EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA

TECNOLOGICO NACIONAL DE MÉXICO

TOLUCA

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TOLUCA

"ANALIZAR EL EFECTO DE LA ALEACIÓN Al-Si DE LAS SERIES 356 Y 332 POR MEDIO DE LA MODIFICACIÓN DE SU FLUIDEZ"

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

PRESENTA:

ING. ALEXANDER PEÑALOZA SANDOVAL

No. CONTROL:

M23281639

DIRECTOR(a) DE TESIS:

DR. MARÍA SONIA MIREYA MARTÍNEZ GALLEGOS

VoBo
MSMireyaMartinezG.

CODIRECTOR(a) DE TESIS:

DR. SALVADOR VALTIERRA GALLARDO

Vo. Bo.

METEPEC, ESTADO DE MÉXICO, SEPTIEMBRE DE 2025

Educación
Secretaría de Educación Pública

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Toluca
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Metepec, Edo. de México, 07/agosto/2025

DEPI-3200-337/2025

JORGE SÁNCHEZ JAIME
ENCARGADO DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
PRESENTE

Por este medio comunicamos a usted que la Comisión Revisora designada para analizar la tesis denominada **"ANALIZAR EL EFECTO DE LA ALEACIÓN Al-Si DE LAS SERIES 356 Y 332 POR MEDIO DE LA MODIFICACIÓN DE SU FLUIDEZ"**, ha dictaminado que dicho trabajo reúne las características de contenido y calidad para proceder a la publicación del trabajo final a través del repositorio institucional. Lo anterior como parte de los requisitos para obtener el grado académico de Maestro en Ciencias de la Ingeniería que presenta el **C. ALEXANDER PEÑALOZA SANDOVAL** con número de control **M23281639** para sustentar el acto de Recepción Profesional.

A T E N T A M E N T E

MARÍA SONIA MIREYA MARTÍNEZ GALLEGOS
DIRECTORA DE TESIS

SALVADOR VALTIERRA GALLARDO
CODIRECTOR DE TESIS

CARLOS ALFONSO GARCÍA IBARRA
REVISOR DE TESIS

FRANCISCO JAVIER ILLESCAS MARTÍNEZ
REVISOR DE TESIS

ccp. Archivo
mcdh



Instituto Tecnológico de Toluca
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Metepec, Edo. de México, 08/agosto/2025

DEPI-3200-339/2025

C. ALEXANDER PEÑALOZA SANDOVAL
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO
EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
PRESENTE

De acuerdo con los Lineamientos para la Operación de los Estudios de Posgrado en el Tecnológico Nacional de México y las disposiciones de este Instituto, habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora realizó con respecto a su trabajo de Tesis titulado "**ANALIZAR EL EFECTO DE LA ALEACIÓN Al-Si DE LAS SERIES 356 Y 332 POR MEDIO DE LA MODIFICACIÓN DE SU FLUIDEZ**", la División de Estudios de Posgrado e Investigación de este Instituto, concede la autorización para proceder a la publicación del trabajo final a través del repositorio institucional.

Sin otro particular por el momento, me despido de usted.

A T E N T A M E N T E
Excelencia en Educación Tecnológica®
"Educación, integridad y ciencia"

JORGE SÁNCHEZ JAIME
ENCARGADO DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

Educación
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TOLUCA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

JSJ/mcdh.



2025 Año de La Mujer Indígena

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT), por la beca otorgada.

Al Instituto Tecnológico de Toluca por la oportunidad de demostrar los conocimientos adquiridos y aplicarlos en una investigación de campo.

A Grupo Bocar por su apoyo económico, capacitación con sus empleados y permitirme desarrollar este proyecto de investigación en esta prestigiosa empresa.

Al doc. Salvador Valtierra Gallardo por su dedicación, empeño, disciplina y tiempo al compartir una visión respecta al proyecto; obtuve un aprendizaje enriquecedor y en conjunto elaboramos un documento con un contenido de alto valor, gracias a su formación y saberes en la investigación.

A los doctores María Sonia Mireya Martínez Gallegos, Carlos Alfonso García Ibarra y Francisco Javier Illescas Martínez que me fomentaron un desarrollo educativo avalando la obtención de resultados confiables y hallazgos significativos.

