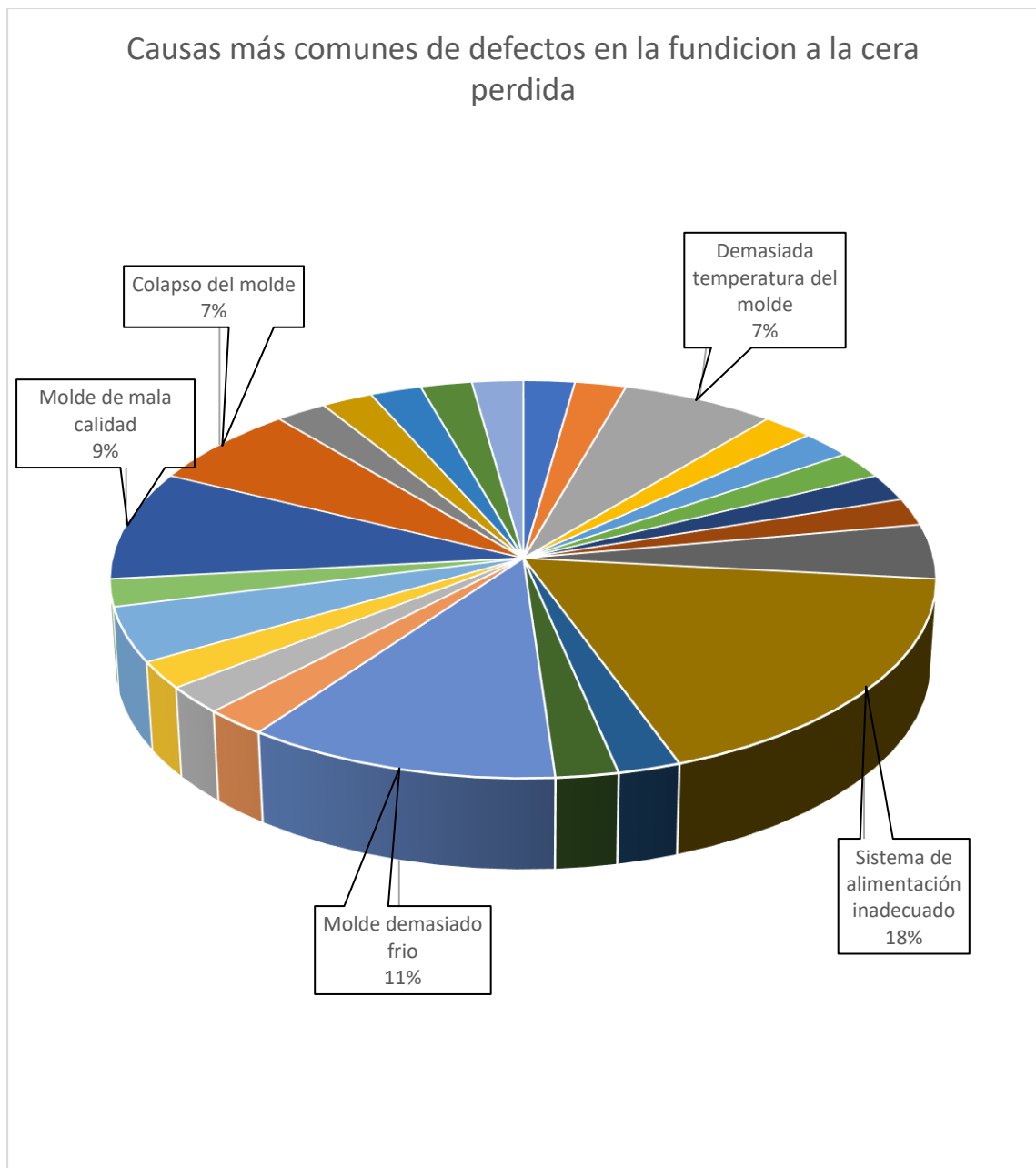
Tabla 5*Causas e incidencia en la fundición en la cera perdida.*

Causa	Incidencia	Causa	Incidencia
Residuos de cera	1	Manipulación brusca	1
Molde mal secado	1	Mal tratamiento térmico	1
Demasiada temperatura del molde	3	Aleación de metales con diferentes coeficientes de expansión térmica	1
Curva de calentamiento demasiado rápida	1	Patrón de cera con defectos	2
Poca resistencia del molde	1	Velocidad de vertido muy rápido	1
Fractura durante el revestimiento	1	Molde de mala calidad	4
Fractura durante el desparafinado	1	Colapso del molde	3
Burbujas de aire atrapadas antes del vertido	1	Contaminación durante el proceso de fundición	1
Gas atrapado durante la solidificación	2	Cantidad insuficiente de metal	1
Sistema de alimentación inadecuado	8	Mal postprocesamiento de la pieza	1
Contracción de volumen durante la solidificación	1	Mal diseño del patrón de cera para contracción	1
Cambios de sección bruscos	1	Contaminación del metal	1
Molde demasiado frío	5		

Representado en el siguiente gráfico

Figura 32

Grafica de pastel de las Causas más comunes de defectos en la fundición a la cera perdida.



Las causas que provocan la mayor cantidad de defectos son 5:

1. Sistema de alimentación inadecuado con el 18%
2. Molde demasiado frío con el 11%
3. Molde de mala calidad con el 9%
4. Colapso del molde 7%

5. Demasiada temperatura en el molde 7%

Para mitigar la mayor cantidad de errores en la fundición se propuso un diseño experimental que toma como factores el diseño de sistemas de alimentación y temperatura del molde al momento del vertido (aquí se toma en cuenta las causas de molde demasiado frío y demasiada temperatura en el molde). No se tomó en cuenta medidas para mitigar un molde de mala calidad o el colapso del molde que se relaciona con una baja resistencia del molde, porque ambas se relacionan con el material del revestimiento, en este estudio se utilizó un revestimiento comercial que siguiendo las instrucciones del fabricante garantiza un excelente comportamiento del molde. Se tomarían en cuenta los factores antes mencionados si la producción del molde que hiciera con un revestimiento creado por el autor.

Niveles de temperatura de vertido para el DOE

Los materiales de molde de cerámica se cuecen para eliminar la humedad (libre y combinada químicamente), para quemar el material residual del patrón y cualquier sustancia orgánica utilizada en la lechada de cáscara, para sinterizar la cerámica y para precalentar el molde a la temperatura necesaria para la fundición. En algunos casos, estos procesos se llevan a cabo en una sola cocción. Otras veces, el precalentamiento se realiza en una segunda cocción, después de que el molde se enfríe, se inspeccione y se repare si es necesario. Los moldes agrietados pueden repararse con lechada cerámica o cementos especiales. Muchos moldes se envuelven con una manta de fibra cerámica en este momento para minimizar la caída de temperatura que se produce entre el horno de precalentamiento y la operación de fundición, o para proporcionar una mejor alimentación aislando zonas seleccionadas del molde. Los hornos de gas se utilizan para la cocción y el precalentamiento de los moldes, excepto en el caso de los moldes para procesos de solidificación direccional, que se precalientan en el horno de fundición con calentamiento por inducción o resistencia. Los hornos de empuje continuos y por lotes son los más comunes, pero también se utilizan algunos hornos rotativos.

Los hornos de combustión funcionan con temperaturas entre 870 y 1095 °C (1600 y 2000 °F), y tienen un 10% de exceso de aire para asegurar la combustión completa de los materiales orgánicos. 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, 425 a 870 °C (800 a 1600 °F) para muchas aleaciones base de cobre, y 870 a 1095 °C (1600 a 2000 °F) para aceros y superaleaciones. Los moldes para el proceso de solidificación direccional se precalientan por encima de la temperatura de liquidus de la aleación que se está fundiendo.

En el estudio se estableció una temperatura de vertido de aproximadamente 700 °C; 40 °C por encima de la temperatura de fusión del aluminio puro, y se plateó 3 niveles de la temperatura del molde al momento de sacarlo del horno. Estos fueron 150 °C, 345°C y 540°C.

Niveles para el número de alimentadores para el DOE

En cualquier proceso de fundición, cuando una aleación se vierte en un molde, comienza a contraerse o disminuir su volumen a medida que se enfría hasta la temperatura de liquidus, y posteriormente se solidifica. Las fundiciones compensan estas dos etapas de contracción volumétrica proporcionando depósitos “alimentadores” como parte del diseño de la cavidad del molde. Los alimentadores se solidifican más lentamente que la fundición, permitiendo así que parte del líquido de los alimentadores fluya hacia la colada en las zonas donde se produce la contracción.

Por ello se plateó 3 diseños diferentes de alimentadores siguiendo la metodología de diseño de Prasad. Este se basa en el concepto de módulo de alimentación. El módulo se define como la relación entre el volumen y la superficie de enfriamiento de la fundición.

Esta metodología consiste en dividir la pieza en partes más pequeñas para analizar que secciones se solidificarán más rápido, las cuales presentan mayor dificultad para el llenado y con ello saber dónde y con qué medidas ubicar los alimentadores.

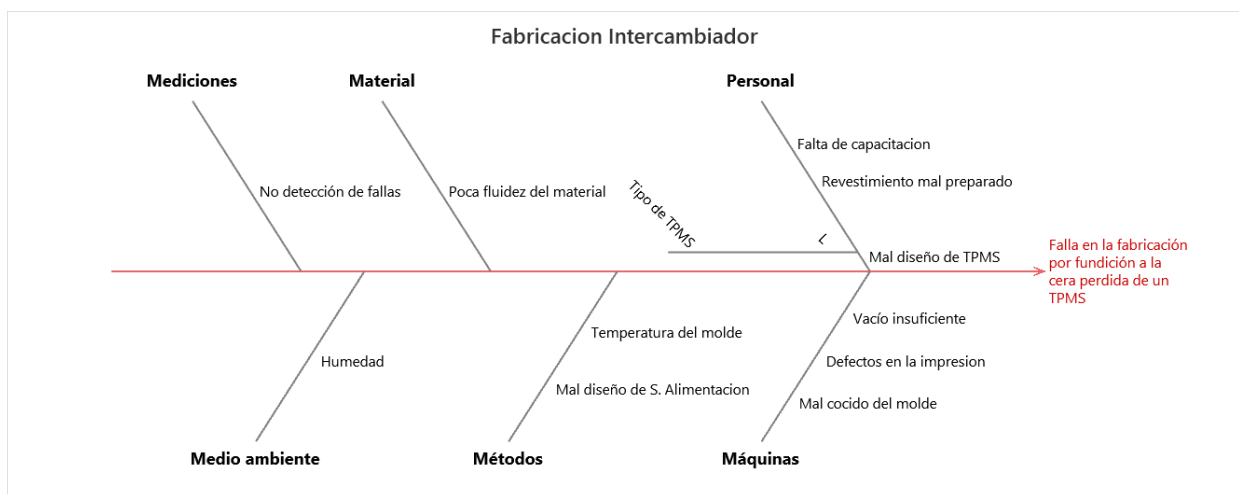
Las TPMS son estructuras periódicas, lo que significa que no existe variación en las secciones. Por lo que se planteó diseñar los alimentadores bajo la metodología explicada en la sección Numero de alimentadores expuesta más adelante en este trabajo y con ello obtener el número de alimentadores mínimo, en el caso más difícil de longitud de la celda unidad de 5 el número de alimentadores es muy grande así que se plantea estudiar como incide un número menor de alimentadores. Así se diseñó los TPMS con el número de alimentadores calculado, un 75% y 50% del número de alimentadores calculado.

Niveles de longitud de celda unidad de la TPMS para el DOE

Se realizó un diagrama de Ishikawa para determinar otros factores importantes que pudieran derivar en una falla en la fabricación por fundición a la cera perdida de una TPMS.

Figura 33

Diagrama de Ishikawa para la fabricación de estructuras TPMS.



Se observa que de los factores que influyen en fallas y que se tiene la posibilidad de controlar además de los antes mencionados fue: un mal diseño de la TPMS. Dentro de este último factor tuvimos 2 subcategorías muy importantes que fueron el tipo de TPMS y la longitud de la celda unidad (L). Ambos son factores muy relevantes en la fundición pues del tipo de TPMS depende la forma y los obstáculos que deben superar el metal fundido para llenar por completo el molde y la

longitud de la celda unidad tiene importancia debido a que este determina el ancho de los canales por los que debe recorrer el metal fundido. Se decidió utilizar solo un tipo de estructura con porosidad de 0.5 y variar la longitud unidad de esta.

Para la decisión de qué tipo de estructura se tomaron en cuenta tres tipos de estructuras: Diamante, Primitiva y Giroide. Sin embargo, se eligió utilizar estructuras tipo diamante al tener mayor cantidad de superficie con respecto a las otras estructuras como se ve en la siguiente tabla 6. Los datos fueron obtenidos de los modelos computacionales.

Tabla 6

Área y volumen de estructuras TPMS.

Tipo	Primitiva	Giroide	Diamante
Longitud de celda unidad (L) = 5 mm			
Área [mm^2]	13677	19181	23135
Volumen [mm^3]	13498	13495	13494
Longitud de celda unidad (L) = 10 mm			
Área [mm^2]	7311	11001	13042
Volumen [mm^3]	13499	13499	13498
Longitud de celda unidad (L) = 15 mm			
Área [mm^2]	5208	8166	9568
Volumen [mm^3]	13500	13499	13499

La variable que se decidió variar fue la longitud de la celda unidad, se escogieron los 3 niveles que permitieron tener un número exacto de celdas unidad dentro de un volumen de 30x30x30 mm. Estos fueron 5, 10 y 15 mm.

Planteamiento del diseño experimental

Se planteó un diseño experimental de tres factores con 3 niveles cada uno como se detalla a continuación.

Tabla 7

Factores y niveles del diseño experimental.

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

Al analizar el número de factores y de niveles no es viable elegir un diseño factorial completo debido a los costos y el tiempo de la experimentación. Por ello se planteó un diseño de Taguchi. En este caso se utilizó un arreglo L_9 que permite estudiar la interacción entre los factores con un número menor de experimentos, y para validar el experimento se realizaron 2 corridas dando un total de 18 experimentos. La tabla de Taguchi se realizó en Minitab y se presenta a continuación:

Resumen del diseño

Arreglo de Taguchi	$L_9(3^3)$
Factores:	3
Corridas:	9

Tabla 8

Diseño ortogonal de Taguchi L_9 para fabricación de estructura TPMS.

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

A continuación, se explica cómo se calcular los números de alimentadores para cada longitud de celda unidad.

Cálculo del número de alimentadores para cada tipo de TPMS

Número de alimentadores

Para el cálculo de alimentadores fue necesario calcular el número de alimentadores mínimo n , con ese dato siguiendo la metodología de(Prasad 2012) explicada en la sección Dimensionamiento de los elementos de alimentación se determinó las dimensiones de los alimentadores.

Primero se toma el valor de $\beta = 0.07$ ya que contracción del aluminio es alrededor del 7% y $\eta = 0.18$ se asume como valor inicial. El volumen es un valor constante en todas las estructuras,

que es $V_T = 13499 \text{ mm}^3$. El módulo de fundición M_c se obtiene dividiendo el volumen total sobre el área total de la TPMS. La relación de solidificación del cuello del alimentador se calcula a partir de $M_n = 4 * k_n * M_c$ donde $k_n = 1.1$ es un valor empírico. Para encontrar el tamaño del largo y ancho del alimentador se calcula con la formula $d = 4 * M_f$, siendo $M_f = k * M_c$ donde k es la relación de solidificación y se fija inicialmente en un mínimo de 1.2. Con esos valores se puede calcular la longitud mínima del alimentador $l = 1.2 * d$. Luego el número mínimo de alimentadores se calcula con:

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

Luego se comprueba que la relación entre el volumen del alimentador V_f donde $V_f = d^2 * l$ y el volumen de la sección V_s , donde $V_s = V_t/n$; sean mayores o iguales a γ donde $\gamma = \frac{\beta}{\eta - \beta}$. Sino se cumple se puede por tanteo ir cambiando los valores de ancho y largo del alimentador sin aumentarlo mucho o cambiar el valor de la longitud del alimentador l tomando en cuenta que esta longitud debe ser máximo de 10 veces t siendo t el valor de la sección más ancha de la pieza.

Se necesita que los alimentadores se conecten con la superficie externa de la pieza por lo que hay una cantidad limitada de espacios disponibles para poner alimentadores. Por lo que hay que tener en cuenta cuantos alimentadores se pueden ubicar en cada TPMS. Se especifica esto en la siguiente tabla.

Tabla 9

Número máximo de alimentadores que se pueden ubicar en cada estructura TPMS.

Longitud de celda unidad	Número máximo de alimentadores
L15	6
L10	12

Longitud de celda unidad	Número máximo de alimentadores
L5	72

A continuación, se presentan los cálculos realizados para cada uno de las TPMS.

Tabla 10

Cálculo del número y dimensiones de los alimentadores para la TPMS con L=15.

L15	Valores	Unidades	Valores ajustados	N entero
β	0.07			
η	0.18			
γ	0.64			
V_t	13499.00	mm^3		
A_t	9568.00	mm^2		
t	7.00			
Mc	1.41	mm		
kn	1.10			
Mn	6.21	mm		
k	1.20			
Mf	1.69	mm		
d	6.77	mm	6.50	
fd	70.00	mm		
l	8.13	mm	35	
n_{min}	27.43		6.37	6
Vf	372.69	mm^3	1478.75	
Vs	492.11	mm^3	2249.83	
Vf/Vs	0.76		0.66	

Como se explicó anteriormente el número teórico sobrepasa la cantidad máxima de lugares donde se puede poner los alimentadores, por lo que es necesario cambiar los valores de d y l hasta que el cálculo de número de alimentadores esté cercano al número máximo disponible.

Este procedimiento se repite para las dos estructuras restantes dando los siguientes resultados: Para $L = 10 \text{ mm}$

Tabla 11

Cálculo del número y dimensiones de los alimentadores para la TPMS con $L=10$.

L10	Valores	Unidades	Valores ajustados	Unidades
β	0.07			
η	0.18			
γ	0.64			
V_t	13499.00	mm^3		
A_t	13042.00	mm^2		
t	7.00			
M_c	1.04	mm		
k_n	1.10			
M_n	4.55	mm		
k	1.20			
M_f	1.24	mm		
d	4.97	mm	5.00	
f_d	70.00	mm		
l	5.96	mm	35	
n_{min}	69.47		11.83	12
V_f	147.16	mm^3	875.00	
V_s	194.31	mm^3	1124.92	
V_f/V_s	0.76		0.78	

Para $L = 5 \text{ mm}$

Tabla 12

Cálculo del número y dimensiones de los alimentadores para la TPMS con $L=5$.

L5	Valores	Unidades	Valores ajustados	Unidades
β	0.07			
η	0.18			
γ	0.64			
V_t	13499.00	mm^3		
A_t	23135.00	mm^2		
t	1.90			
M_c	0.58	mm		
k_n	1.10			
M_n	2.57	mm		
k	1.20			
M_f	0.70	mm		
d	2.80	mm	2.50	
f_d	19.00	mm		

L5	Valores	Unidades	Valores ajustados	Unidades
l	3.36	mm	19	
n_{min}	387.78		68.59	72
V_f	26.36	mm^3	118.75	
V_s	34.81	mm^3	187.49	
V_f/V_s	0.76		0.63	

Los valores obtenidos representan la totalidad del número de alimentadores, para el diseño experimental se propuso utilizar $2/3$ y $1/2$ de este número, al hacer eso la relación de volumen entre el alimentador y el volumen de la pieza se ve afectada como se ve en la siguiente tabla.

Tabla 13

Número de alimentadores para el diseño experimental y su reducción de la relación de volumen de alimentador y sección de la pieza.

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

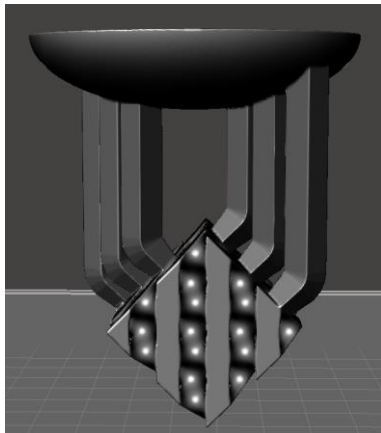
	L15	
$2n/3$	54	0.48
$n/2$	36	0.32

Unión de alimentadores y estructura TPMS

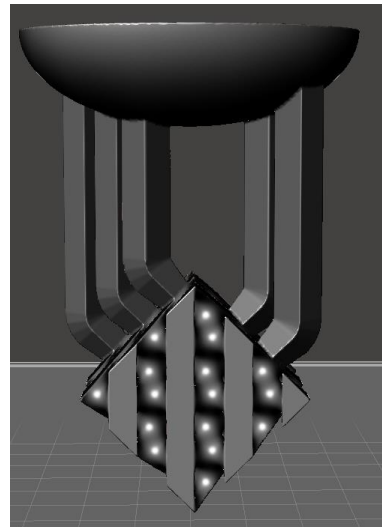
Con el programa Fusion 360 bajo una licencia estudiantil se crearon los alimentadores y con MeshMixer se combinaron las mallas de las TPMS con los alimentadores. A continuación, se presentan como de ven las TPMS con los alimentadores.

Figura 34

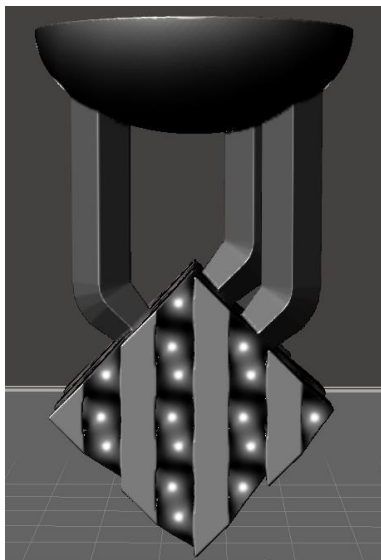
TPMS con $L=15$ y 6 alimentadores.

**Figura 35**

TPMS con $L=15$ y 5 alimentadores.

**Figura 36**

TPMS con $L=15$ y 3 alimentadores.

**Figura 37**

TPMS con $L=10$ y 12 alimentadores.

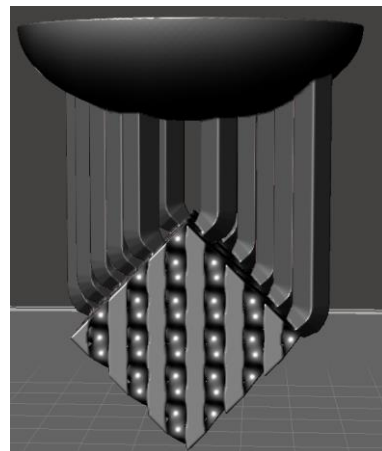
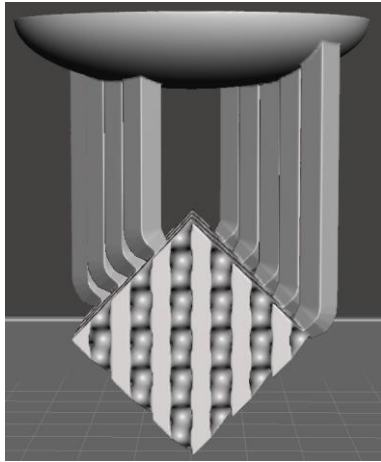
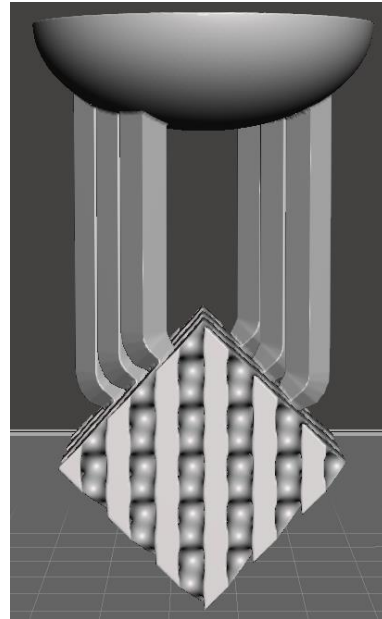


Figura 38

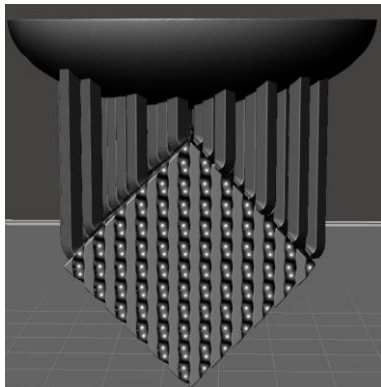
TPMS con $L=10$ y 9 alimentadores.