Una especial mención especial al ingeniero Mario Rosas Velázquez por tener un liderazgo hacia el proyecto; sus orientaciones y consejos contribuyeron al logro de los resultados presentados en la tesis.

Al ing. Gaspar Alvarez Aispuro por su colaboración, enseñanzas y conocimientos compartidos lo cual impulsaron a cada etapa de esta investigación; fue un mentor que me preparo para enfrentar nuevos retos en la planta que resultaron plasmados en este trabajo.

De igual importancia a los ingenieros Isael Rojas, Hugo Juárez (diseñadores) y Maik Sommermann (ingeniero de planta) por su invaluable disposición, sugerencias y ser parte del desarrollo del proyecto.

Un reconocimiento a todos los empleados que me brindaron su apoyo durante las etapas de experimentación aportando nuevos conocimientos al ámbito académico.

Dedicatorias

A mi madre Profa. Ana Clemencia Sandoval Forero por siempre confiar en cada avance y paso que logro, sus esfuerzos y motivaciones han sido cruciales para cada etapa de mi vida; ella siempre será el motor que impulsa todo camino a recorrer. Todo lo que soy es gracias a la mujer que lucho desde mi nacimiento y estoy muy orgulloso de ser su hijo.

A mi hermano Mstro. Jorge Andrés Peñaloza Sandoval por su invaluable apoyo, entrega, amor incondicional y fuente de inspiración que me impulsa a enfrentar grandes desafíos. La hermandad tan fuerte que nos une, nos ha enseñado que en cualquier parte del mundo en el que estemos siempre vamos a estar juntos. Agradezco profundamente a este gran ser humano por formarme y forjarme desde que tengo memoria.

A mi cuñada Lic. Ivonne Gabriela Pineda Leyva eh tenido la fortuna de que me acompañe la mayor parte de mi vida, ella se merece el reconocimiento por el apoyo que me brinda el día a día, sus atenciones, sugerencias y el acompañamiento que cuento en todo momento.

A mi sobrino Andrés Nicolás Peñaloza Pineda por ser ese niño noble que me motiva e incide a mi desarrollo profesional a través de un cultivo interior de buenos deseos, sueños e ilusiones que me recuerdan a que tengo que escuchar al niño que llevo dentro y tener siempre el entusiasmo para todo lo que me depara el futuro.

A mi novia I.A María Betel López Granados por coincidir conmigo y ser participe en este periodo brindándome su tiempo, consejos, respaldo afectivo, estar presente en momentos claves y de compartir valiosos momentos que han alegrado nuestro camino recorrido.

Resumen

Las aleaciones A356 y 332 pertenecen a un tipo clasificado de Al-Si, donde la principal diferencia es la cantidad de silicio que contiene cada una y sus diferentes aplicaciones en la industria.

El presente trabajo de investigación está orientado en analizar los factores que influyen en la fluidez de las aleaciones de aluminio de las series A356 y 332 con el propósito de mejorar la capacidad de llenado.

El uso de un molde en espiral es diferente a la de un canal de molde para fundición, debido a que se centra únicamente en evaluar la capacidad de fluidez de la aleación.

La fluidez es un indicador del comportamiento del fluido en un proceso de vaciado, su manipulación influye de manera directa en las propiedades de la aleación, afectando en primera instancia al vertido uniforme y completo de los moldes; por esta razón es importante el análisis y evaluación del fluido en la geometría de los moldes en espiral para identificar qué parámetros fueron optimizados en la eficacia del proceso de colado del metal.

Los recorridos del líquido con forma en espiral, se realizaron primero mediante simulación en el software Magmasoft® para evaluar los diferentes efectos respecto a las variables de prueba, dado a que existen restricciones, limitaciones y suposiciones dentro del software respecto a los modelos de simulación en el proceso de fundición.

Una vez concluidas estas simulaciones se procedió a realizar las pruebas experimentales, cuyos resultados fueron basados a diferentes longitudes de pruebas solidificadas con forma de espiral; en la que se evidencia la influencia de diferentes factores en un proceso de colado como el recubrimiento de pintura, la temperatura del molde, la temperatura del metal líquido y el tipo de aleación.

Abstract

Alloys A356 and 332 belong to a classified type of Al-Si, where the main difference is the amount of silicon contained in each one and their different applications in the industry.