**Figura 39**

TPMS con $L=10$ y 6 alimentadores.

**Figura 40**

TPMS con $L=5$ y 72 alimentadores.

**Figura 41**

TPMS con $L=5$ y 54 alimentadores.

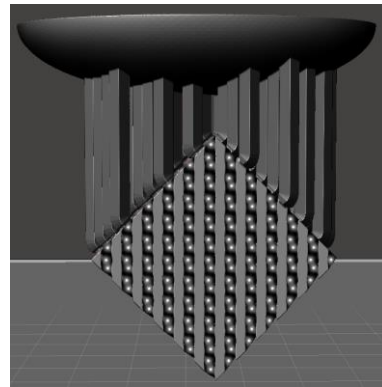
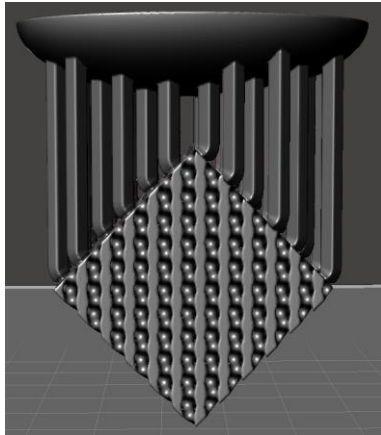


Figura 42

TPMS con $L=5$ y 36 alimentadores



Simulación de la fundición.

Inspire Cast es una herramienta de análisis de simulación de fundición de uso rápido, fácil, preciso y asequible. Está diseñado para principiantes y expertos por igual y proporciona una interfaz intuitiva para ayudar a evitar los defectos de fundición como el atrapamiento de aire, la porosidad por contracción, los cierres en frío, la degradación del molde, etc. El software Inspire Cast ofrece plantillas de proceso de cinco pasos para simular la fundición en molde por gravedad, la fundición en arena por gravedad, la fundición a la cera perdida, la fundición a alta presión, la fundición a baja presión y el vertido por inclinación. Esto permite a los usuarios aumentar la calidad del producto y crear mejores diseños con una formación mínima.

Los escenarios donde se pueden mostrar los resultados de la simulación son dos: Resultados de llenado y los resultados de solidificación.

A continuación, se detalla los resultados que se pueden obtener en cada escenario

Tabla 14

Resultados del llenado disponibles con el software Inspire Cast.

Opción	Descripción
Temperatura	<p>Vea cómo cambia la temperatura durante el proceso de llenado. Puede determinar la temperatura necesaria para que dos frentes de material se fusionen y estudiar el riesgo de soldadura en frío.</p>
Frente de flujo	<p>Observe cómo se comporta el material al entrar en el molde, para poder predecir el tiempo de llenado. A continuación, podrá decidir si necesita reposicionar la compuerta y los rebosaderos para evitar el atrapamiento de aire o las turbulencias.</p>
ID del rastreador	<p>Observe cómo fluye el material hacia el molde desde cada compuerta. A continuación, puede decidir cambiar la posición de los desbordamientos o ajustar la posición, el tamaño, la forma o el tiempo de las compuertas para obtener resultados óptimos.</p>
Fracción sólida	<p>Muestra las áreas donde se producirá la solidificación. Estas áreas multicolores no se llenarán completamente y por lo tanto son propensas a la escasez de material. En función de los resultados, es posible que tenga que aumentar la presión, aumentar la velocidad o reducir el tiempo de llenado para evitar la escasez de material.</p>

Opción	Descripción
Velocidad	<p>Vea el proceso de llenado representado como vectores, lo que le permite detectar turbulencias y velocidades.</p> <p>Además de utilizar las velocidades durante el llenado del molde, puede utilizar el perfil de velocidades para analizar el comportamiento del llenado en las compuertas y evitar las turbulencias debidas a un mal diseño.</p>
Último Aire	<p>Vea las últimas zonas a rellenar, para poder predecir dónde pueden formarse burbujas. A continuación, puede reposicionar los desbordamientos para evitar la porosidad.</p>
Erosión del molde	<p>Determinar las zonas en las que la velocidad supera los 35 m/s, donde es probable que se produzca la degradación del molde.</p> <p>Las altas velocidades (velocidades superiores a 30-40 m/s) y las zonas en contacto directo con la masa fundida que fluye aumentan la degradación de los moldes de acero. La erosión del molde aumenta la rugosidad de las zonas afectadas y la propensión a la soldadura, reduciendo la durabilidad de los moldes permanentes.</p>
Presiones	<p>Vea los cambios de presión durante el llenado en pascales.</p> <p>Inspire Cast muestra las presiones relativas, por lo que si aparece una presión negativa, significa que está bajo presión atmosférica.</p>

Opción	Descripción
	Los solucionadores de Inspire Cast son bifásicos; es decir, se computa la presión del aire dentro del molde además de la del líquido.
Tiempo de llenado	Observe el tiempo que tarda el material en llegar a las distintas zonas de la pieza. Esto le ayuda a determinar la mejor manera de llenar la pieza.
Cierres en frío	Examine dónde se encuentran dos frentes de material y cuál es la diferencia de temperatura. Esto es útil para predecir las uniones frías o cold shuts, que se producen cuando dos frentes de material se encuentran en la cavidad del molde y no se fusionan correctamente, formando una discontinuidad en la fundición.
Flujo de aire	Vea el comportamiento del aire dentro del molde durante el proceso de llenado de metal. Cuando el metal llena la cavidad, el aire del interior del molde sale por los respiraderos, las líneas de separación, los elevadores y los sistemas de llenado.
Temperatura del molde	Vea los cambios de temperatura en el molde durante el proceso de llenado.

Nota: *Tomado de Get Started New to Inspire Cast? Learn the Basics Here, por Anón, 2023*

Tabla 15

Resultados de solidificación/termomecánica disponibles con el software Inspire Cast.

Opción	Descripción
Temperatura	<p>Vea los cambios de temperatura durante el proceso de solidificación.</p> <p>Si el llenado fue calculado previamente, las temperaturas de solidificación comienzan con las últimas temperaturas del llenado.</p> <p>Si no, se inicia con una temperatura constante.</p>
Fracción sólida	<p>Vea las últimas zonas en solidificarse para predecir la porosidad de contracción, que es más probable que se produzca en zonas aisladas.</p>
Tiempo de solidificación	<p>Observe el tiempo necesario para la solidificación de las diferentes zonas de la pieza. Esto le ayuda a identificar qué zonas se solidificarán primero y a predecir posibles zonas de soldadura en frío.</p>
Microporosidad	<p>El resultado de la microporosidad se basa en el criterio del Niyama adimensional. Este método evita la necesidad de conocer el valor umbral de Niyama por debajo del cual se forma la porosidad por contracción; dichos valores umbral son generalmente desconocidos y dependen de la aleación. El criterio adimensional tiene en cuenta tanto las condiciones térmicas locales (como en el criterio Niyama original), pero también considera más cosas como</p>

Opción	Descripción
	las presiones, las propiedades del material y las propiedades de los parámetros.
Niyama	La función del Criterio Niyama es utilizada habitualmente por las fundiciones para detectar defectos de contracción por solidificación. Se define como el gradiente térmico local dividido por la raíz cuadrada de la tasa de enfriamiento local. Los gradientes de temperatura bajos hacen que el material tenga menos presión para llenar los espacios interdendríticos y una tasa de enfriamiento alta, por lo que se solidifica más rápido y el material tiene menos tiempo para llenar los espacios interdendríticos. Cuanto menor sea el valor, mayor será la probabilidad de contracción.
Contracción de tuberías	Esto es similar a la porosidad por contracción (déficit de masa producido por la contracción del metal), pero se produce cuando la superficie superior está abierta a la atmósfera. Por lo tanto, al formarse la cavidad de contracción, el aire la compensa.
Módulo de solidificación	El módulo de solidificación se utiliza para establecer un sistema de alimentación adecuado ajustando el módulo de las bandas. Este cálculo se basa en el módulo (la relación entre el volumen de fundición y la superficie) y el tiempo de solidificación (regla de Chorinov).
Módulo geométrico	El módulo geométrico es un método alternativo para calcular el módulo, que se utiliza para establecer un sistema de alimentación

Opción	Descripción
	adecuado ajustando el módulo de las bandas. Este cálculo se basa en datos geométricos y de solidificación en los que se utiliza el procesamiento de imágenes de datos para el postprocesamiento de los resultados.
Porosidad	Revise las áreas en las que la relación entre los vacíos y las áreas sólidas es mayor o igual que el valor porcentual especificado. Esta es la macroporosidad o porosidad de contracción.
Volumen total de contracción	Este resultado es la combinación de los resultados de la contracción de la tubería y la porosidad y proporciona el volumen de la cantidad total de macroporosidad.
Desplazamiento	El desplazamiento muestra el plegado, la flexión, la torsión o el arqueado de la pieza de fundición, que suele deberse a un enfriamiento no uniforme. El contorno de desplazamiento muestra cómo se está deformando la pieza para que usted pueda tomar las medidas correctivas adecuadas a la velocidad de enfriamiento, al diseño del canal de enfriamiento o a los datos del proceso.
Temperatura del molde	Vea los cambios de temperatura en el molde durante el proceso de solidificación. Las temperaturas del molde le ayudan a determinar las diferencias de temperatura entre los distintos componentes (por ejemplo, la pieza, el núcleo y los manguitos).

Opción	Descripción
	Los resultados le proporcionarán información valiosa para ayudarle a crear y validar el diseño de los canales de refrigeración.

Nota: Tomado de Get Started New to Inspire Cast? Learn the Basics Here, por Anón, 2023

El tipo de archivo que se obtuvo después del postprocesamiento en MeshMixer no es apto para el programa Inspire Cast por lo que se realizó una última conversión, de malla a un sólido en archivo .step. Para ello se hizo uso del programa Fusion 360. Este pudo convertir un objeto de malla en un objeto sólido. La versión utilizada fue la versión estudiantil. Así se logró exportar archivos .step para que puedan ser abiertos en Inspire Cast. El proceso se detalla a continuación

En MeshMixer una vez que se combinaron los alimentadores con la TPMS en la orientación adecuada se realiza lo siguiente

Figura 43

Pasos para transformar de elemento de malla a elemento sólido en Meshmixer.



En MeshLab se abren los archivos .stl y se aplican los mismos filtros que se aplicaron en la sección de Procesamiento del modelo computacional de TPMS y se exporta como archivo .obj

Figura 44

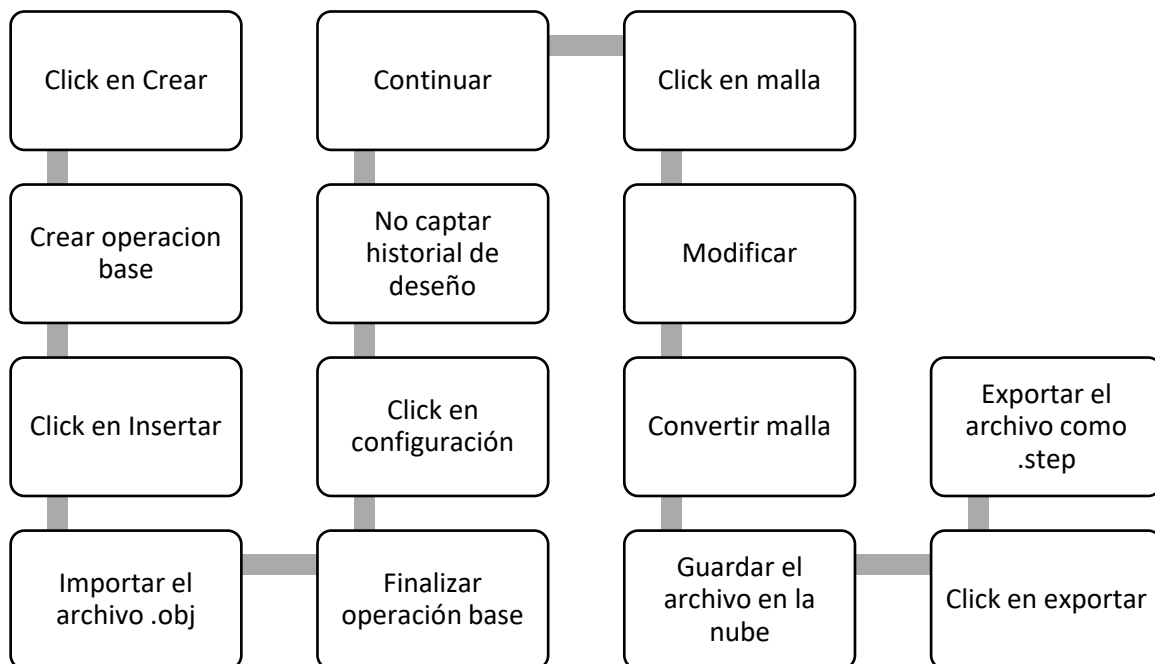
Pasos para transformar un archivo .stl en un archivo .obj usando MeshLab.



Por último, se utilizó Fusion 360 para convertir el archivo .obj para tener un archivo .step para eso se siguen los siguientes pasos

Figura 45

Pasos para convertir un elemento de malla en un archivo sólido y exportarlo en formato .step para la simulación en Inspire Cast.



Con esto se obtuvo un archivo que Inspire Cast es capaz de interpretar y simular de manera exitosa. Esto se hace porque Inspire Cast no trabaja con archivos de malla directamente.

Convergencia de malla

Para optimizar el uso de recursos computacionales primero se analizó la influencia que tiene reducir la cantidad de elementos en MeshLab, pues así el archivo es menos pesado y más rápido de simular. Para ello se analizaron dos reducciones de malla, la primera fue de longitud objetivo de 2% y la otra de 3%. Se tuvo la intención de analizar también con una longitud objetivo de 1% pero esto ocasionó que el archivo sea muy pesado para ser abierto por Inspire Cast.

Las condiciones de las simulaciones son las siguientes:

Modelo: L15 – 3A

Temperatura de vertido: 710 °C

Radio de la entrada del material: 2.6 mm

Altura de la cuchara de fundición: 25 mm

Material: Aluminio

Los resultados mostrados a continuación son de la temperatura durante el llenado. Se tomó en los mismos puntos en ambas simulaciones con los siguientes resultados

Figura 46

Resultados obtenidos con Inspire Cast utilizando una malla reducida al 2% de la longitud objetivo.

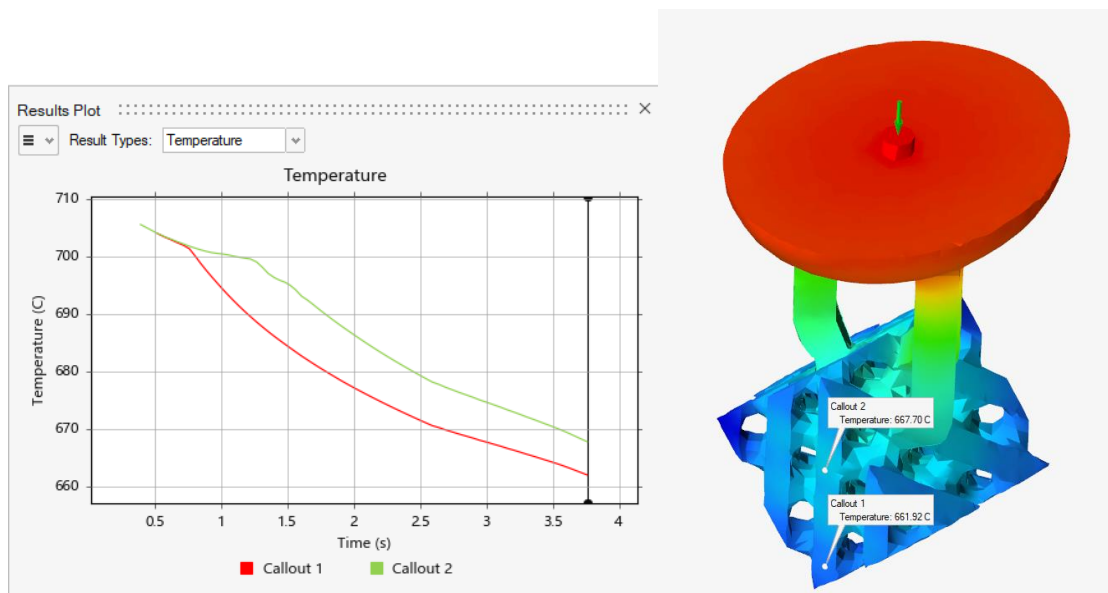
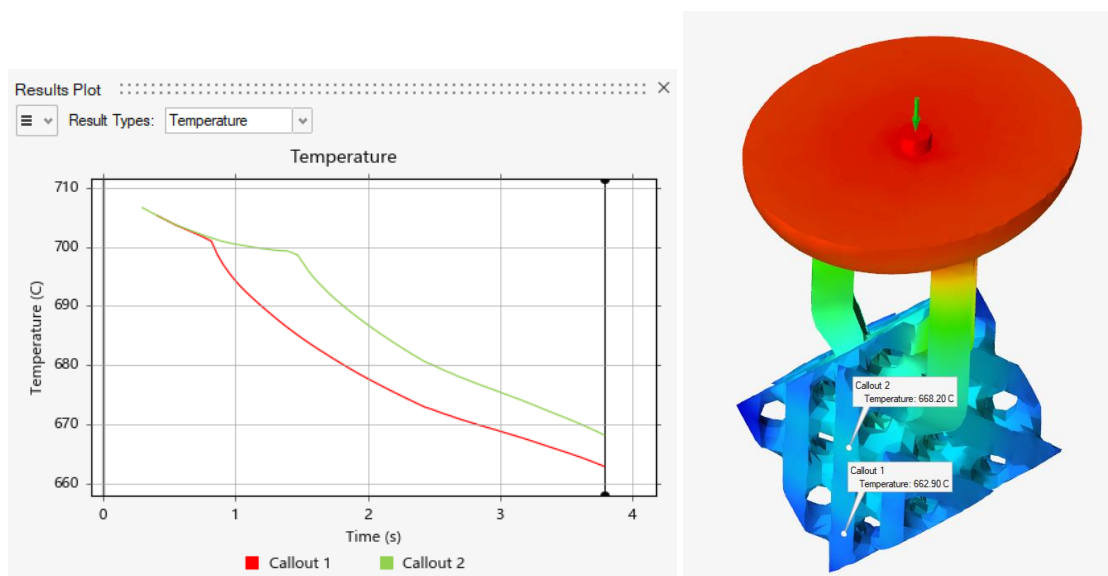


Figura 47

Resultados obtenidos con Inspire Cast utilizando una malla reducida al 3% de la longitud objetivo.



Como se puede ver en las gráficas a pesar de que hubo una diferencia en el tamaño de las mallas entre ambas simulaciones los resultados se muestran muy similares. Por eso se tomó la

decisión de utilizar modelos con una reducción de malla de 3% de la longitud objetivo aplicado al filtro de meshlab Remeshing: Isotropic explicit remeshing.

Simulaciones de llenado y solidificación

Con el software Inspire Cast de la empresa Altair, se realizaron las simulaciones de la fundición para entender cómo sería el comportamiento del material y el molde durante el proceso de fundición. Los parámetros elegidos para las simulaciones fueron:

Temperatura de vertido: 710 °C

Radio de la entrada del material: 2.6 mm

Altura de la cuchara de fundición: 25 mm

Material: Aluminio

De los resultados se midió el volumen total de contracción y velocidad máxima del metal, estos parámetros son indicadores directos del resultado de la fundición. Los resultados se detallan a continuación.

Tabla 16

Resultados de volumen de contracción y velocidad máxima del metal obtenidos en la simulación con Inspire Cast.

Imagen de fundición	Volumen total de contracción [mm^3]	Velocidad máxima del metal [m/s]
Figura 48	0,19	0,66

*Distribución de temperatura durante el llenado
para el modelo L5 – 72A – 150 °C.*

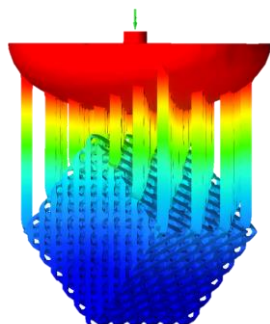


Figura 49

21,17

0,67

*Distribución de temperatura durante el llenado
para el modelo L10 – 9A – 150 °C.*

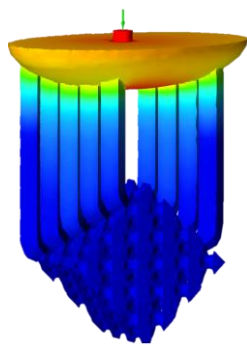


Imagen de fundición	Volumen total de contracción [mm^3]	Velocidad máxima del metal [m/s]
Figura 50	72,21	0,72

*Distribución de temperatura durante el llenado
para el modelo L15 – 3A – 150 °C.*

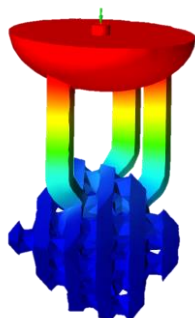


Figura 51

0,29

0,83

*Distribución de temperatura durante el llenado
para el modelo L10 – 12A – 345 °C.*

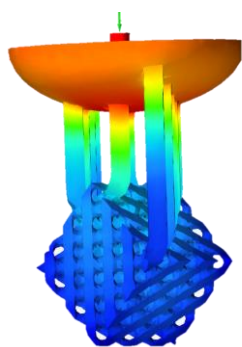


Imagen de fundición	Volumen total de contracción [mm^3]	Velocidad máxima del metal [m/s]
Figura 52	67,15	0,70

*Distribución de temperatura durante el llenado
para el modelo L15 – 5A – 345 °C.*

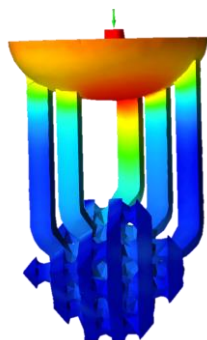


Figura 53

0

0,66

*Distribución de temperatura durante el llenado
para el modelo L5 – 36A – 345 °C*

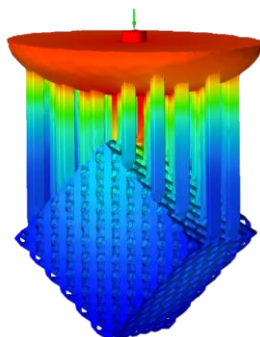


Imagen de fundición	Volumen total de contracción [mm^3]	Velocidad máxima del metal [m/s]
Figura 54	0	1,14

*Distribución de temperatura durante el llenado
para el modelo L15 – 6A – 540 °C.*

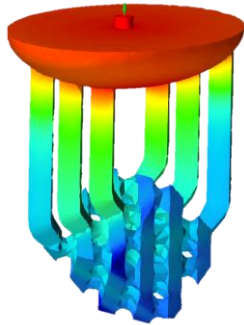


Figura 55

0

0,65

*Distribución de temperatura durante el llenado
para el modelo L5 – 54A – 540 °C.*

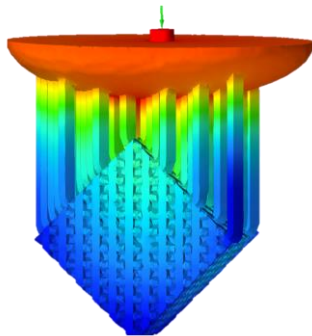
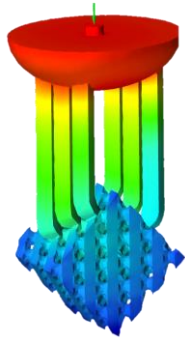


Imagen de fundición	Volumen total de contracción [mm^3]	Velocidad máxima del metal [m/s]
Figura 56	52,29	0,68

***Distribución de temperatura durante el llenado
para el modelo L10 – 6A – 540 °C.***



Los valores de volumen total de contracción fueron bajos lo que indica que los canales y la temperatura del molde en todos los casos son suficientes para que la pieza se llene en su totalidad y no exista el defecto de cierre frío. Las velocidades al ser menores a 30 m/s indican que no existe riesgo de desmoronamiento del molde durante el vertido.

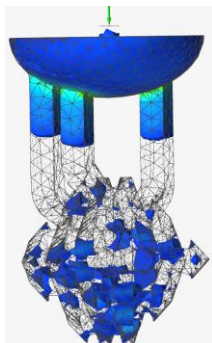
Índice Niyama de la fundición

Tabla 17

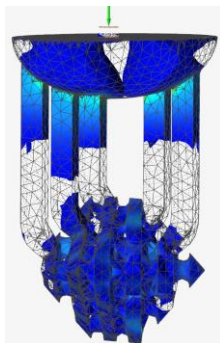
Graficas de regiones con valor del índice Niyama mayor a 1.

Figura 57

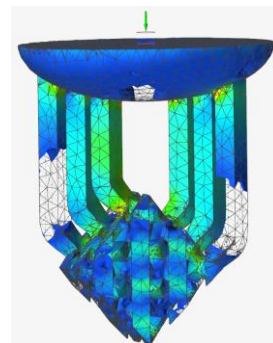
Regiones con índice Niyama mayor a 1 del modelo L15 – 3A – 150°C

**Figura 58**

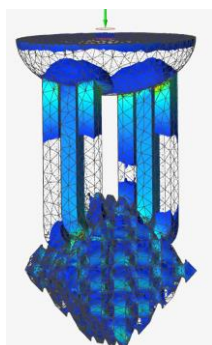
Regiones con índice Niyama mayor a 1 del modelo L15 – 5A – 345°C

**Figura 59**

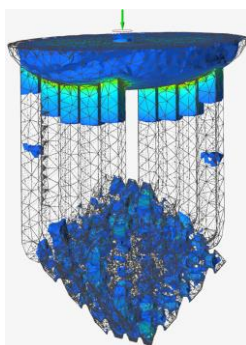
Regiones con índice Niyama mayor a 1 del modelo L15 – 6A – 540°C

**Figura 60**

Regiones con índice Niyama mayor a 1 del modelo L10 – 6A – 540°C

**Figura 61**

Regiones con índice Niyama mayor a 1 del modelo L10 – 9A – 150°C

**Figura 62**

Regiones con índice Niyama mayor a 1 del modelo L10 – 12A – 345°C

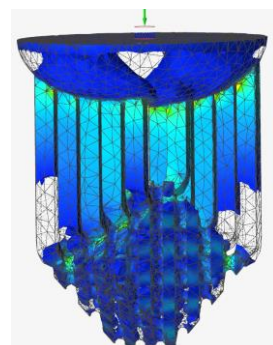
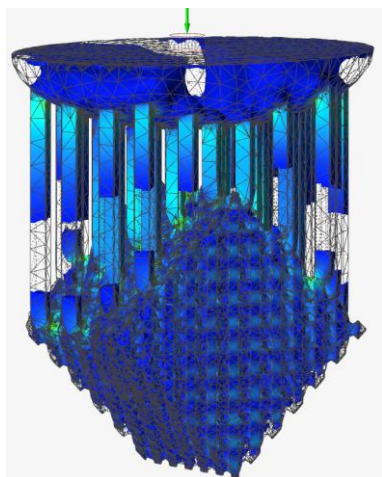
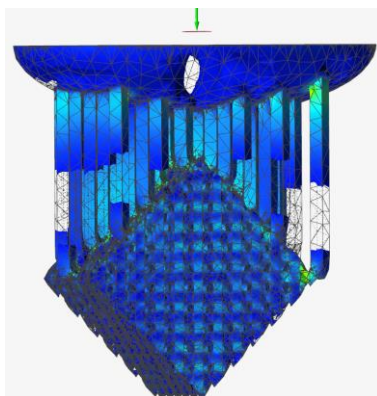


Figura 63

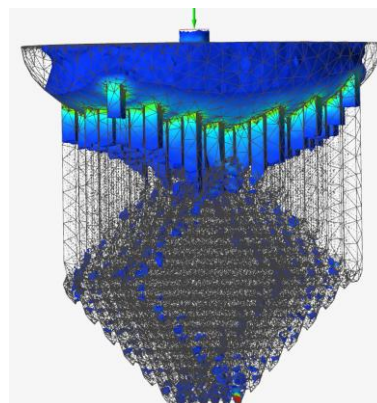
Regiones con índice Niyama mayor a 1 del modelo L5 – 36A – 345°C

**Figura 64**

Regiones con índice Niyama mayor a 1 del modelo L5 – 54A – 540°C

**Figura 65**

Regiones con índice Niyama mayor a 1 del modelo L5 – 72A – 150°C



En la tabla 17 se muestra las zonas de las TPMS que tienen un valor Niyama mayor a 1, esto implica que en esas zonas no existiría porosidad por contracción.

La simulación del proceso de fundición permitió tener una idea de cómo sería el llenado de las piezas y en que sitios existe posibilidad de contracción por solidificación. En este trabajo no se realizó una validación entre las fundiciones simuladas y las fundiciones reales debido a que no está dentro del objeto de estudio. Sin embargo, si se recomienda realizar un estudio de validación para constatar los datos.

Proceso de fundición.

El proceso de fundición se llevó a cabo fuera de la universidad por la falta de un horno de mufla con control de temperatura y rampas de temperatura. Lo que si se realizó dentro de la Universidad fue la impresión en resina de las TPMS con sus bebederos incorporados.

El servicio de fundición fue prestado por el maestro joyero Andrés Benítez, dueño de la escuela de joyería ubicado en De Las Malvas N45-79, Quito 170124

Impresión y post procesamiento de modelos TPMS.

Las impresiones se realizaron en la Formlabs 3 del laboratorio manufactura aditiva de la Universidad y algunas piezas fueron impresas por un servicio de impresión. Formlabs posee 2 tipos de resinas calcinables:

- **Castable Wax 40 Resin:** ofrece un alto nivel de detalle y una superficie muy lisa, con características de manipulación similares a las de la cera de modelado azul. Con un porcentaje de relleno de cera del 40% y una escasa expansión, la Castable Wax 40 Resin se ajusta a un amplio espectro de condiciones para la fundición a la cera perdida y es compatible con los principales materiales de revestimiento basados en el yeso.(Formlabs 2019)
- **Castable Wax Resin:** es un material de gran precisión con un 20 % de cera para una fundición fiable sin ceniza y un quemado limpio, capaz de capturar con gran precisión detalles complejos y ofrecer superficies lisas, una de las características más representativas de la impresión 3D por estereolitografía. Las piezas impresas son lo suficientemente resistentes como para usarlas sin poscurado, lo que las hace adecuadas para pruebas a medida y para la fundición directa a la cera perdida.(Formlabs 2019)

WAX 40 al tener mayor concentración de cera facilita el proceso de desparafinado, pero esa misma propiedad hace que durante la impresión se produzcan fallos debido a lo maleable de la cera.

Realizar la impresión en la resina Wax 40 fue sencilla ya que Formlabs tiene un sistema de impresión integrado el cual tiene en su software los parámetros de impresión para sus resinas. El software se llama PreForm y ayuda a identificar los puntos conflictivos de la impresión con una función directa para crear los soportes, y a partir de esta configuración se los modificaron para utilizar menor cantidad y así se demore menos tiempo y ocupe menos material durante la impresión.

Figura 66

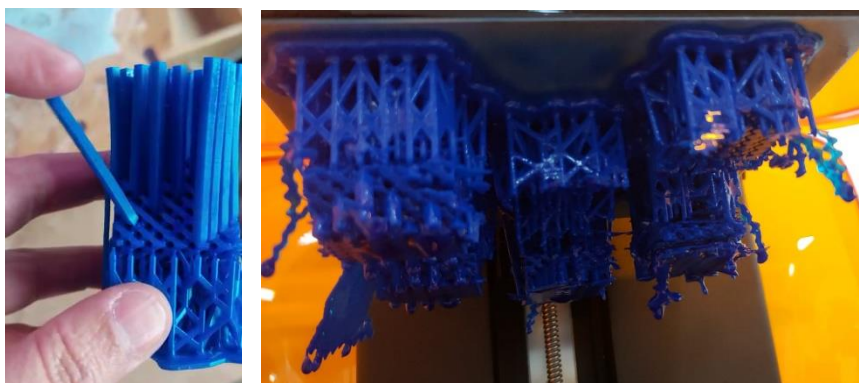
Modelos L=15 y L=10 impresos en resina Castable Wax 40.



Los modelos impresos con longitud de celda unidad de 15 mm y 10 mm no presentaron ningún inconveniente en la impresión. Para una longitud de celda unidad de 5 mm no se logró imprimir ya que hubo errores durante la impresión; al ser muy delgados los alimentadores y la resina muy maleable, con el movimiento del cabezal de impresión los alimentadores se desplazaron y la impresión falló.

Figura 67

Errores de impresión para los modelos con L=5.

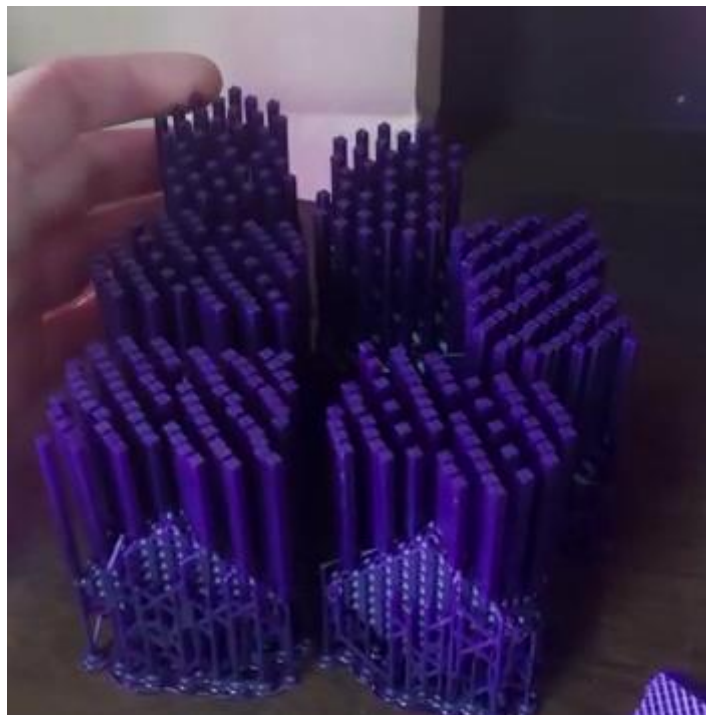


Nota. En la imagen de la derecha se intentó imprimir 6 piezas en un solo turno al fallar uno eso ocasionó que fallen todas las piezas.

Las TPMS con longitud unidad de 5 mm se enviaron a un servicio de impresión externo, y los errores se repitieron. Por recomendación del servicio de impresión se intentó en una resina Castable Wax que al tener menor cantidad de cera en la resina ofrece mejor desempeño al momento de imprimir. Con esta resina se obtuvo una buena impresión de las TPMS con los bebederos.

Figura 68

Impresiones de los modelos con L=5 en resina Castable Wax.



El post procesamiento de ambas resinas por recomendación del fabricante es someter a un proceso de limpieza de ultrasonido con alcohol isopropílico durante unos 30 minutos, no se recomienda ciclos de curado debido a la contracción del material.

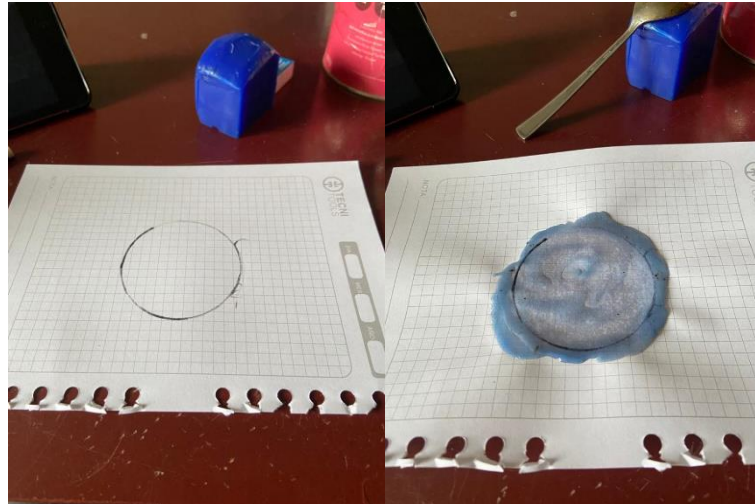
Finalmente se quitó con mucho cuidado los soportes de la impresión y con una lija 1200 se pulió la superficie para extraer los residuos superficiales.

Fabricación del molde de fundición.

Siguiendo las recomendaciones del maestro joyero Andrés Benítez. En una base de papel se dibujó el ancho del cubilete y encima de este se puso cera derretida,

Figura 69

Paso 1. Dibujar el contorno del cubilete en una hoja de papel y cubrirlo con cera.



Después de cercarse la cera, con plastilina se fabricaron domos para que den la forma del bebedero principal,

Figura 70

Paso 2. Con plastilina formar un domo.



Se incrustaron las impresiones sobre los domos y se sellaron los espacios entre los bebederos impresos y la plastilina con cera derretida.

Figura 71

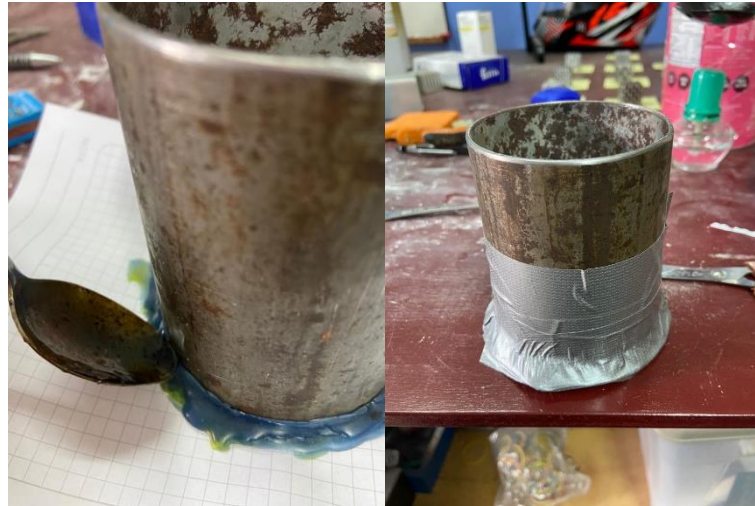
Paso 3. Insertar el modelo de resina y donde se insertó sellar con cera alrededor.



Se cubrió con el cubilete la impresión y se selló la unión entre la base del cubilete y el papel con cera con cera para evitar que se filtre el agua y luego se recubrió la base con cinta de ducto para evitar la filtración del yeso. Es importante escoger un tamaño de cubilete adecuado. La distancia desde el modelo de resina hasta la pared del cubilete debe ser mínimo 5 mm y en el fondo se debe dejar 1 cm para que al momento del vertido el metal no desfonde al molde.

Figura 72

Paso 4. Sellar la base del cubilete con cera y envolver con cinta de ducto la base para que no pueda filtrar el agua o el yeso.



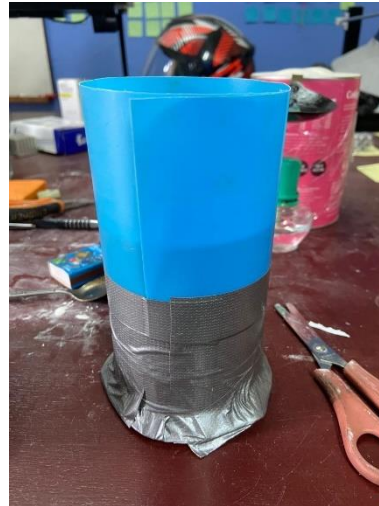
El material refractario con el que se fabrica el molde es uno de los factores más importantes en el proceso de fundición, existen varios yesos de fundición que se comercializan en el país, pero Formlabs recomienda utilizar un yeso de fundición para sus resinas “casteables” ; este es el Optima de Prestige Certus, lamentablemente no se pudo encontrar un proveedor local de este yeso en específico, pero se encontró un yeso con características similares hecho por el mismo por el mismo fabricante Prestige Certus, este tiene el nombre de Sigma. La diferencia recae en el límite máximo que soporta el yeso que está por encima de los 1000 °C, esto no fue un problema para el experimento desarrollado en este trabajo ya que solo se busca llegar a 790 °C.

Cuando se realiza la extracción del aire atrapado dentro del yeso utilizando una cámara de vacío este tiende a subir como espuma por lo que fue necesario colocar una extensión plástica alrededor del cubilete para que el yeso no se desborde en el proceso de vaciado.

Figura 73

Paso 5. Envolver la parte superior con una lámina plástica de manera que eleve la altura del cubilete.

Esto para que durante el proceso de vacío el yeso no se desborde.

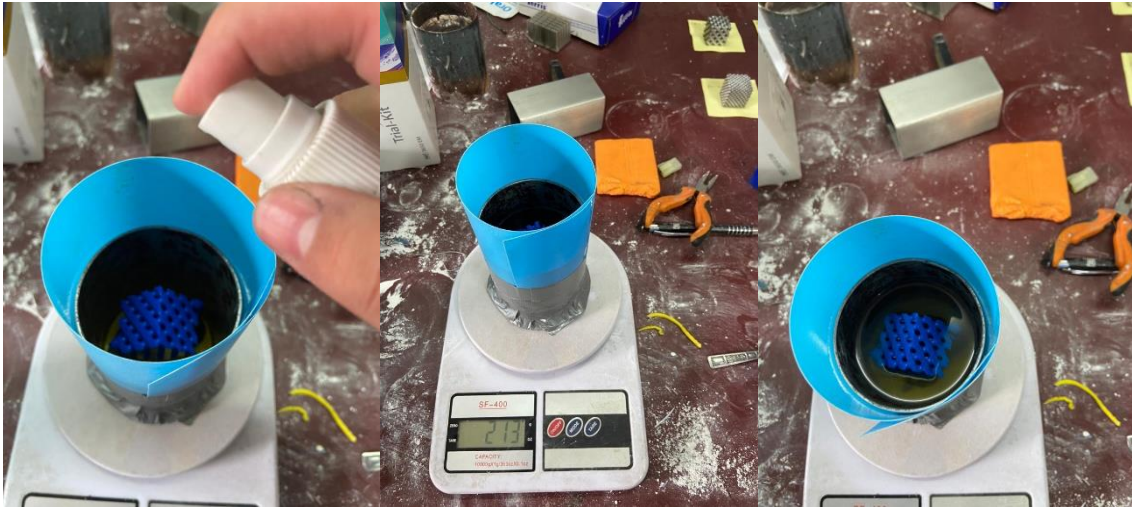


Se rocía el modelo interno con alcohol para que rompa la tensión superficial de la cera con el yeso según explica el maestro Andrés Benítez. Luego con agua tibia se llena hasta que cubra aproximadamente 3/4 partes de la pieza y esa agua se la pone en un recipiente donde se le hecha el yeso poco a poco hasta obtener una consistencia espesa y sin grumos. El fabricante del yeso recomienda que se use entre 38% y 40% de agua del total del peso del yeso.

Figura 74

Paso 6. Rocíar con alcohol el modelo de resina y luego cubrir con agua hasta 3/4 partes el modelo de

resina. Medir el peso del agua y calcular la cantidad de yeso. Añadir el yeso al agua y mezclar de manera enérgica.



Se vierte la mezcla dentro del cubilete, procurando que la pieza se bañe mientras se vierte para que el yeso cubra todos los detalles de la pieza y eliminar las burbujas de aire. Luego el cubilete se lleva a una máquina de vacío durante 3 min para que se pueda extraer las burbujas de aire que quedan dentro del yeso.

Figura 75

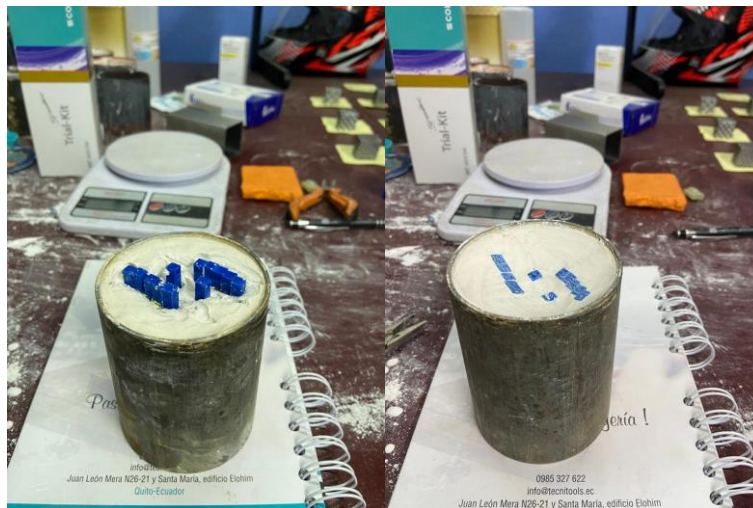
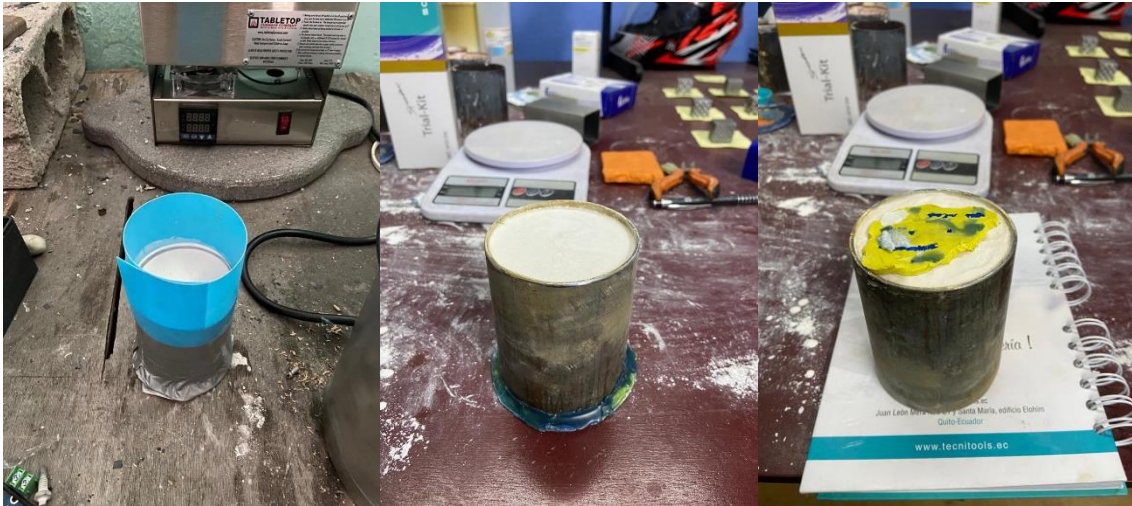
Paso 7. Cubrir con el yeso el modelo de resina y llevar a la cámara de vacío para extraer el aire del interior del yeso.