The present research work is oriented to analyze the factors that influence the flowability of aluminum alloys of the A356 and 332 series with the purpose of improving the filling capacity.

The use of a spiral mold is different from that of a casting mold channel, because it is focused solely on evaluating the flowability of the alloy.

Fluidity is an indicator of the behavior of the fluid in a casting process, its manipulation directly influences the properties of the alloy, affecting in the first instance the uniform and complete pouring of the molds; for this reason, it is important the analysis and evaluation of the fluid in the geometry of the spiral molds to identify which parameters were optimized in the efficiency of the metal casting process.

The spiral-shaped fluid paths were first performed by simulation in Magmasoft® software to evaluate the different effects with respect to the test variables, since there are restrictions, limitations and assumptions within the software with respect to the simulation models in the casting process.

Once these simulations were completed, the experimental tests were carried out, the results of which were based on different lengths of solidified spiral-shaped tests; in which the influence of different factors in a casting process such as paint coating, mold temperature, liquid metal temperature and type of alloy is evidenced.

Índice

Índice de Tablas iii

Índice de Ilustraciones iv

Introducción 1

1. Fundamentos 2

1.2.1 Aleación 3
1.2.2 Tipos de aleación 3
1.2.3 Aplicaciones y usos de las aleaciones 3
1.2.4 Propiedades del aluminio y silicio 4
1.2.5 Definición de fluidez 5
1.2.6 Factores que determinan la fluidez en distintos tipos de aleaciones 5
1.2.7 Fluidez del aluminio 5
1.2.8 Fluidez en las aleaciones de fundición del aluminio 5
1.2.9 Proceso de fundición en moldes 6
1.2.10 Prueba de espiral. 6
1.2.11 Métodos de evaluación de fluidez para Al-Si. 8
1.2.12 Diseño y explicación del comportamiento del fluido en el molde. 8
1.2.13 Importancia de la fluidez en un molde en espiral. 9
1.2.14 Tipos de molde en espiral para determinar la fluidez en aleaciones 14
1.2.14.1 Primer diseño de molde en espiral 14
1.2.14.2 Segundo diseño de molde en espiral. 14
1.2.14.3 Tercer diseño de molde en espiral. 15
1.2.15 Importancia del molde descrita por Bericht von Ricchard Franzmann 18
1.2.16 Diseño de probetas en forma de espiral colada a las temperaturas de estudio . 21
1.2.17 Importancia de la geometría del espiral y llenado en el molde. 22
1.2.18 Simulación de prueba de fluidez en el molde 23
1.2.19 Procedimiento de llenado del molde de espiral. 26
1.2.20 Metalografías, microestructuras y efectos de las aleaciones 28
1.2.20.1 Tipos de metalografías de Al-Si 28
1.2.20.2 Efecto de la modificación química en la estructura. 29
1.2.20.3 Efectos de la modificación en la microestructura 31

2. Métodología 33

3. Resultados y discusión 38

3.1 Resultados 38
3.1.1 Preparación del herramental para pruebas de fluidez 38
3.1.1.1 Descripción de las condiciones que se encuentra el molde de espiral 38
3.1.1.2 Ubicación de las ventilas 39
3.1.2 Modelado y dimensiones en 3D del molde 40
3.1.3 Preparación del molde 42
3.1.3.1Granallado 42
3.1.4 Plano del molde 44
3.1.5 Escaneo GOM 45
3.1.6 Diseño primario del cono de llenado 48
3.1.7 Plano del cono de llenado utilizado y fabricado 52
3.1.8 Simulaciones 55
3.1.8.1 1er Prueba canal del molde con forma media circular 55
3.1.8.2 2da Prueba con el espiral con su perfil en el espiral 57
3.1.8.3 3er Prueba con el espiral 61
3.1.8.4 4ta Prueba con el espiral sin enfriamiento ni ventilación 62
3.1.8.5 5ta Prueba de 3 diferentes conos y modificación en el molde (Corcholata) 64
3.1.8.6 6ta prueba 68
3.1.8.7 Análisis térmico al molde 70
3.1.8.8 Elección del Cono de 12.1 mm y su diseño en software en 3D 71
3.1.9 Proceso de fabricación del cono 74
3.1.10 Quemador usado 76
3.1.11 Pruebas de fluidez en el molde de espiral 77
3.1.12 Resultados de las pruebas de fluidez 82
3.1.12.1 Primer muestra metalográfica de la microestructura de las aleaciones 83
3.1.13 Nuevos parámetros de simulación, modificación del espiral y nuevo diseño de copa y contra copa 84
3.1.14 Estructura de levantamiento y giro para el molde en espiral 88
3.1.15 Prueba del comportamiento a alta temperatura 89
3.1.15.1 Piezas obtenidas y sus análisis de recorrido 92
3.1.15.2 Detección de problemas y soluciones posibles de llenado en la geometría de espiral 96