Después de este proceso se dejó al yeso fraguar por mínimo 2 hora y máximo 24 horas según la recomendación del maestro joyero Andrés Benítez. Durante de este tiempo el yeso se endurece lo suficiente para poder retirar la base de papel con la plastilina. Finalmente, con una cuchara y un cuchillo se fue dando mejor la forma de domo para crear el bebedero principal.

Figura 76

Paso 8. Dejar fraguar el yeso por al menos 2 horas. Luego retirar la base, quietar los restos de plastilina y dar forma de domo a la base del cubilete.



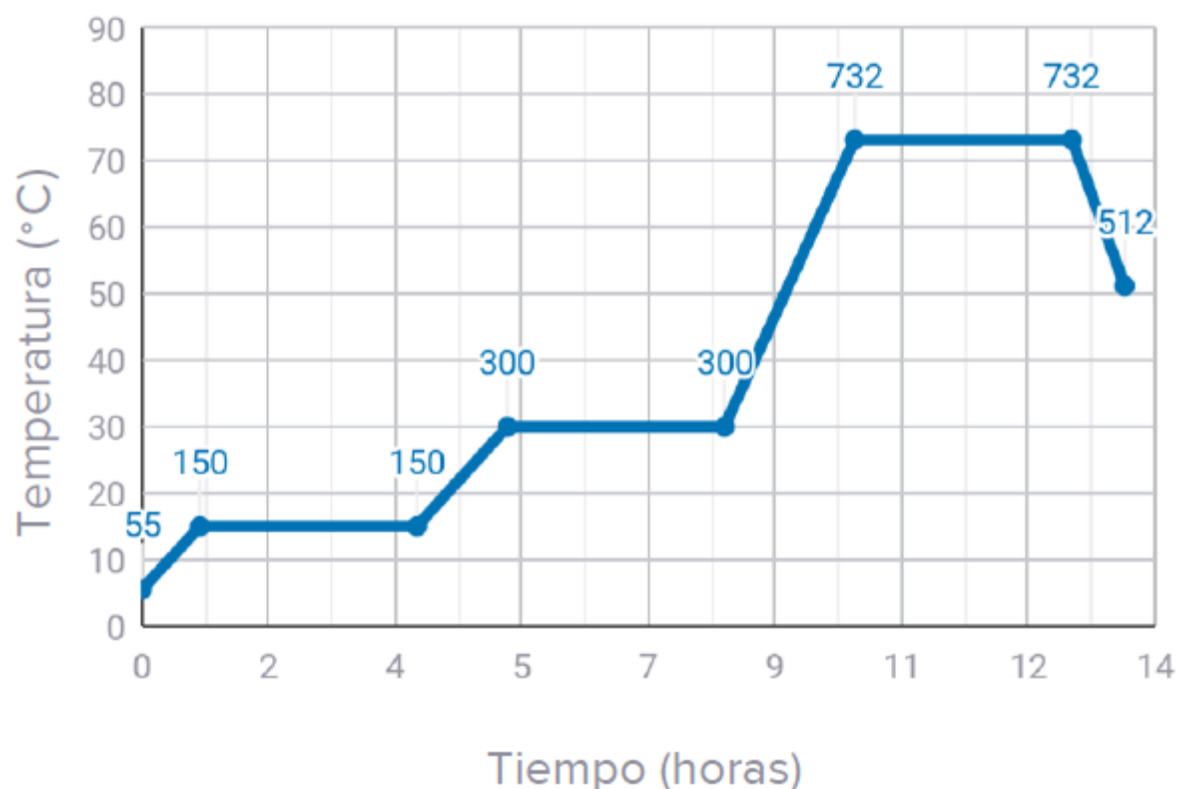
Desencerado y calcinación de la resina.

El molde se ingresó al horno a temperatura ambiente y se programó las rampas de temperatura dadas por el fabricante de las resinas para lograr el desencerado y la calcinación de la cera. A continuación, se presenta la curva de temperatura para la resina WAX 40 de Formlabs:

Figura 77

Gráfica de las rampas de temperatura para el proceso de desparafinado de la resina Castable Wax

40



Nota. Tomado de *Castable Wax 40 Resin* (p. 2), por *Formlabs*, 2019

Esta curva representa 4 etapas que se somete la resina para obtener un correcto proceso de desparafinado, abajo se explica cada una de las fases para esta resina (Formlabs 2020).

Tabla 18

Programa de quemado de la Resina Castable Wax 40.

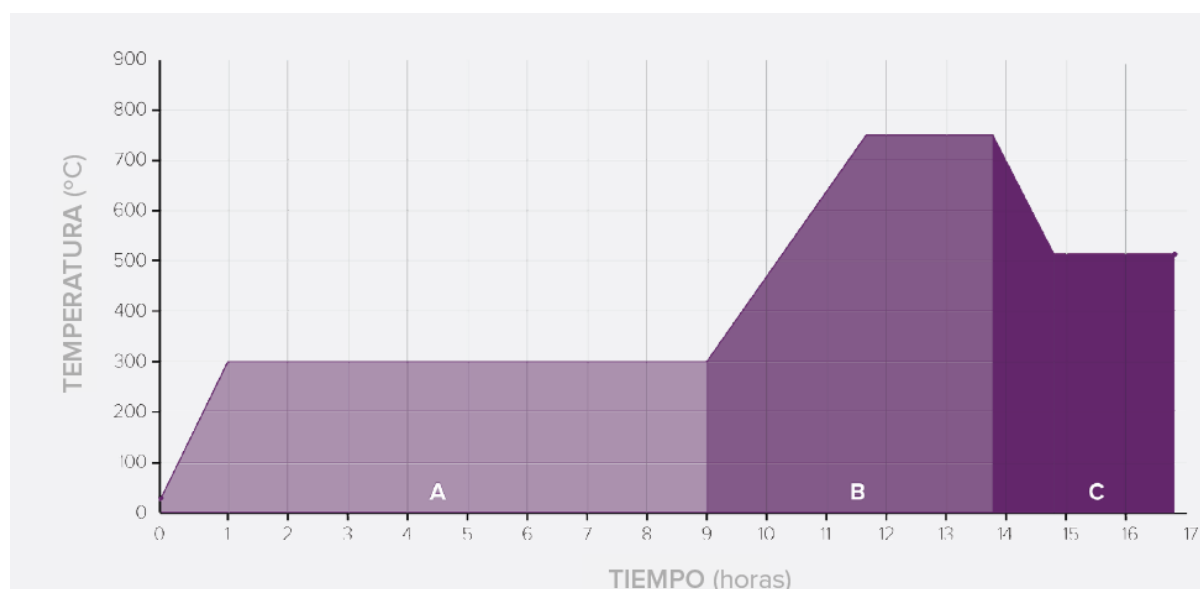
	FASE	TIEMPO	PROGRAMA °C	PROGRAMA °F
A	Reposo en calor La temperatura elevada derrite la cera sólida en la resina para reducir la expansión	Mantenimiento 180 minutos	55°C	131 °F

	FASE	TIEMPO	PROGRAMA °C	PROGRAMA °F
B Transición térmica El quemado comienza con suavidad, descomponiendo el patrón sin una expansión violenta.	Rampa	48 minutos	2 °C/min	3,6 °F/min
	Mantenimiento	180 minutos	150°C	302 °F
	Rampa	75 minutos	2,0 °C/min	3,6 °F/min
	Mantenimiento	180 minutos	300°C	572 °F/min
C Quemado Elimina la resina y la ceniza restantes en el revestimiento para fundición.	Rampa	108 minutos	4,0 °C/min	7,2 °F/min
	Mantenimiento	180 minutos	732°C	1350°F
D Temperatura de fundición Enfría las cajas de moldeo hasta la temperatura de fundición del metal seleccionado.	Rampa	44 minutos	-5 °C/min	-9 °F/min
	Ventana de fundición	Hasta 2 horas	Temperatura de fundición deseada	Temperatura de fundición deseada

Nota. Tomado de *Castable Wax 40 Resin (p. 2)*, por *Formlabs, 2019*

Figura 78

Gráfica de las rampas de temperatura para el proceso de desparafinado de la resina Castable Wax.



Nota. Tomado de *Castable Wax Resin: Proceso de quemado(p. 2)*, por *Formlabs, 2019*

En la figura 79 se presenta las curvas de temperatura a las que se sometió la resina Castable Wax para el proceso de desparafinado. En la tabla 80 se muestra los tiempos exactos y la descripción de cada etapa. (Formlabs 2019)

Tabla 19

Programa de quemado de la Resina Castable Wax 40.

	DESCRIPCIÓN	FASE	TIEMPO HASTA TEMPERATURA	PROGRAMA °C	PROGRAMA °F
A	Introduce las cajas de moldeo en el horno a temperatura ambiente.	Inserción de las cajas de moldeo	0 min	21 °C	70 °F
	Mantenimiento de difusión El bebedero se funde. La cera líquida se derrite, lo que deja un vacío que aumenta el flujo de oxígeno hacia el modelo.	Rampa	60 min	4,7 °C/min	8,4 °F/min
		Mantenimiento	480 min	300 °C	572 °F
B	Quemado final Elimina la resina restante en el revestimiento.	Rampa	100 min	4,5 °C/min	8,1 °F/min
		Mantenimiento	180 min	750 °C	1382 °F
C	Temperatura de fundición Enfría las cajas de moldeo hasta la temperatura de fundición del metal seleccionado.	Rampa Ventana de fundición	60 min Hasta 2 horas	- 4,0 °C/min 512 °C (o temperatura de fundición deseada)	- 7,1 °F/min 954 °F (o temperatura de fundición deseada)

Nota. Tomado de *Castable Wax Resin: Proceso de quemado*(p. 2), por Formlabs, 2019

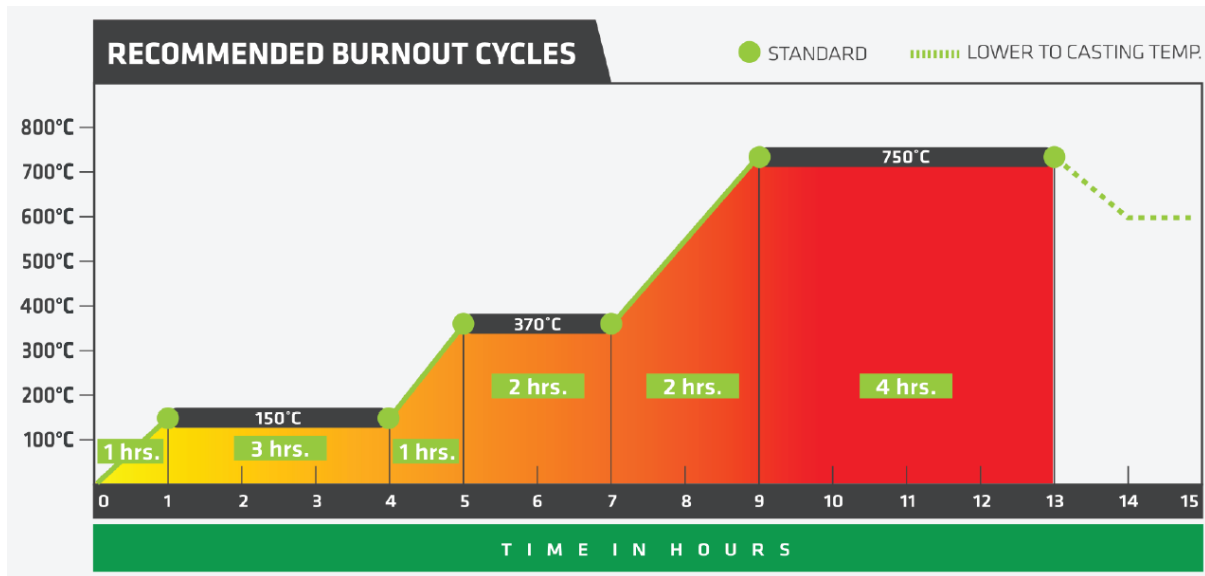
Por recomendación del maestro Andrés Benítez la fase de calcinación de la resina se realizó a 790 °C, en base a su experiencia se logra una mejor calcinación, a partir de allí se bajó la temperatura hasta la temperatura del molde.

El fabricante del yeso también recomienda un proceso de quemado para que las propiedades del yeso sean las mejores, esa curva de temperatura se presenta en la figura 79. En este

estudio se tomó en cuenta los procesos de quemado de la resina debido a la similitud entre los procesos de quemado de la resina y el yeso.

Figura 79

Gráfica de las rampas de temperatura para el proceso de quemado del yeso Sigma de Certus Prestige.



Nota. Tomado de SIGMA, *for Casting Silver Brass, and Bronze* (p. 1), por Certus Prestige, 2022

Es importante al momento de poner el cubilete dentro del horno que este tenga una base de metal para que la resina que cae se quede en esta base y no en el recubrimiento inferior del horno. Según el maestro Andrés Benítez hay resinas que no se calcinan bien y pueden dejar residuos chiclosos en la base, así se protege el horno de ese tipo de daño. Además, se añade una base metálica que eleve el cubilete para que la resina que se derrite se pose en el espacio que queda ente la base metálica y el borde inferior del cubilete.

Figura 80

Inicio del ciclo de desparafinado y quemado del molde.



Vertido y solidificación.

Las aleaciones de aluminio por lo general se consideran muy susceptibles de fundirse. El punto de fusión del aluminio puro es de 660 °C, por lo que las temperaturas de vertido de las aleaciones fundidas de aluminio son bajas en comparación con el hierro colado y el acero. Sus propiedades las hacen atractivas para la fundición: poco peso, rango amplio de propiedades de resistencia que se logran por medio de tratamiento térmico y facilidad de maquinado.

En el mercado nacional encontrar aleaciones de aluminio específicos no es muy sencillo. Pero se encontró un aluminio para fundición proveniente de material reciclado.

Unos 30 minutos antes de terminar el proceso de desencerado y calcinación de la resina se empezó a calentar el aluminio para poder fundirlo a una temperatura aproximada de 700 °C. Con el soplete se fue derritiendo el aluminio. Con una cuchara metálica se retiró la escoria y la lámina solida de la superficie.

Figura 81

Fundición de aluminio con soplete.

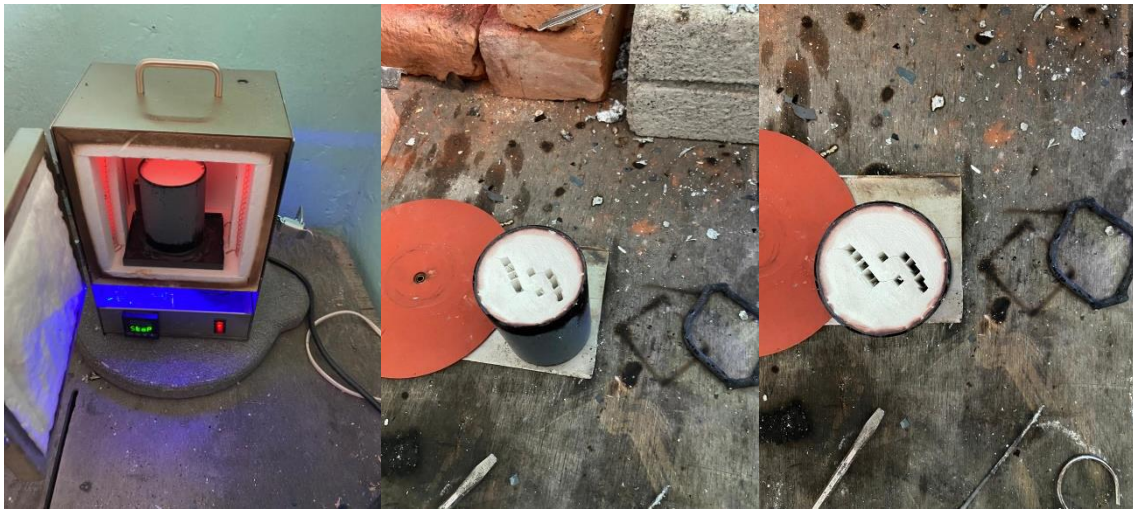


Nota. Es importante retirar la escoria que se encuentra en la parte superior del metal fundido.

Al sacar el molde del horno este tuvo una baja de temperatura rápida por lo que el vertido se realizó rápidamente. La caída de temperatura rondó entre los 20 y 30 grados centígrados. Así que la temperatura de los moldes al momento de ser sacados fue 20 °C por encima de la temperatura del diseño experimental. Al sacar el molde se le dio la vuelta para que los alimentadores miren hacia arriba y se pueda verter el metal.

Figura 82

Molde después del proceso de quemado completo.

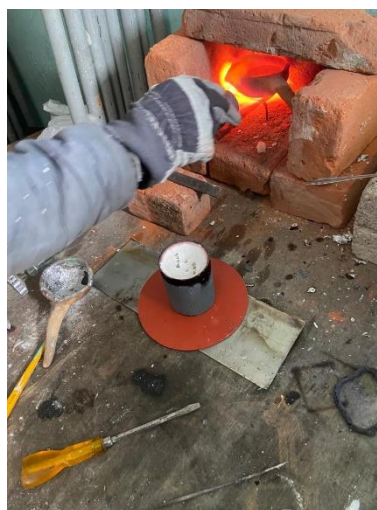


Nota. El molde al finalizar el proceso de quemado no debería tener restos visibles de cenizas o de resina.

Luego, el cubilete se puso sobre un orificio conectado por manguera a la bomba de vacío para que este haga vacío con el propio cubilete y ayude al metal a llegar a todos los rincones de la pieza , esto aumentó la velocidad del metal fundido dentro del molde.

Figura 83

Molde listo para verter el metal.



Nota. Hay que poner el molde encima de la boquilla de vacío para que haga sello entre la base y el cubilete.

El no utilizar la bomba de vacío para el proceso de vertido podría ocasionar que la tensión superficial del metal no se rompa o que el metal no pueda llegar la pieza como se observa en la figura 84, esta muestra corresponde a una pieza de longitud de celda unidad de 5 mm cuyos conductos son de 1.5 mm de diámetro. Se puede observar que el metal solo recubrió la zona de los alimentadores, pero al entrar en la pieza los canales fueron muy delgados y frenaron al metal, este se solidificó en esa zona impidiendo que el metal pueda seguir hasta llenar por completo el molde.

Figura 84

Fundición realizada sin utilizar vacío durante el vertido.



La altura de la cuchara de fundición estuvo alrededor de los 2 a 3 cm desde la boca del bebedero.

Figura 85

Vertido del metal fundido.



Nota. Es muy importante revisar que se mantenga el vacío hasta que el metal en la parte superior se haya solidificado

Ya vertido el metal se dejó reposar el cubilete para que se solidifique. Luego de 10 minutos se sumergió el cubilete dentro de un balde con agua para bajar la temperatura, con ayuda de un desarmador se fue retirando el yeso y se sacó la pieza ya fundida.

Figura 86

Dejar reposar el molde durante 10 min y luego sumergirlo en agua para retirar la pieza.



Post procesamiento

Las operaciones de post procesamiento en este trabajo fueron sencillas. Constaron de 3 etapas: desprendimiento, corte y limpieza.

Desprendimiento: Se trató de conseguir desprender el material cerámico del molde de la pieza metálica. Durante la última etapa de solidificación cuando ya pasaron 10 minutos del vertido se sumergió el molde en agua a temperatura ambiente, esto ablandó el molde y con un desarmador o herramienta con punta se puede raspar el molde y extraer la pieza fundida. Una vez extraída aún queda material cerámico entre los espacios de la TPMS, estos se pueden eliminar con un lavado de agua a presión, se utilizó el chorro de agua de una máquina de lavar autos. Con esto se logró quitar todos los restos de material del molde de la pieza.

Figura 87

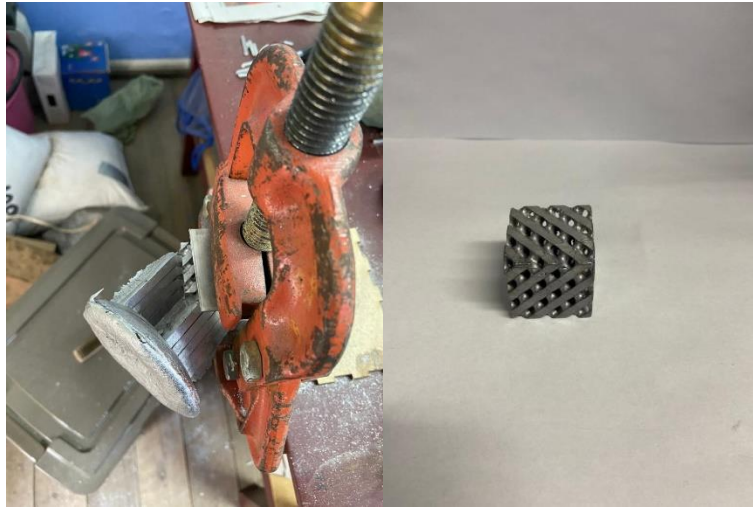
Pieza luego de la limpieza con chorro de agua.



Corte: Con sierra se cortó los alimentadores lo más cercano a la pieza. Luego con una lima se retiró la mayor cantidad del sobrante del bebedero. Con un Dremel y una lija se lijó los últimos vestigios del alimentador y se dejó al ras la superficie de la TPMS. Finalmente, con una lija 1500 se pulió la superficie de la TPMS.

Figura 88

Proceso manual de retirar los alimentadores de la pieza.



Limpeza: La limpieza corresponde al proceso de Granallado que se sometió la pieza para eliminar en su mayoría restos de material cerámico y dejar una superficie uniforme.

Figura 89

Proceso de granallado para limpiar la superficie de la pieza fundida.



Si se desea pulir el aluminio se dan las siguientes indicaciones:

Para pulir aluminio, es necesario primero limpiarlo bien con agua caliente y un detergente suave. A continuación, se debe desengrasar el aluminio con alcohol isopropílico.

Una vez que el aluminio esté limpio y desengrasado, se puede comenzar el proceso de pulido. Se puede usar lija de grano fino para lijar la superficie del aluminio. Una vez que la superficie esté lisa, se debe limpiar de nuevo con agua y un detergente suave.

A continuación, se debe usar una pasta de pulido para aluminio, que se aplica con una almohadilla de lana. Se debe pasar la almohadilla con movimientos circulares para pulir la superficie del aluminio. Después de pulir, se debe limpiar la superficie con un paño limpio y seco.

Por último, se puede aplicar un barniz protector para proteger la superficie del aluminio. Esta capa protectora ayudará a mantener el brillo del aluminio por más tiempo.

Todo el proceso se encuentra resumido en un flujo grama donde se detalla cada uno de los procesos (ver apéndice A).

Coste.

Los costos de los materiales y mano de obra que se presentan a continuación; fueron obtenidos de los pagos realizados por la prestación de servicios de fundición, impresión 3D y la compra de materiales.

Tabla 20

Costos de fabricación de una TPMS.

Insumo	Costo por unidad
Impresión 3D	\$22,50
Servicio de fundición	\$22,75
Yeso de fundición	\$3,50
Cubilete para la fundición	\$2,00
Aluminio	\$2,50
Total	\$53,25

El servicio de fundición toma en cuenta la mano de obra del maestro joyero, el uso del taller, la hora de quemado en horno y el fundido y vaciado del metal en el molde.

El costo del aluminio está tomando en cuenta que se compró un tocho de aluminio de 50 mm de diámetro por 50 cm de largo de donde se obtuvo las 18 piezas que se fundieron y se pusieron en los moldes.

Cada uno de las TPMS tiene un valor de fabricación de \$53,25 eso multiplicado por las 18 piezas fundidas da un valor de \$958,50 en total para llevar a cabo el experimento.

Control de calidad.

Los procedimientos de inspección en una fundidora incluyen los siguientes:

- Inspección visual para detectar defectos obvios tales como vacíos, cierres fríos y defectos superficiales severos
- Mediciones dimensionales para garantizar que se cumple con las tolerancias, y
- Pruebas metalúrgicas, químicas, físicas y de otro tipo, relacionadas con la calidad inherente del metal que se funde (Groover 2007).

Algunos defectos no son demasiado serios, y es posible reparar la pieza fundida por medio de soldadura, esmerilado u otros métodos de rescate.

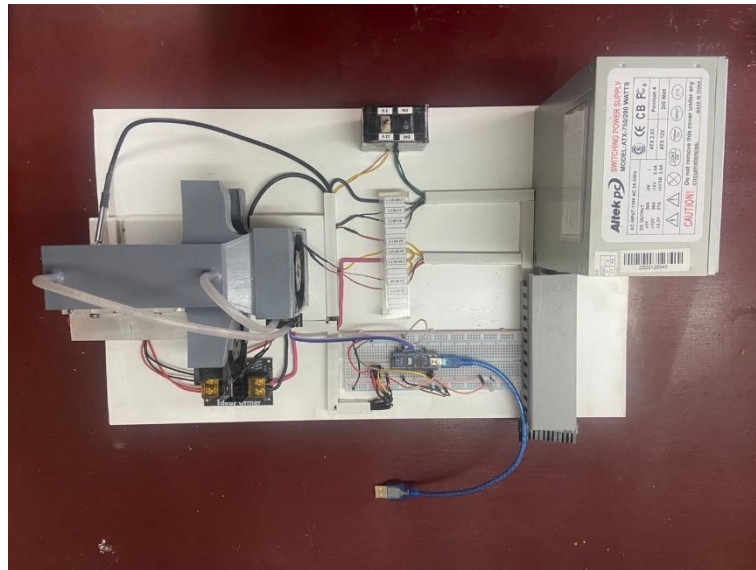
Para este trabajo se realizó los dos primeros procedimientos de inspección. De manera visual se analizó que en la pieza no existan vacíos, cierres en frío, burbujas de aire, cavidades de fuga, porosidad en las paredes o agrietamientos. También se midió que cumpla con las dimensiones de un cubo de 30x30x30 mm.

Pruebas de funcionamiento.

Para las pruebas de funcionamiento se utilizó un banco de pruebas desarrollado por (Andrade Villacis 2022) en su tesis Estudio de transferencia de calor en estructuras celulares TPMS (Triply Periodic Minimal Surface) fabricadas mediante estereolitografía.

Figura 90

Banco de pruebas para medir temperatura de entrada y de salida de aire.



Dentro del banco de prueba una de las caras de la TPMS entró en contacto con una pared del banco de pruebas que fue calentada por celdas de Peltier, con un ventilador se hizo circular aire a través del conducto y se midió la temperatura del aire antes y después de pasar por la TPMS. Las condiciones del experimento fueron:

Velocidad del aire: 2.5 m/s

Temperatura de la base: 50 °C

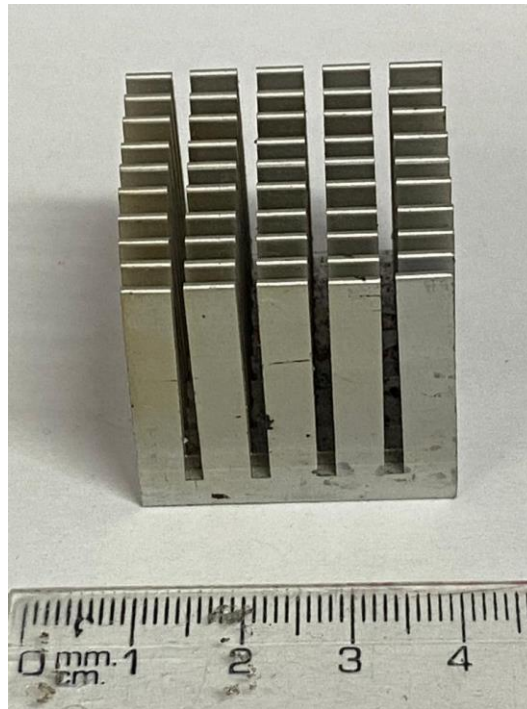
Para realizar las pruebas se tomaron las TPMS fundidas que mejor acabado tuvieron de cada una de las longitudes de celda unidad, estas fueron:

- L5 – 72A – 150 °C – Primera Corrida
- L10 – 9A – 150°C – Segunda Corrida
- L15 – 5A – 345 °C – Segunda Corrida

Adicionalmente, se tomó datos con un disipador convencional de aletas para comparación

Figura 91

Disipador de aleta comercial de 30x30x30 mm.

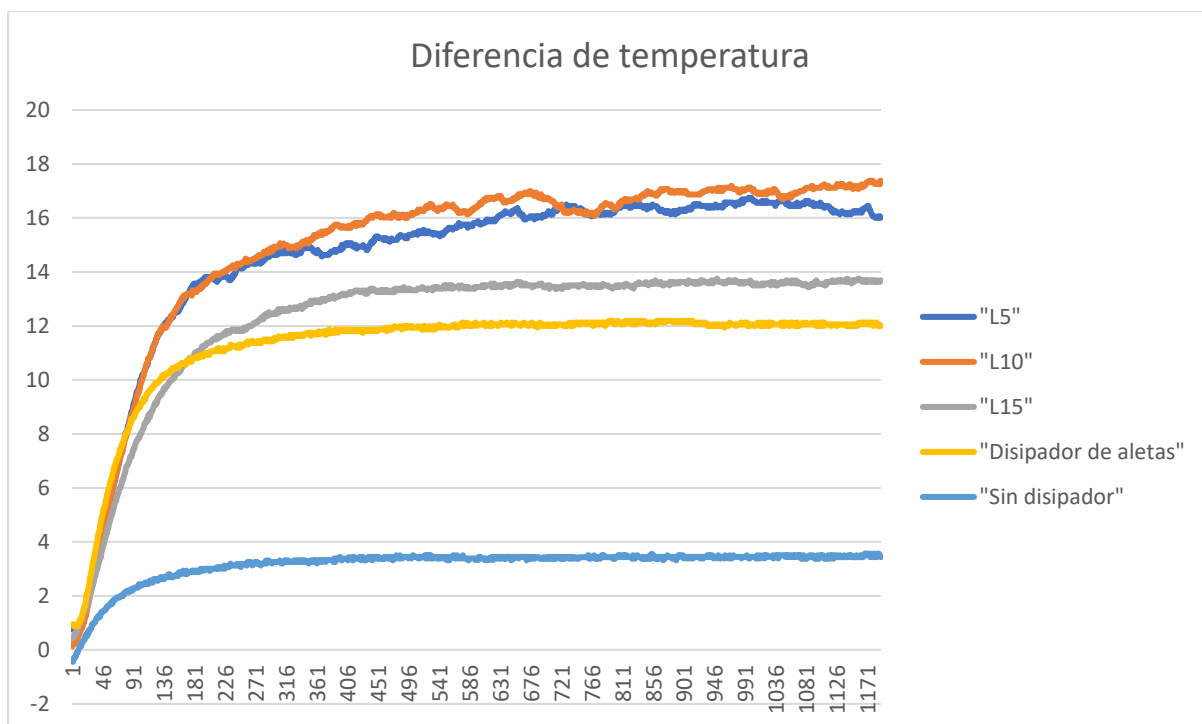


Y también se tomaron los datos sin ningún tipo de intercambiador, es decir con el canal vacío.

En la siguiente figura se observó la diferencia de temperatura del aire para cada uno de los casos medidos:

Figura 92

Curvas de diferencia de temperatura medida con el banco de pruebas.



En la figura 92 se observa que hay un tiempo transitorio desde que empieza la medición hasta que la diferencia de temperaturas llega a un valor estable. Sin ningún tipo de disipador el aire que atraviesa el conducto se calienta en promedio $3.44\text{ }^{\circ}\text{C}$ como se ve en la tabla 22. La pieza que mayor diferencia de temperatura presentó fue una estructura TPMS con longitud de celda unidad de 10 mm, con una diferencia de temperatura máxima de $17.38\text{ }^{\circ}\text{C}$ y una promedio en estado estable de $16.98\text{ }^{\circ}\text{C}$.

En la figura 92 se observó que de las tres estructuras TPMS el disipador con $L = 15$ tuvo el menor desempeño comparado con los otros. Pero todas las estructuras tuvieron un desempeño superior al disipador de aleta incluso $L = 15$ a pesar de que el área de contacto para el disipador de aleta fue de aproximadamente 130 cm^2 y para $L = 15$ el área es de 95.68 cm^2 .

La máxima diferencia de temperatura y el promedio se presenta a continuación

Tabla 21

Máxima diferencia de temperatura medida y promedio de diferencia de temperatura medida en estado estable.

Disipador	Máxima diferencia de temperatura [°C]	Diferencia de temperatura promedio en estado estable [°C]
Sin disipador	3.57	3.44
Disipador de aletas	12.19	12.09
Disipador L15	13.94	13.65
Disipador L10	17.38	16.98
Disipador L5	17	16.33

Resultados y discusión

Análisis del diseño experimental de la fabricación del intercambiador compacto TPMS.

Para medir el resultado de la fundición se tomó dos características: la calidad superficial y el peso real versus el peso teórico. Además, se midieron las longitudes de las TPMS para que se cumpla que sea de 30x30x30 mm. Con estos últimos datos se determinó la capacidad del proceso.

Calidad superficial

La calidad superficial se evaluó por inspección visual otorgando una calificación de 1 a 5 con las siguientes características

- 1 – Presenta superficies incompletas
- 2 – Superficie con mucha porosidad superficial y la presente 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

La calificación de 1 representa una calidad superficial muy baja y la calificación de 5 una muy buena calidad superficial

Los resultados fueron los siguientes para la primera corrida del experimento

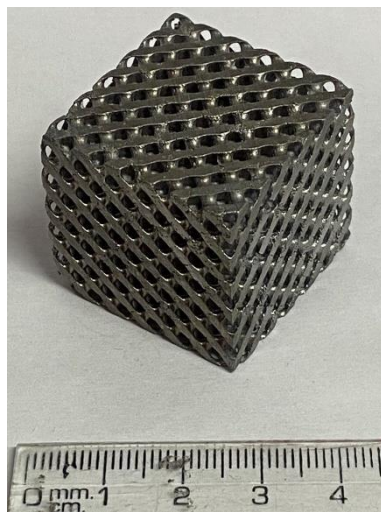
Tabla 22

Resultados de la fundición y calificación de la calidad superficial del primer experimento.

Número	Fotografía	Calificación de inspección
1	Figura 93	4

visual

Modelo: L5 – 72A – 150 °C



2 **Figura 94**

5

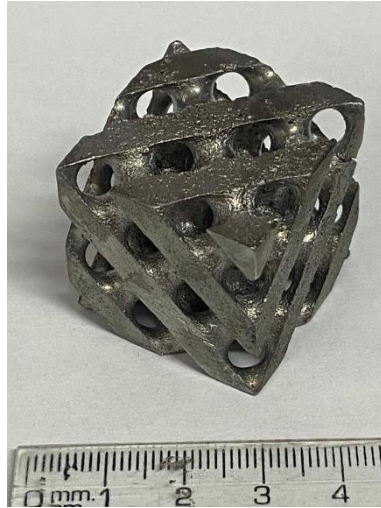
Modelo: L10 – 9A – 150 °C



Número	Fotografía	Calificación de inspección
3	Figura 95	3

visual

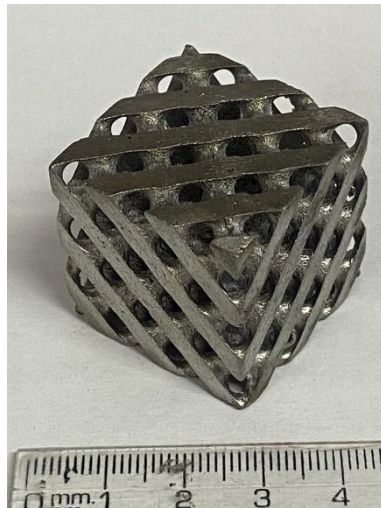
Modelo: L15 – 3A – 150 °C



4 **Figura 96**

4

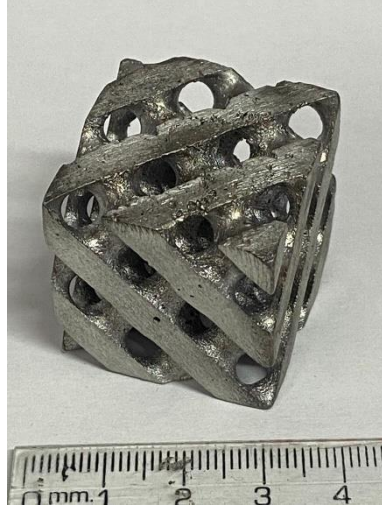
Modelo: L10 – 12A – 345 °C



Número	Fotografía	Calificación de inspección
5	Figura 97	4

visual

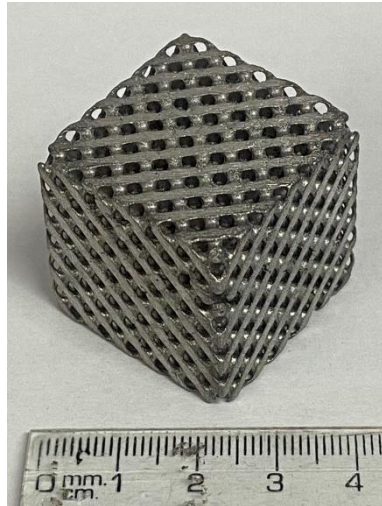
Modelo: L15 – 5A – 345 °C



6 **Figura 98**

1*

Modelo: L5 – 36A – 345 °C



Número	Fotografía	Calificación de inspección
7	Figura 99	2

visual

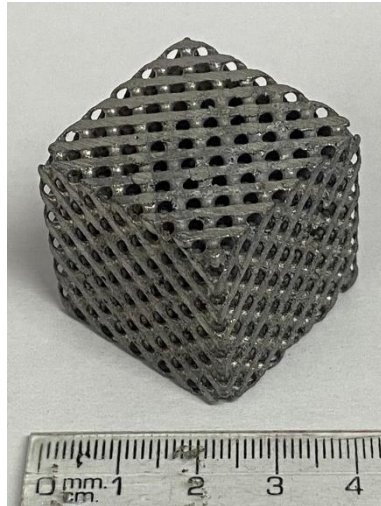
Modelo: L15 – 6A – 540 °C



8 **Figura 100**

2

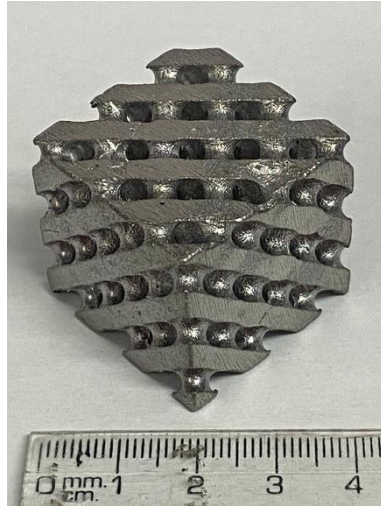
Modelo: L5 – 54A – 540 °C



Número	Fotografía	Calificación de inspección
9	Figura 101	2

visual

Modelo: L10 – 6A – 540 °C



*En el modelo L5 – 36A – 345 °C presenta una superficie con poca porosidad, pero presenta superficies incompletas por lo que su calificación es tan baja.

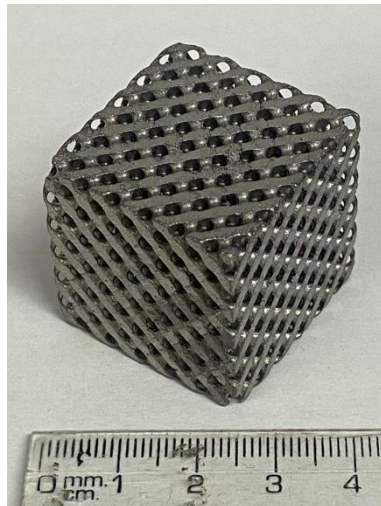
Para la segunda corrida se tuvo los siguientes resultados

Tabla 23

Resultados de la fundición y calificación de la calidad superficial del segundo experimento.

Número	Fotografía	Calificación de inspección visual
1	Figura 102	4

Modelo: L5 – 72A – 150 °C



2 **Figura 103**

5

Modelo: L10 – 9A – 150 °C

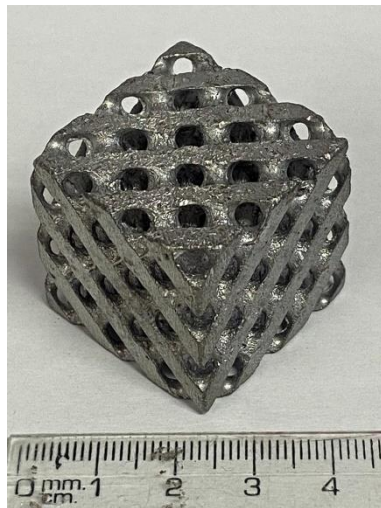


Número	Fotografía	Calificación de inspección
3	Figura 104	2

visual

Modelo: L15 – 3A – 150 °C4 **Figura 105**

3

Modelo: L10 – 12A – 345 °C

Número	Fotografía	Calificación de inspección
5	Figura 106	5

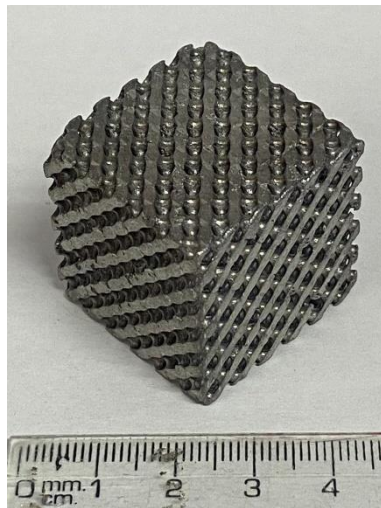
visual

Modelo: L15 – 5A – 345 °C

6 **Figura 107**

3

Modelo: L5 – 36A – 345 °C



Número	Fotografía	Calificación de inspección
7	Figura 108	1

visual

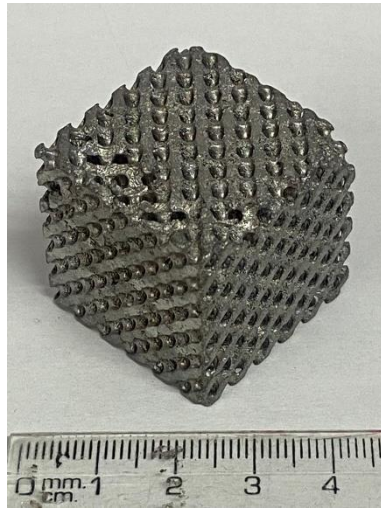
Modelo: L15 – 6A – 540 °C



8 **Figura 109**

1

Modelo: L5 – 54A – 540 °C



Número	Fotografía	Calificación de inspección visual
9	Figura 110	3

Modelo: L10 – 6A – 540 °C



Para la respuesta del diseño experimental se tomó como valor de respuesta el promedio de ambas corridas y los resultados se presentan a continuación:

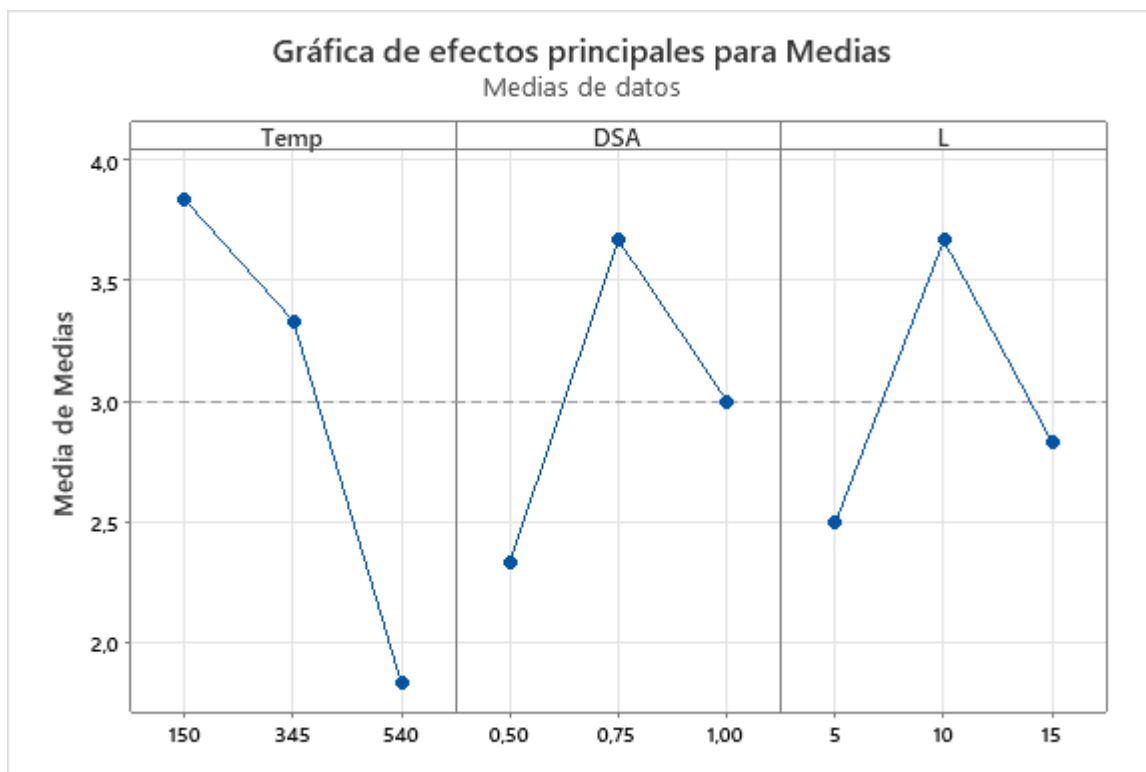
Tabla 24

Tabla de respuesta para medias (calidad superficial).

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

Figura 111

Gráfica de efectos principales para la calidad superficial.



De la tabla se observa que el parámetro más importante es la temperatura del molde, aun así, se deben tomar en cuenta los tres parámetros para el proceso. 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%

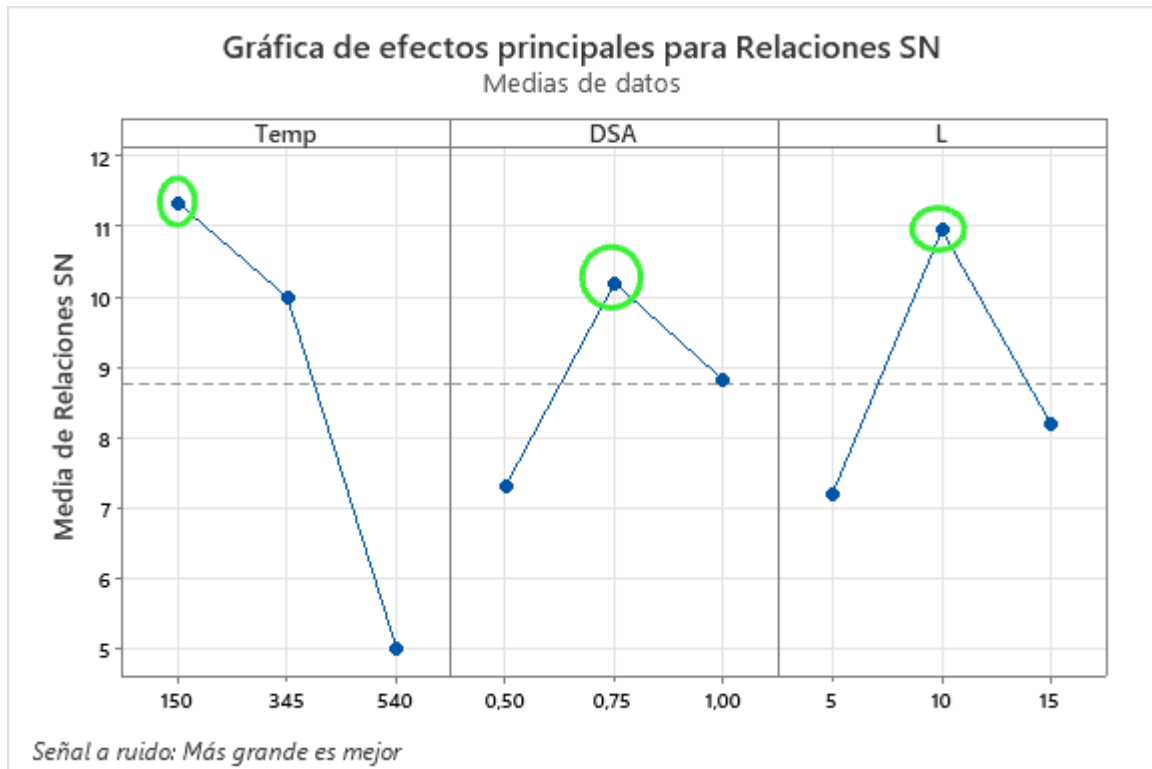
Tabla 25

Tabla de respuesta para relaciones de señal a ruido (Calidad superficial). Más grande es mejor.

Nivel	Temp	DSA	L
1	11,326	7,313	7,195
2	9,989	10,188	10,940
3	5,001	8,815	8,182
Delta	6,326	2,876	3,745
Clasificar	1	3	2

Figura 112

Grafica de efectos principales para Relaciones SN de la calidad superficial.



La mejor configuración para obtener una TPMS de buena calidad superficial es: una temperatura del molde de 150 °C con un 75% de los alimentadores calculados y con una TPMS con longitud de celda unidad de 10.

Peso de los intercambiadores

El peso real versus el peso teórico trata de medir el nivel de contracción y de llenado que tiene la pieza. Se comparó el peso teórico de la TPMS en base al volumen obtenido en el modelo CAD y la densidad del aluminio que se calculó de manera experimental midiendo el volumen de una probeta rectangular y midiendo su peso. Se obtuvo una densidad de 2.78 g/cm^3 . El volumen de las TPMS independientemente de la longitud de celda unidad fue de 13.49 cm^3 , por lo tanto, la masa

teórica debería ser 37.50 g. Se toma la formula del error para medir el porcentaje de diferencia entre lo teórico y lo obtenido en la fundición en nivel de porcentaje.

$$Error = \frac{Peso\ teorico - Peso\ real}{Peso\ teorico} * 100\%$$

Las mediciones se realizaron con una balanza de joyería con resolución de 0.01 g recién calibrada con un peso patrón de 500 g.

Para el peso se obtuvo los siguientes resultados para la primera corrida

Tabla 26

Promedio de pesos medidos para cada pieza fundida del primer experimento.

Número	Modelo	Peso de la primera corrida [g]	Error [%]
1	L5 – 72A – 150 °C	31.89	14.97
2	L10 – 9A – 150 °C	37.07	1.16
3	L15 – 3A – 150 °C	35.29	5.88
4	L10 – 12A – 345 °C	34.84	7.08
5	L15 – 5A – 345 °C	37.25	0.66
6	L5 – 36A – 345 °C	32.61	13.04
7	L15 – 6A – 540 °C	35.91	4.23
8	L5 – 54A – 540 °C	32.30	13.88
9	L10 – 6A – 540 °C	35.29	5.88

Se obtuvieron los siguientes datos para la segunda corrida:

Tabla 27

Promedio de pesos medidos para cada pieza fundida del segundo experimento.

Número	Modelo	Peso de la segunda corrida [g]	Error [%]
1	L5 – 72A – 150 °C	32.08	14.45
2	L10 – 9A – 150 °C	35.67	4.87
3	L15 – 3A – 150 °C	37.07	1.14
4	L10 – 12A – 345 °C	35.95	4.13
5	L15 – 5A – 345 °C	33.34	11.09
6	L5 – 36A – 345 °C	34.32	8.48
7	L15 – 6A – 540 °C	34.40	8.26
8	L5 – 54A – 540 °C	31.44	16.17
9	L10 – 6A – 540 °C	35.41	5.56

Para análisis del diseño experimental se tomó el promedio de las dos corridas de experimentos y se tomó como variable de análisis el error donde un error menor es mejor, la respuesta fue la siguiente:

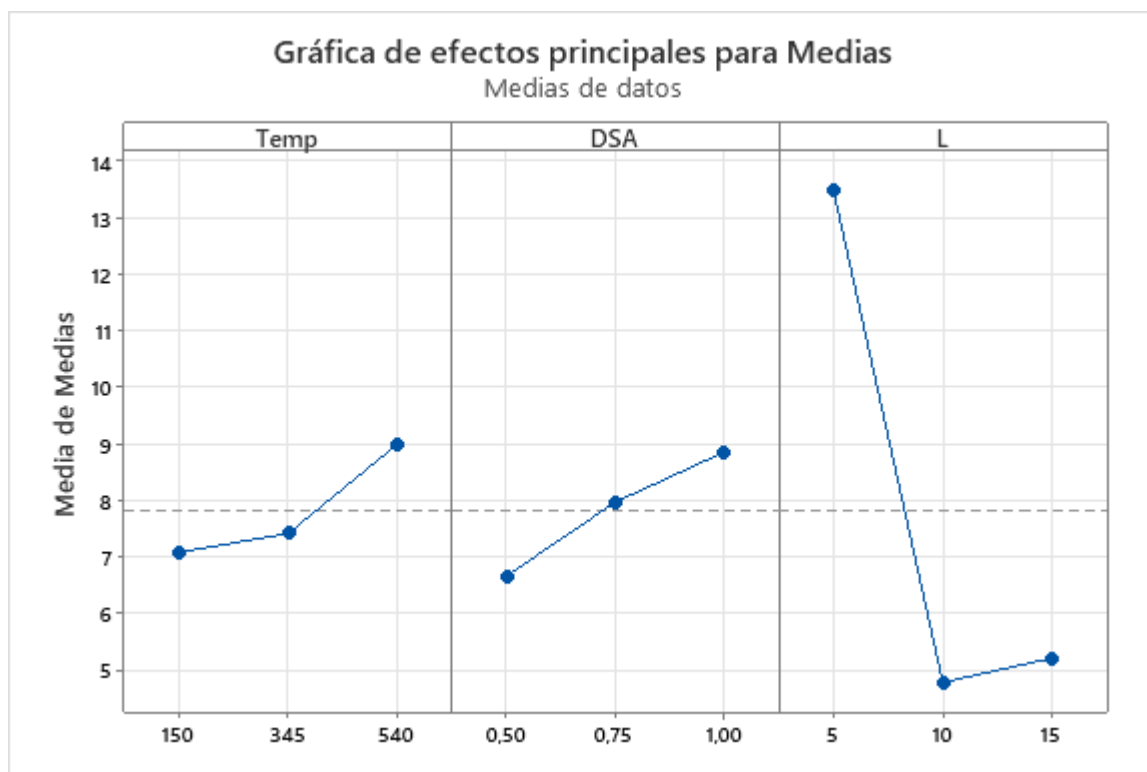
Tabla 28

Tabla de respuesta para medias de peso de los intercambiadores.

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

Figura 113

Gráfica de efectos principales para medias del peso de los intercambiadores.



Para obtener un menor error entre el peso teórico y el peso experimental se debe tener en cuenta la longitud de celda unidad como primordial pues esta afecta un 67,96% a la variabilidad, luego el diseño del sistema de alimentación que afecta un 17,08% finalmente con un 14,96% la temperatura del molde.

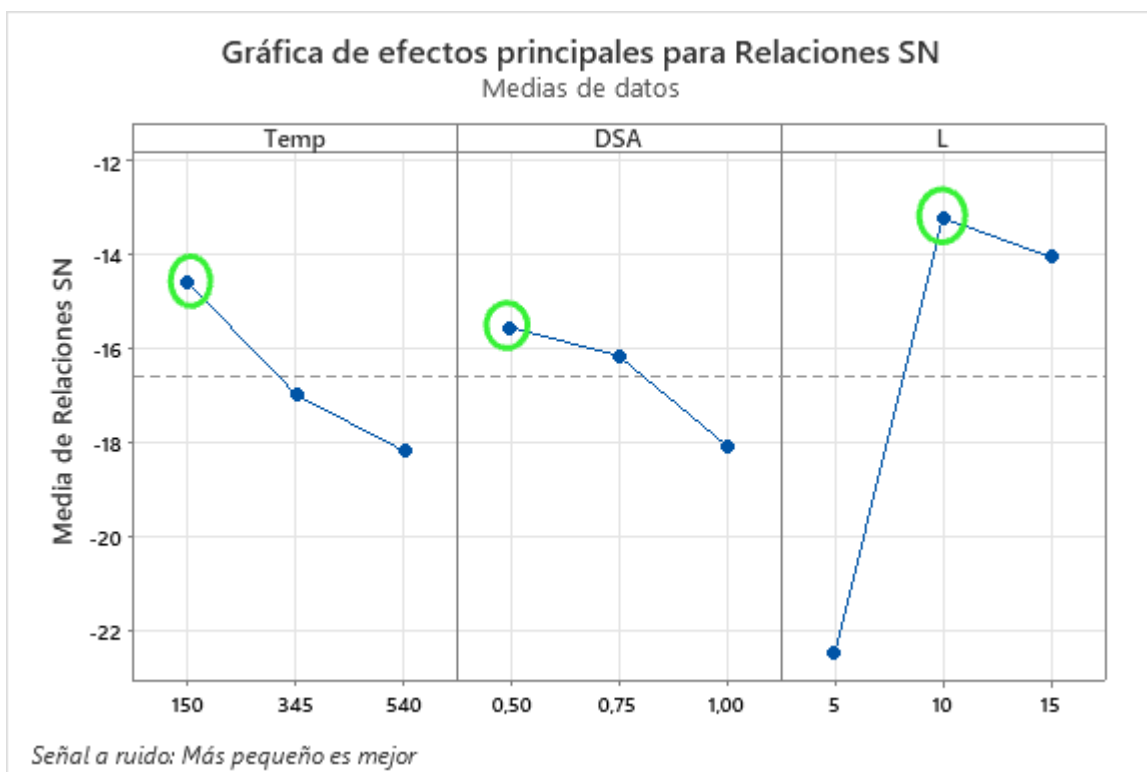
Tabla 29

Tabla de respuesta para relaciones de señal a ruido del peso de los intercambiadores. Más pequeño es mejor.

Nivel	Temp	DSA	L
1	-14,61	-15,57	-22,51
2	-17,00	-16,17	-13,24
3	-18,20	-18,08	-14,07
Delta	3,59	2,51	9,27
Clasificar	2	3	1

Figura 114

Grafica de efectos principales para Relaciones SN del peso de los intercambiadores.



Para lograr una fundición con menor error entre el peso teórico y el peso real hay que tener las siguientes condiciones: Temperatura del molde a 150 °C, un 50% del número de alimentadores calculados y una longitud de la celda unidad de 10.

Defectos de fundición encontrados.

Las piezas fundidas presentaron más de un defecto de fundición a continuación se presentan los errores encontrados en las piezas fundidas.

Tabla 30

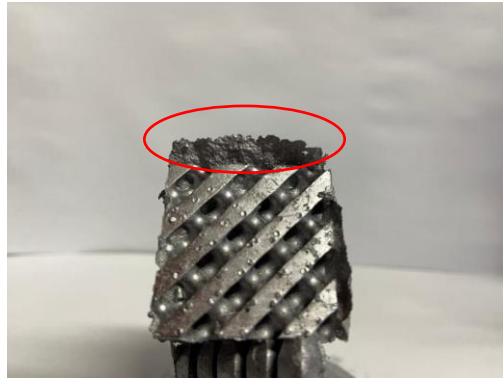
Errores encontrados en las piezas fundidas.

Número	Modelo	Errores en la primera corrida	Errores en la segunda corrida
1	L5 – 72A – 150 °C	<ul style="list-style-type: none"> • Aletas • Porosidad por gas 	<ul style="list-style-type: none"> • Porosidad por gas

Número	Modelo	Errores en la primera corrida	Errores en la segunda corrida
2	L10 – 9A – 150 °C	<ul style="list-style-type: none"> • Aletas • Porosidad por gas 	<ul style="list-style-type: none"> • Aletas
3	L15 – 3A – 150 °C	<ul style="list-style-type: none"> • Porosidad por gas • Quemado incompleto 	<ul style="list-style-type: none"> • Porosidad por gas • Quemado incompleto • Levantamiento de la capa de imprimación
4	L10 – 12A – 345 °C	<ul style="list-style-type: none"> • Porosidad por gas • Exceso de metal • Aletas 	<ul style="list-style-type: none"> • Porosidad por gas • Aletas
5	L15 – 5A – 345 °C	<ul style="list-style-type: none"> • Porosidad por gas • Quemado incompleto 	<ul style="list-style-type: none"> • Aletas
6	L5 – 36A – 345 °C	<ul style="list-style-type: none"> • Aletas • Porosidad por gas 	<ul style="list-style-type: none"> • Porosidad por gas • Aletas • Llenado incompleto
7	L15 – 6A – 540 °C	<ul style="list-style-type: none"> • Quemado incompleto • Porosidad por gas 	<ul style="list-style-type: none"> • Quemado incompleto • Porosidad por gas • Llenado incompleto
8	L5 – 54A – 540 °C	<ul style="list-style-type: none"> • Aletas • Porosidad por gas • Llenado incompleto 	<ul style="list-style-type: none"> • Porosidad por gas • Llenado incompleto
9	L10 – 6A – 540 °C	<ul style="list-style-type: none"> • Aletas • Porosidad por gas 	<ul style="list-style-type: none"> • Aletas • Porosidad por gas

Figura 115

Defecto de aletas en estructura TPMS



Casi es su totalidad las piezas presentaron Aletas como se ve en la figura 115 y porosidad por gas. A continuación, se enlistan las razones más comunes detalladas en (Faccenda 2003) para estos errores:

Porosidad por gas: puede consistir en gas atrapado o de reacción. Distinguir las dos causas es muy difícil:

- Demasiada turbulencia durante el vertido.
- Temperatura demasiado elevada del metal y/o de la mufla.
- Metal contaminado con gas.
- Demasiada humedad en el fundente, si se utiliza.
- Se ha utilizado demasiada chatarra reciclada. Utilice siempre al menos un 50% de metal nuevo.
- Mal quemado del molde.

Aletas en los bordes

- El revestimiento ha absorbido humedad antes de la preparación de la pasta.
- Se ha perturbado el matraz mientras fraguaba el revestimiento.
- La base se ha retirado demasiado pronto.

- Temperatura de quemado demasiado alta.
- Se ha dejado enfriar la mufla entre el desparafinado y el quemado.
- El matraz se ha manipulado incorrectamente o se ha caído.
- El matraz se colocó demasiado cerca de la fuente de calor en el horno de quemado.
- Los matraces no se han mantenido a temperatura de quemado el tiempo suficiente.

Según el autor las causas más probables de las enlistadas anteriormente para el error de porosidad por gas son: la turbulencia durante el vertido, debido a que este fue de manera manual y el vacío pudo crear turbulencia al ingresar el metal al molde. El metal reciclado, el aluminio utilizado fue 100% reciclado. Temperatura demasiado elevada del metal, al no tener un control de la temperatura del metal fundido este pudo estar muy caliente al momento del vertido.

Para las aletas en los bordes las razones más probables son: Temperatura de quemado demasiado alta, por sugerencia del maestro joyero se quemó hasta los 790 °C pero el controlador del horno en el intento de mantener la temperatura controlada superaba los 800 °C varias veces.

Porosidad de las TPMS

Para medir la porosidad obtenida de las TPMS fabricadas se comparó el volumen de cada pieza con el volumen de un cubo sólido fundido. Los volúmenes se midieron por desplazamiento de agua, en un vaso precipitado de vidrio se llenó agua hasta el borde luego se sumergió la pieza y el desplazamiento de agua se recogió en un bowl metálico, luego con una probeta volumétrica de resolución de 1 ml con exactitud de ± 0.5 ml se midió el volumen de agua desplazado. Los resultados se presentan a continuación. El volumen de cada una de las piezas se midió 3 veces y se tomó el promedio. El volumen promedio medido para el cubo sólido fue de 25.33 ml o 25330 mm³.

Tabla 31*Medidas de volumen y porosidad de las estructuras TPMS.*

Modelo	Volumen [ml]	Porosidad
L10 – 9A – 150 °C	8.67	0.34
L10 – 6A – 540 °C	9.33	0.37
L5 – 36A – 345 °C	10.67	0.42
L15 – 6A – 540 °C	11.00	0.43
L15 – 5A – 345 °C	11.33	0.45
L5 – 72A – 150 °C	12.33	0.49
L10 – 12A – 345 °C	11.33	0.45
L5 – 54A – 540 °C	11.00	0.43
L15 – 3A – 150 °C	10.00	0.39

Se realizó una prueba de hipótesis para saber si la muestra obtenida de las piezas no es de 0.5.

Tabla 32*Estadísticas descriptivas para la porosidad de las TPMS.*

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)

μ : media de población de Porosidad

Tabla 33

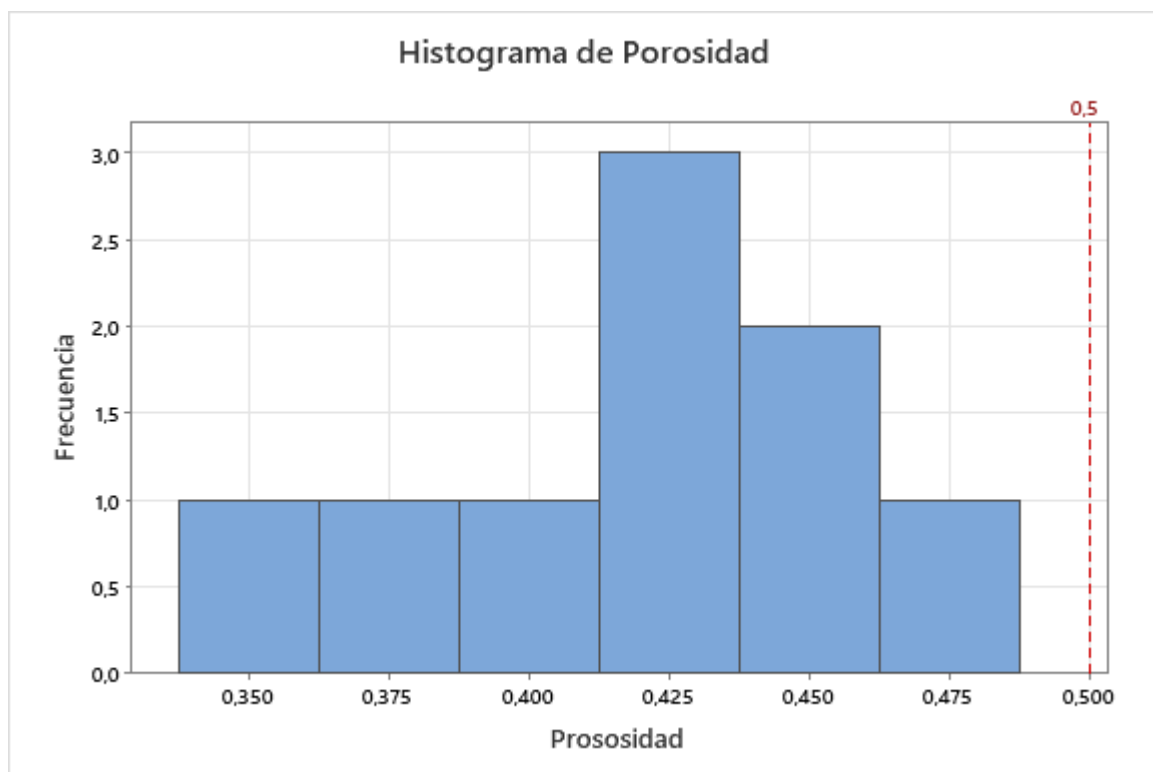
Prueba de hipótesis para la porosidad de las TPMS.

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

El valor p es menor que 0.05 por lo que se acepta la hipótesis alterna, la media de la porosidad de las piezas no es igual a 0.5.

Figura 116

Histograma de la media de porosidad de las estructuras TPMS.



La figura 116 muestra el histograma de las porosidades, es evidente que se encuentran por debajo del valor esperado de porosidad.

Capacidad del proceso

A continuación, se muestran los resultados de las mediciones dimensionales. Las mediciones se realizaron con un calibrador digital con resolución de 0,01 mm. Las mediciones se denominaron Ancho, Largo y Alto tal como se indica en la figura 116.

Figura 117

Designación de nombres para las longitudes de las TPMS.

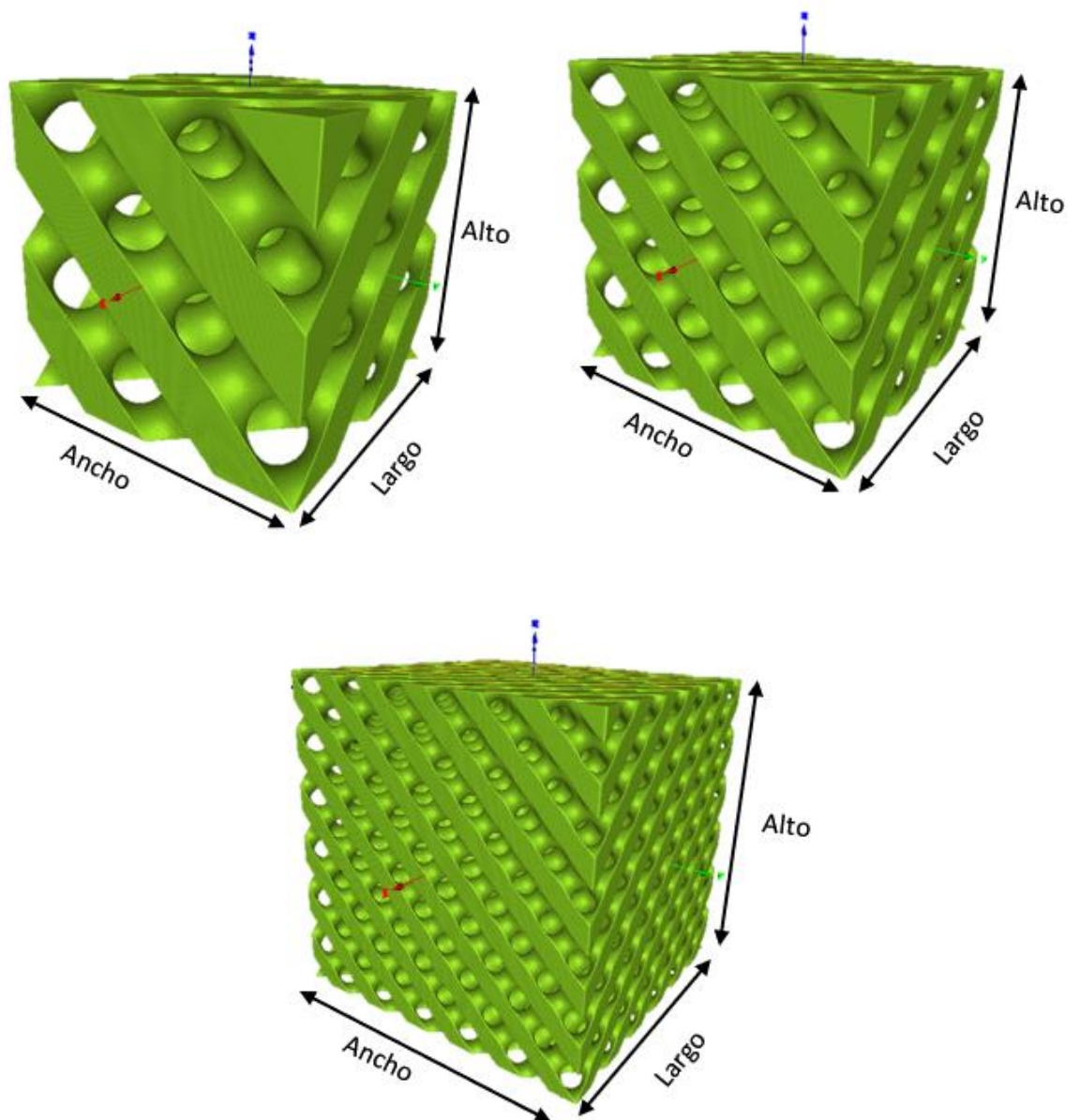


Tabla 34

Medidas de las longitudes y error porcentual de las TPMS fundidas en el primer experimento.

Primer experimento						
Modelo	Largo	Error [%]	Ancho	Error [%]	Altura	Error
	[mm]		[mm]		[mm]	[%]
L5 – 72A – 150 °C	30.13	0.44	29.82	0.60	30.09	0.30
L10 – 9A – 150 °C	29.85	0.51	29.84	0.54	29.91	0.31
L15 – 3A – 150 °C	29.69	1.02	29.95	0.16	29.60	1.32
L10 – 12A – 345 °C	29.76	0.80	29.86	0.47	29.94	0.21
L15 – 5A – 345 °C	30.03	0.11	30.14	0.46	30.49	1.62
L5 – 36A – 345 °C	29.80	0.67	29.84	0.53	29.99	0.04
L15 – 6A – 540 °C	29.99	0.02	29.93	0.22	29.97	0.10
L5 – 54A – 540 °C	29.83	0.56	29.88	0.41	30.04	0.12
L10 – 6A – 540 °C	30.06	0.19	29.80	0.66	29.93	0.23

Tabla 35

Medidas de las longitudes y error porcentual de las TPMS fundidas en el primer experimento.

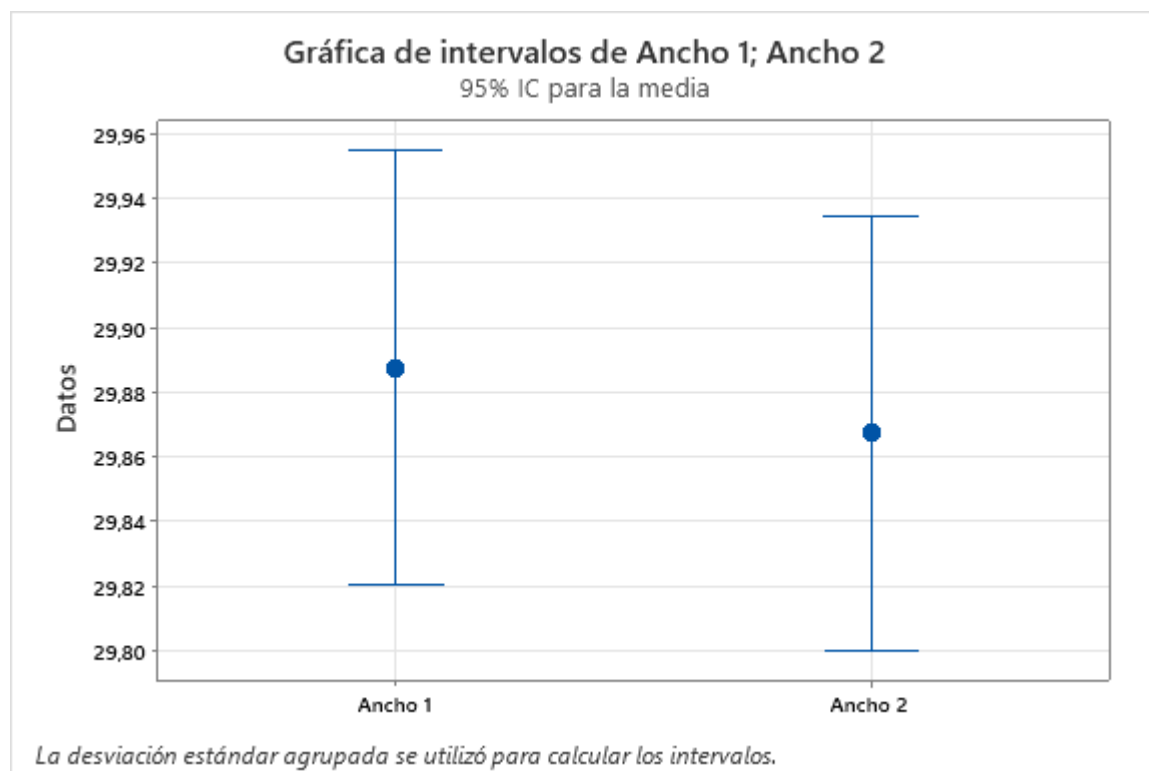
Segundo experimento						
Modelo	Largo [mm]	Error [%]	Ancho [mm]	Error [%]	Altura [mm]	Error [%]
L5 – 72A – 150 °C	30.01	0.03	29.86	0.47	29.97	0.10
L10 – 9A – 150 °C	30.11	0.36	29.85	0.50	30.11	0.37
L15 – 3A – 150 °C	30.26	0.87	29.90	0.34	30.07	0.24
L10 – 12A – 345 °C	29.94	0.21	29.96	0.13	29.98	0.07
L15 – 5A – 345 °C	30.08	0.28	29.87	0.44	29.88	0.39
L5 – 36A – 345 °C	30.04	0.12	29.80	0.68	29.85	0.49
L15 – 6A – 540 °C	29.88	0.41	29.92	0.26	30.03	0.11
L5 – 54A – 540 °C	29.90	0.33	29.84	0.54	29.92	0.27
L10 – 6A – 540 °C	30.00	0.01	29.94	0.20	29.80	0.66

Se realizaron graficas de intervalos para cada longitud comparando el primer y el segundo experimento.

Comparación del ancho del primer experimento y el segundo experimento

Figura 118

Grafica de intervalos para las medidas del ancho de las TPMS.



Para determinar que no haya diferencias estadísticamente significativas entre las medidas del ancho de las TPMS de cada experimento se realizó una prueba t de 2 muestras

Se muestran las estadísticas descriptivas para el ancho medido de las TPMS de cada experimento

Tabla 36

Estadísticas descriptivas de las medidas del ancho de las TPMS.

Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media
Ancho 1	9	29,887	0,114	0,038
Ancho 2	9	29,8674	0,0717	0,024

Se realizó una prueba t de 2 muestras

Tabla 37

Prueba t de 2 muestras de las medidas del ancho de las TPMS.

Hipótesis nula	$H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$	
Hipótesis alterna	$H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$	
Valor T	GL	Valor p
0,45	16	0,662

Estimación de la diferencia

Tabla 38

Estimación de la diferencia de las medidas del ancho de las TPMS.

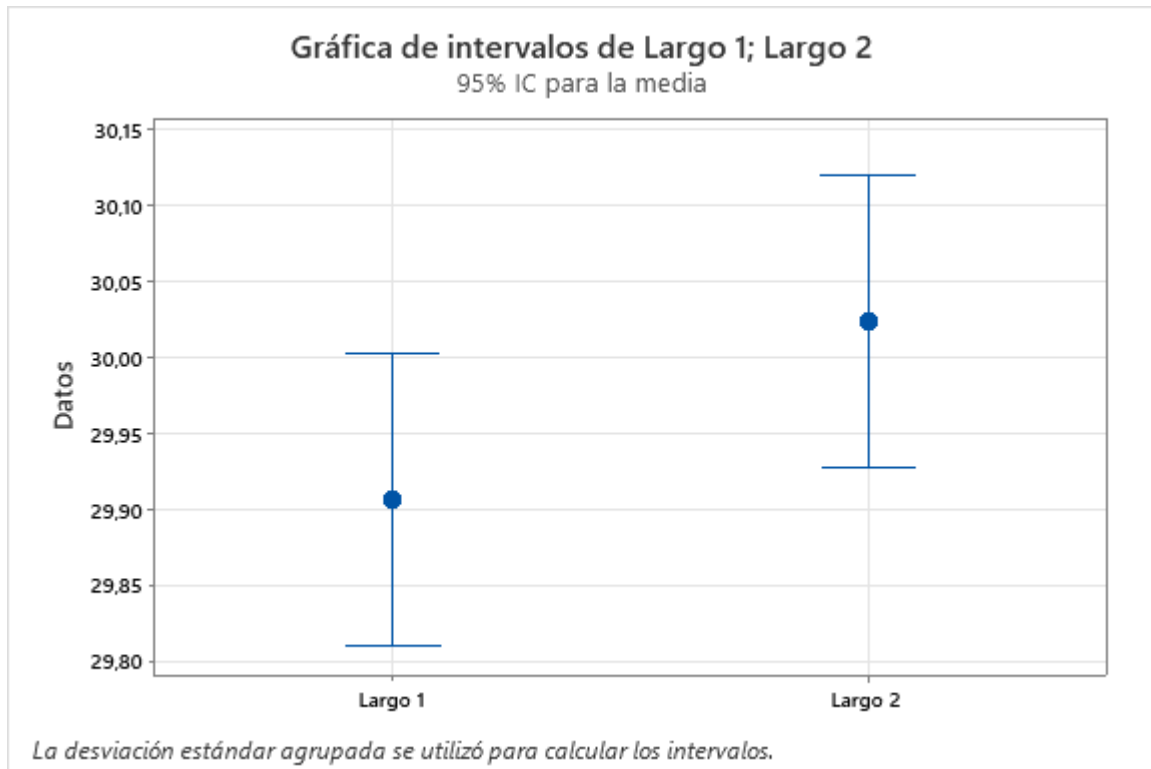
Diferencia	Desv.Est. agrupada	IC de 95% para la diferencia
0,0200	0,0952	(-0,0751; 0,1151)

Se puede concluir que no hay una diferencia estadísticamente significativa entre las longitudes denominadas ancho para las TPMS entre el experimento 1 y el experimento 2 ya que el valor p es mayor que 0.05

Comparación del largo del primer experimento y el segundo experimento

Figura 119

Grafica de intervalos para la medida del largo de las TPMS.



Para determinar que no haya diferencias estadísticamente significativas entre las medidas del largo de las TPMS de cada experimento se realizó una prueba t de 2 muestras

Se muestran las estadísticas descriptivas para el ancho medido de las TPMS de cada experimento.

Tabla 39

Estadísticas descriptivas de las medidas del largo de las TPMS

Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media
Largo 1	9	29,906	0,152	0,051
Largo 2	9	30,023	0,118	0,039

Tabla 40

Estimación de la diferencia de las medidas del largo de las TPMS.

Diferencia	Desv.Est. agrupada	IC de 95% para la diferencia
-0,1174	0,1362	(-0,2535; 0,0187)

Tabla 41

Prueba de hipótesis de las medidas del largo de las TPMS.

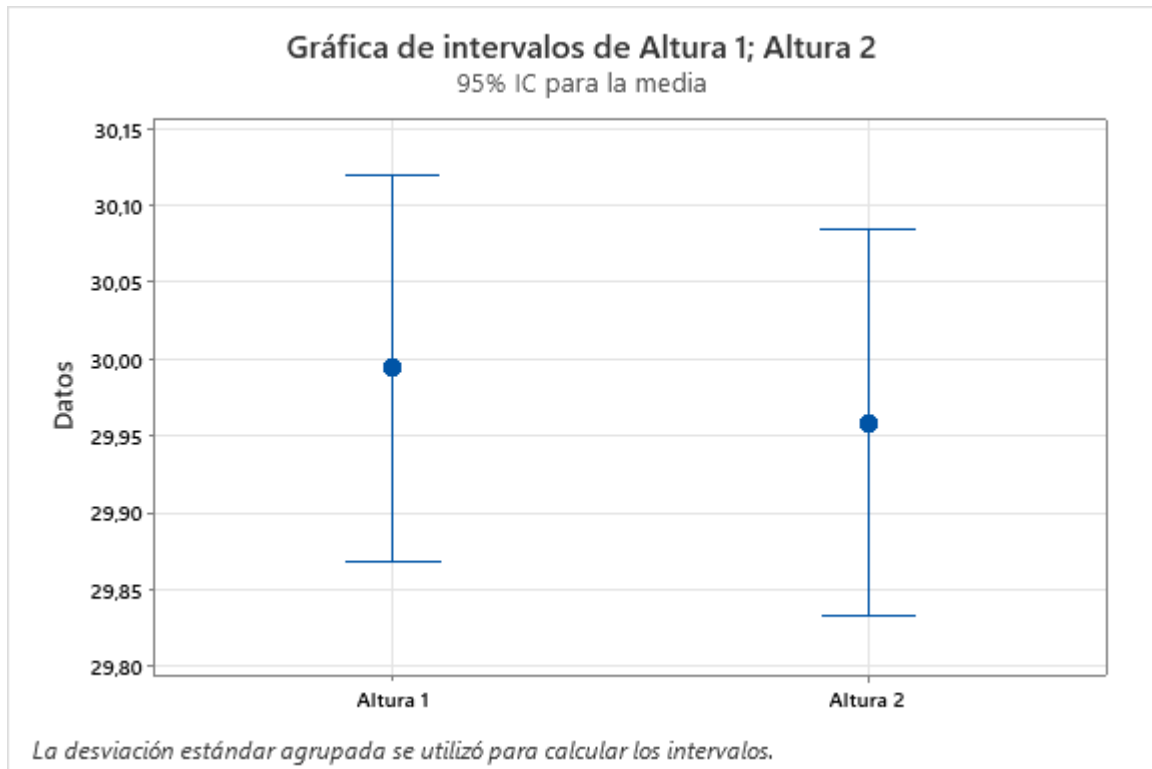
Hipótesis nula	$H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$		
Hipótesis alterna	$H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$		
Valor T	GL	Valor p	
-1,83	16	0,086	

Se puede concluir que no hay una diferencia estadísticamente significativa entre las longitudes denominadas largo para las TPMS entre el experimento 1 y el experimento 2 ya que el valor p es mayor que 0.05

Comparación del largo del primer experimento y el segundo experimento

Figura 120

Grafica de intervalos para la medida del alto de las TPMS.



Para determinar que no haya diferencias estadísticamente significativas entre las medidas del alto de las TPMS de cada experimento se realizó una prueba t de 2 muestras.

Se muestran las estadísticas descriptivas para el ancho medido de las TPMS de cada experimento.

Tabla 42

Estadísticas descriptivas las medidas del alto de las TPMS.

Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media
Altura 1	9	29,994	0,230	0,077
Altura 2	9	29,959	0,103	0,034

Tabla 43

Estimación de la diferencia las medidas del alto de las TPMS.

Diferencia	Desv.Est. agrupada	IC de 95% para la diferencia
0,0356	0,1779	(-0,1423; 0,2134)

Tabla 44

Prueba de hipótesis de las medidas del alto de las TPMS.

Hipótesis nula	$H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$		
Hipótesis alterna	$H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$		
Valor T	GL	Valor p	
0,42	16	0,677	

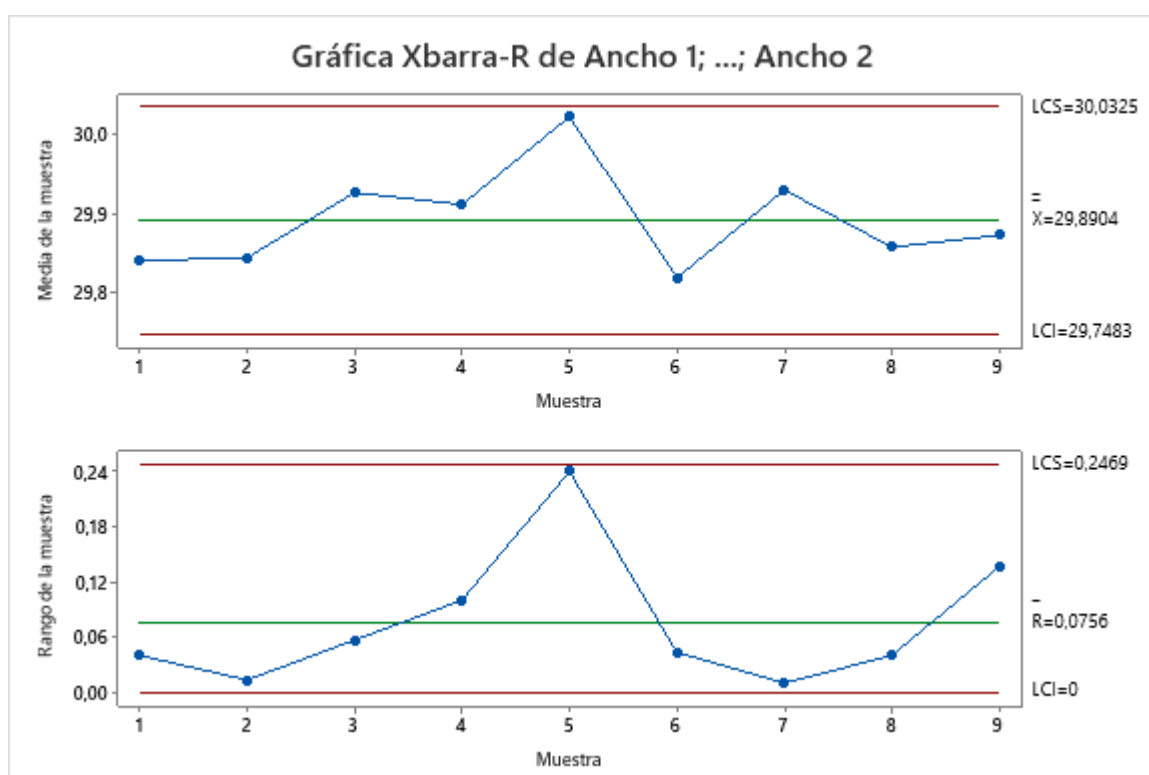
Se puede concluir que no hay una diferencia estadísticamente significativa entre las longitudes denominadas ancho para las TPMS entre el experimento 1 y el experimento 2 ya que el valor p es mayor que 0.05

Cartas de control para las mediciones de longitud de las TPMS

Una gráfica de control indica cuando un proceso está fuera de control y ayuda a identificar la presencia de una variación por causas especiales. Cuando está presente la variación por causas especiales, su proceso no es estable y es necesaria una acción correctiva. (Gutiérrez Pulido y Vara Salazar 2009).

Figura 121

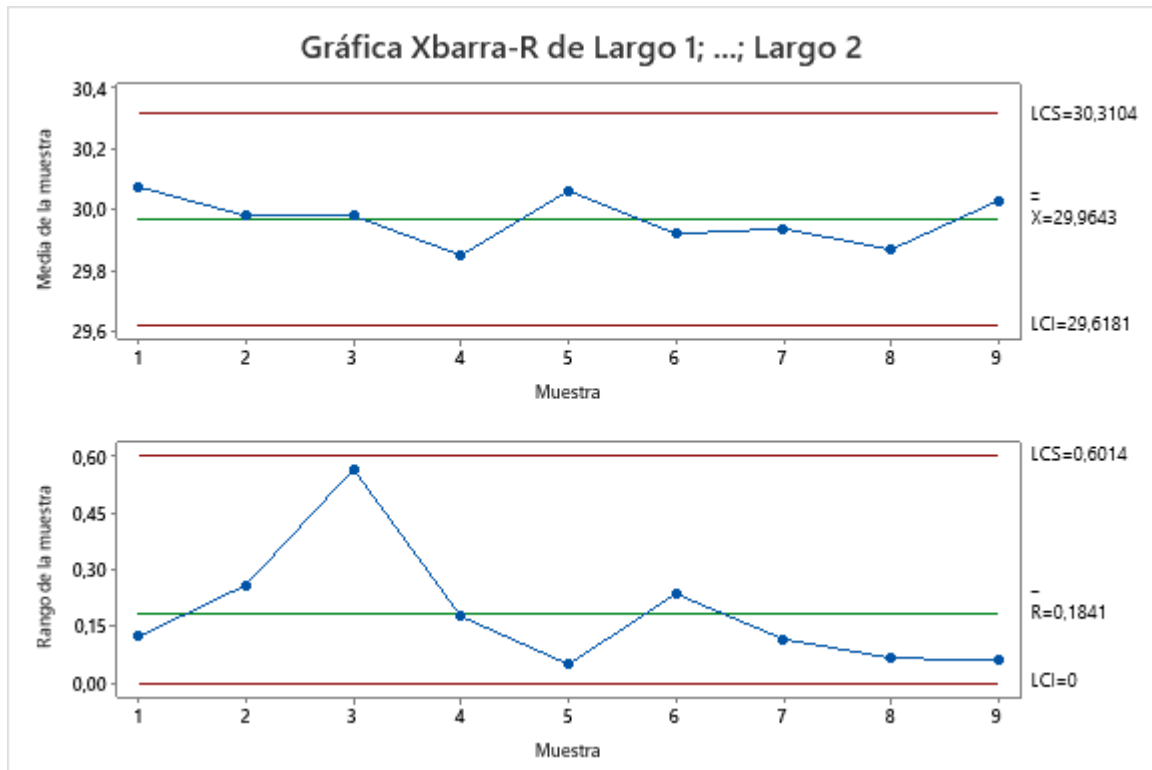
Carta de control para el ancho de las TPMS.



En estos resultados, la gráfica R es estable, por lo que es adecuado interpretar la gráfica Xbarra. La grafica Xbarra indica que el proceso se encuentra bajo control estadístico

Figura 122

Carta de control para el ancho de las TPMS.

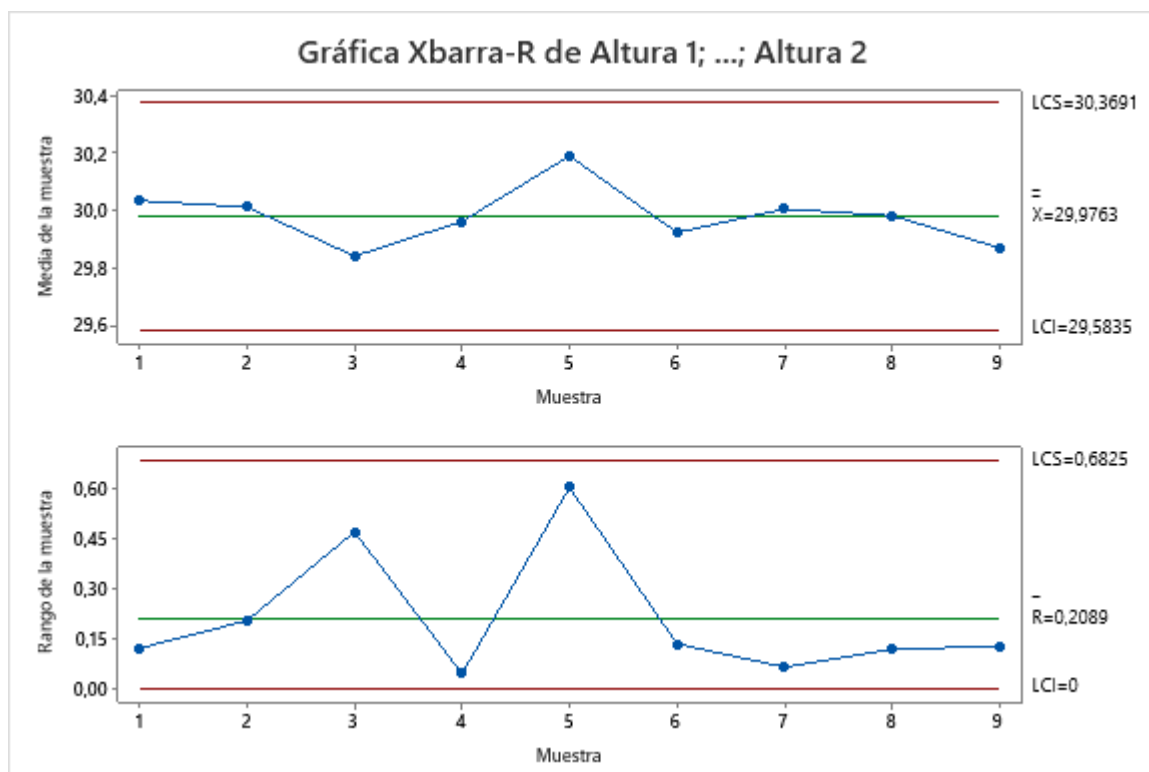


En estos resultados, la gráfica R es estable, por lo que es adecuado interpretar la gráfica

Xbarra. La grafica Xbarra indica que el proceso se encuentra bajo control estadístico.

Figura 123

Carta de control para el alto de las TPMS.

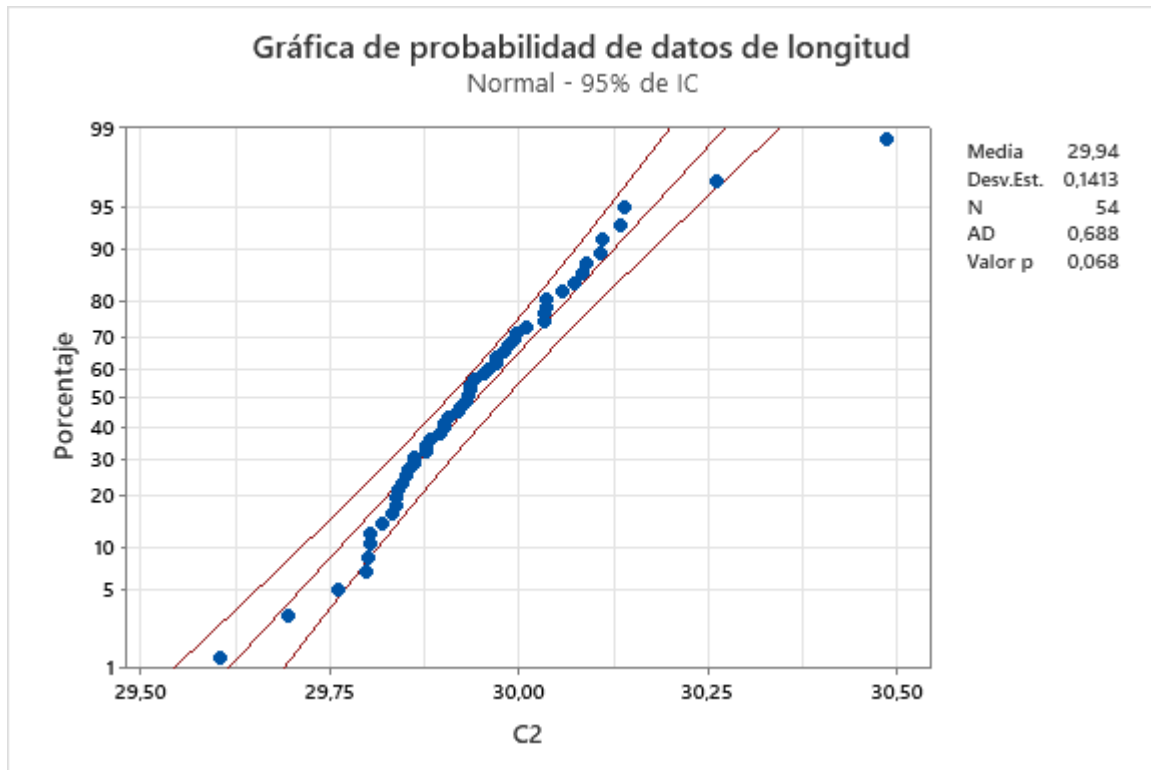


En estos resultados, la gráfica R es estable, por lo que es adecuado interpretar la gráfica Xbarra. La grafica Xbarra indica que el proceso se encuentra bajo control estadístico.

Para las 3 cartas de control se puede observar que la media y la variación del proceso son estables. A continuación, se realizó la prueba de normalidad de los datos recopilados.

Figura 124

Grafica de probabilidad de datos de longitud de las TPMS.



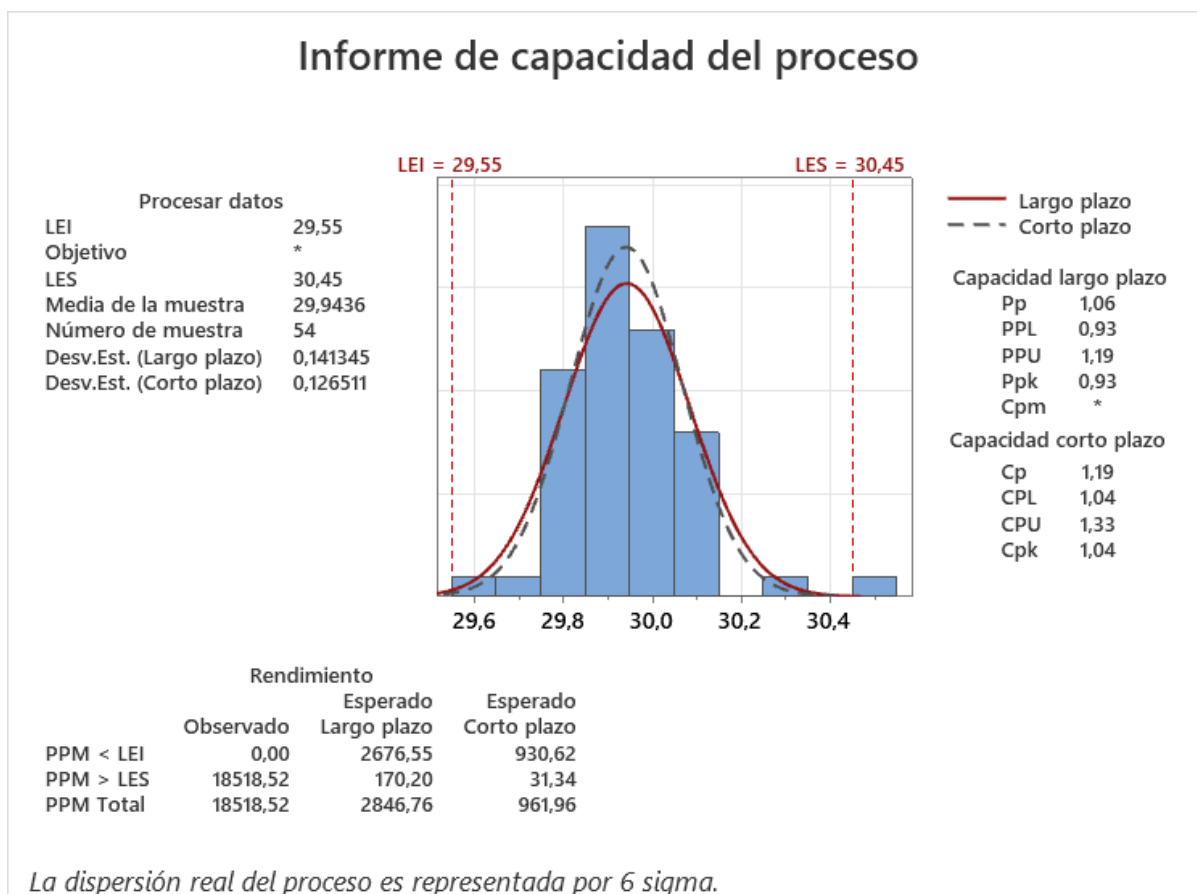
En la gráfica 124 se observa la distribución de los datos, a pesar de tener un punto muy alejado el valor p es mayor que 0.05 por lo que se puede considerar una distribución normal.

Al tener un proceso estable determinado por las cartas de control y una distribución normal de los datos se realizó en análisis de capacidad del proceso.

Análisis de capacidad del proceso

Figura 125

Informe de capacidad de proceso.



En la figura 125 se puede observar que el índice $C_p = 1.19$ lo que significa que el proceso de fabricación tiene una capacidad potencial parcialmente adecuada y requiere de un control estricto.

Además, que las partes defectuosas por millón en total serían $PPM = 961.96$.

El índice $C_{pk} = 1.04$ esto nos indica que la media del proceso es ligeramente descentrada por lo que se recomienda que se realicen acciones para optimizar su centrado, con lo cual alcanzaría su mejor potencial actual que indica el valor de $C_p = 1.19$

Calculando el índice de centrado del proceso con la formula

$$K = \frac{\mu - N}{\frac{1}{2}(ES - EI)} * 100\%$$

Donde μ es la media de la muestra, N es el valor objetivo o nominal, ES es el valor de la especificación superior y EI es el valor de la especificación inferior. Calculando ese valor tenemos

$$K = -13.33\%$$

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

Comparación con otros métodos.

En el 2021 se publicó una investigación sobre la fabricación de TPMS utilizando un proceso de sinterizado metálico. (Yan et al. 2021b) Esta investigación asegura haber tenido éxito en la fabricación de estructuras TPMS. Dependiendo del material se obtienen tamaños de celda unidad mayores o menores, los investigadores reportaron tener éxito en la fabricación de TPMS con tamaño de celda unidad de 2 mm en acero inoxidable, de 7 mm en aluminio y de 3 mm en titanio. Además, reportan que podrían conseguirse posibles mejoras en la fabricabilidad, densidad y precisión dimensional de las estructuras reticulares utilizando parámetros de procesamiento especializados y una estrategia de escaneado adecuada para esas estructuras. Los métodos utilizados en aquella investigación se diseñaron para geometrías de gran sección transversal y generan grandes cúmulos de fusión en secciones transversales minúsculas de los puntales celulares. Mediante la optimización de la potencia del láser, la velocidad y el patrón de escaneado, se podría reducir la entrada de energía en estas estructuras. De este modo se obtendrán estructuras más precisas y densas. También sería necesario una distribución bien controlada de las partículas de polvo, así como unos pasos de postprocesado adecuados, como el chorreado con arena/aire/perlas y el tratamiento térmico de las estructuras para mejorar la calidad de la superficie.

En el 2018 (Walker et al. 2018) reportó lograr la fundición en arena de estructuras TPMS con canales de 9.5 mm de diámetro utilizando aluminio. Sin embargo, con una estructura de 6.35 mm no se tuvo éxito en la fundición.

En este trabajo se logró obtener con éxito estructuras TPMS con canales de 1.5 mm de diámetro utilizando aluminio. A pesar de que en la superficie se encuentran defectos como la porosidad por gases y aletas en los bordes, con futuras investigaciones que busquen materiales más robustos para el molde y utilizando un sistema de vertido controlado para disminuir la turbulencia en la entrada del metal se podría obtener estructuras sin defectos y con menores pasos de postprocesamiento.

Desafíos de la fabricación de intercambiadores compactos.

La forma de vertido es un factor muy importante debido a que el molde al tener canales delgados puede provocar turbulencia al momento de ingresar el metal ocasionando que los gases y el aire dentro del molde no puedan. Al no poder tener una manera de controlar el proceso de vertido presentó un desafío para la fundición.

Otro desafío que se enfrentó fue obtener la maquinaria y herramientas para lograr obtener las fundiciones. Se utilizaron máquinas de bajo costo, como por ejemplo el horno, el sistema de vacío y el sistema para fundir el metal.

Las resinas utilizadas para la fabricación de los modelos fueron 2 del mismo fabricante, Castable Wax y WAX 40, siendo la primera con la que se logró imprimir modelos más exactos ya que con WAX 40 se encontró que algunos alimentadores de pandeaban al terminar la limpieza de la pieza.

Retirar los alimentadores de las piezas fundidas con una sierra manual a una velocidad lenta ya que a una velocidad rápida los alimentadores se arrancan de la pieza y con estas también se arranca parte de la pieza.

Conclusión y 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. Este proceso permitirá una mayor precisión en la fabricación de la TPMS.

Se logró desarrollar una guía de trabajo para la realización de la fundición a la cera perdida, desde la selección de materiales hasta el establecimiento de las mejores condiciones para la fundición de piezas mediante un enfoque de diseño experimental. Esta guía proporciona un proceso ordenado y estandarizado para garantizar la calidad y precisión en la producción de TPMS, lo cual es esencial para garantizar la eficiencia en la producción. Este es un importante avance en la tecnología de la fundición por cera perdida y permitirá una mayor confiabilidad en la producción de TPMS.

Para la impresión de piezas para realizar fundición en cera perdida se recomienda utilizar resinas con menor cantidad de cera, pero mayor estabilidad dimensional. Esto garantiza una mayor precisión en las dimensiones de la pieza final, lo que es esencial para el proceso de fundición. 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. Es recomendado seguir las instrucciones del fabricante para aprovechar al máximo las capacidades de esta tecnología y tener mejores resultados.

El proceso de fabricación de estructuras TPMS ha mostrado resultados muy positivos, a pesar de que las mejores características fueron obtenidas con los niveles de los parámetros: temperatura de molde a 150 °C, con un 75% del número de alimentadores calculados y un tamaño de celda unidad de 10 . Sin embargo, también se han obtenido buenos resultados con los otros dos tipos de estructuras. Aunque se han encontrado algunos defectos, estos pueden ser mejorados con futuras investigaciones que involucren el mejoramiento del material del molde y un control más

técnico de las variables del proceso. Esto permitirá obtener estructuras con mejores características y mayor precisión en el proceso de fundición.

El proceso de fabricación logró obtener una capacidad de proceso adecuada pero debido al proceso de fabricación artesanal, no fue capaz de mejorarla aún más. Por lo tanto, se debe realizar un control más estricto de los parámetros del proceso para mejorar la calidad del producto. El proceso está descentrado hacia la izquierda en un 13.33%, lo cual es aceptable, pero es necesario tomar medidas para corregir el desvío.

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.

Bibliografía

Abderrahman, Taha. 2016. "GitHub—Parisolab/mathmod: Mathematical modelling software."

Recuperado el 26 de enero de 2023 (<https://github.com/parisolab/mathmod>).

American Society of Mechanical Engineers, ed. 2020. *Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition - 2019: Presented at ASME 2019 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, November 8-14, 2019, Salt Lake City, Utah, USA. Volume 8: Heat Transfer and Thermal Engineering*. New York, N.Y: ASME.

Andrade Villacis, Brandon Leonardo. 2022. "Estudio de transferencia de calor en estructuras celulares TPMS (Triply Periodic Minimal Surface) fabricadas mediante estereolitografía". Trabajo de Integración Curricular, previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico, Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, Sangolquí.

Anón. 2023. "Get Started New to Inspire Cast? Learn the Basics Here." *Altair Inspire Cast User Guide 2022*. [Tabla] Recuperado (https://2022.help.altair.com/2022/cast/en_us/topics/shared/get_started/get_started_st_c.htm).

Ashby, M. F. 2011. *Materials selection in mechanical design*. 4th ed. Burlington, MA: Butterworth-Heinemann.

Ashby, Michael Farries. 2000. *Metal Foams: A Design Guide*. London: Butterworth-Heinemann.

ASM Handbook Committee, y ASM International, eds. 1978. *Metals handbook*. 9th ed. Metals Park, Ohio: American Society for Metals.

- Attarzadeh, Reza, Marc Rovira, y Christophe Duwig. 2021. "Design Analysis of the 'Schwartz D' Based Heat Exchanger: A Numerical Study". *International Journal of Heat and Mass Transfer* 177:121415. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121415.
- Banhart, John, y Denis Weaire. 2002. "On the Road Again: Metal Foams Find Favor". *Physics Today* 55(7):37–42. doi: 10.1063/1.1506749.
- Beeley, Peter R., ed. 1995. *Investment Casting*. London: The Institute of Materials.
- Beeley, Peter R. 2001. *Foundry technology*. 2nd ed. Oxford ; Boston: Butterworth Heinemann.
- Bergman, T. L., Adrienne Lavine, y Frank P. Incropera. 2017. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Eighth edition. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc.
- Campbell, John. 2011. *Complete casting handbook: metal casting processes, metallurgy, techniques and design*. 1st ed. Oxford, UK ; Waltham, MA: Elsevier Butterworth-Heinemann.
- Certus Prestige. 2022. *SIGMA, for Casting Silver Brass, and Bronze* [Figura]. *Guía de quemado para yeso Sigma*. Estados Unidos.
- Faccenda, Valerio. 2003. "Handbook on Investment Casting". [Figura]
- Formlabs. 2019. *Castable Wax Resin: Proceso de quemado* [Figura] [Tabla]. *GUÍA DE USO DE FORMLABS*.
- Formlabs. 2020. *Castable Wax 40 Resin* [Figura] [Tabla]. *GUÍA DE USO DE FORMLABS*.
- Groover, Mikell P. 2007. *Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems*. [Figura] 3rd ed. Hoboken, NJ: J. Wiley & Sons.
- Gutiérrez Pulido, Humberto, y Román de la Vara Salazar. 2009. *Control estadístico de calidad y seis sigma*. 2a ed. México: McGraw-Hill.

- Kalpakjian, Serope, Steven R. Schmid, y Espinoza Limón Jaime. 2008. *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*. [Figura][Tabla] 5a ed. México, D.F.: Pearson Educacion.
- Lyons, Alan, Shankar Krishnan, John Mullins, Marc Hodes, y Domhnaill Hernon. 2009. "Advanced Heat Sinks Enabled by Three-Dimensional Printing". doi: 10.26153/TSW/15148.
- Markee, Julie, Gallagher Gallagher, Noor Alam, Erin Almaleh, Matt Cavins, y Tim Sullivan. 2017. "Atlas of Casting Defects". [Figura]
- Mori, Lapo, S. Lee, Zhenyu Xue, A. Vaziri, D. Queheillalt, K. Dharmasena, Haydn Wadley, J. Hutchinson, y H. Espinosa. 2007. "Deformation and Fracture Modes of Sandwich Structures Subjected to Underwater Impulsive Loads". *Journal of Mechanics of Materials and Structures* 2(10):1981–2006. doi: 10.2140/jomms.2007.2.1981.
- Prasad, Ram. 2012. "Progress in Investment Castings". en *Science and Technology of Casting Processes*, editado por M. Srinivasan. InTech.
- Queheillalt, Douglas, Vikram Deshpande, y Haydn Wadley. 2007. "Truss Waviness Effects in Cellular Lattice Structures". *Journal of Mechanics of Materials and Structures* 2(9):1657–75. doi: 10.2140/jomms.2007.2.1657.
- Queheillalt, Douglas T., Yellapu Murty, y Haydn N. G. Wadley. 2008. "Mechanical Properties of an Extruded Pyramidal Lattice Truss Sandwich Structure". *Scripta Materialia* 58(1):76–79. doi: 10.1016/j.scriptamat.2007.08.041.
- Qureshi, Zahid Ahmed, Emad Elnajjar, Oraib Al-Ketan, Rashid Abu Al-Rub, y Salah Burhan Al-Omari. 2021. "Heat Transfer Performance of a Finned Metal Foam-Phase Change Material (FMF-PCM) System Incorporating Triply Periodic Minimal Surfaces (TPMS)". *International Journal of Heat and Mass Transfer* 170:121001. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121001.

- Schwarz, H. A. 1890. "Ueber ein die Flächen kleinsten Flächeninhalts betreffendes Problem der Variationsrechnung: Festschrift zum siebzigsten Geburtstage des Herrn Karl Weierstrass". Pp. 223–69 en *Gesammelte Mathematische Abhandlungen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Snelling, Dean, Qian Li, Nicolas Meisel, Christopher B. Williams, Romesh C. Batra, y Alan P. Druschitz. 2015. "Lightweight Metal Cellular Structures Fabricated via 3D Printing of Sand Cast Molds: Lightweight Metal Cellular Structures Fabricated via 3D Printing". *Advanced Engineering Materials* 17(7):923–32. doi: 10.1002/adem.201400524.
- Sypeck, D. J., y H. N. G. Wadley. 2002. "Cellular Metal Truss Core Sandwich Structures". *Advanced Engineering Materials* 4(10):759–64. doi: 10.1002/1527-2648(20021014)4:10<759::AID-ADEM759>3.0.CO;2-A.
- Trujillo, Iván. 2023. "Establecimiento de los dominios físicos a partir de estructuras TPMS matemáticamente definidas para obtener intercambiadores de calor compactos reconfigurables." Trabajo de integración curricular, previo a la obtención del título de Ingeniero en Mecatrónica, Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, Sangolquí.
- Wadley, H. 2003. "Fabrication and Structural Performance of Periodic Cellular Metal Sandwich Structures". *Composites Science and Technology* 63(16):2331–43. doi: 10.1016/S0266-3538(03)00266-5.
- Walker, Jason, Evan Harris, Charles Lynagh, Andrea Beck, Rich Lonardo, Brian Vuksanovich, Jerry Thiel, Kirk Rogers, Brett Conner, y Eric MacDonald. 2018. "3D Printed Smart Molds for Sand Casting". *International Journal of Metalcasting* 12(4):785–96. doi: 10.1007/s40962-018-0211-x.

Yan, Chunze, Liang Hao, Lei Yang, Ahmed Yussuf Hussein, Philippe G. Young, Zhaoqing Li, y Yan Li.

2021a. "Design of TPMS Structures". Pp. 27–38 en *Triply Periodic Minimal Surface Lattices Additively Manufactured by Selective Laser Melting*. Elsevier.

Yan, Chunze, Liang Hao, Lei Yang, Ahmed Yussuf Hussein, Philippe G. Young, Zhaoqing Li, y Yan Li.

2021b. "Metal Alloys Uniform TPMS Structures". Pp. 39–130 en *Triply Periodic Minimal Surface Lattices Additively Manufactured by Selective Laser Melting*. Elsevier.

Apéndices