3.1.15.3 Análisis de composición química del molde 98
3.1.15.4 Soldadura para evitar fugas en el molde 99
3.1.15.5 Composición química del vaciado de las pruebas 103
3.1.16 Solución a los problemas de llenado e implementaciones 105
3.1.17 Influencia de la temperatura respecto a la fluidez de la aleación 356 108
3.1.18 Influencia de la temperatura respecto a la fluidez de la aleación 332 127
3.1.19 Efectividad del quemador en las pruebas de fluidez 146
3.1.20 Microestructura y composición química 148
3.1.21 Modelado de fundición en pruebas de fluidez en geometría en espiral 153
3.2 Discusión 154
3.2.1 Diseño de experimentos para el proceso de pruebas de fluidez en un molde de espiral 154
3.2.2 Comprobación de los efectos individuales de cada aleación 157
3. Conclusiones 159
4. Recomendaciones 162
Anexo A 163
Anexo B 187
Anexo C 188
Anexo D 194
5. Recomendaciones 208

Índice de Tablas

Tabla 1: Tipos de fundición con las pruebas pertinentes 20
Tabla 2: Comparación entre los resultados de la simulación corrida y prueba de espiral. Los resultados de tres temperaturas de fundición son comparados en: la longitud de las partes simuladas, y el promedio de longitud de los espirales experimentales con su desviación estándar en esos los valores medios, σm,medidos 25
Tabla 3: Descripción de los niveles de modificación alcanzados con diferentes contenidos de Sr en aleaciones vaciadas Al-Si.....29
Tabla 4: Simulación y resultados de distancias del fluido en el molde con diferentes conos diseñado 53
Tabla 5: Simulaciones en software Magmasoft®, variaciones en el molde de espiral, parámetros y conos.....72
Tabla 6: Vaciadas/coladas con el nuevo sistema de industrialización en el molde y su longitud de flujo recorrido 94
Tabla 7: Comprobación y detección para evitar posibles fugas en el molde con soldadura y pintura 100
Tabla 8: Composición química de la aleación 356 de las pruebas de fluidez.....103
Tabla 9: Descripción de elementos más importantes en la aleación 356 104
Tabla 10: Recorridos de fluidez de la aleación 356 desgasificado a una temperatura de 688-690°C. 108
Tabla 11: Recorridos de fluidez de la aleación 356 sin desgasificar a una temperatura de 690°C. 111
Tabla 12: Recorridos de fluidez de la aleación 356 desgasificado a una temperatura de 710°C. ..114
Tabla 13: Recorridos de fluidez de la aleación 356 sin desgasificar a una temperatura de 710°C. 117
Tabla 14: Recorridos de fluidez de la aleación 356 desgasificado a una temperatura de 730°C. ..120
Tabla 15: Recorridos de fluidez de la aleación 356 sin desgasificar una temperatura de 730°C ...123
Tabla 16: Promedio conforme a los parámetros de desgasificado y desempeño de fluidez en el molde de espiral. 126
Tabla 17: Recorridos de fluidez de la aleación 332 desgasificado a una temperatura de 690°C. ..127
Tabla 18:Recorridos de fluidez de la aleación 332 sin desgasificar a una temperatura de 690°C. 130
Tabla 19: Recorridos de fluidez de la aleación 332 desgasificado a una temperatura de 710°C. ..133
Tabla 20: Recorridos de fluidez de la aleación 332 sin desgasificar a una temperatura de 710°C.136
Tabla 21: Recorridos de fluidez de la aleación 332 desgasificado a una temperatura de 730°C. ..139
Tabla 22: Recorridos de fluidez de la aleación 332 sin desgasificar a una temperatura de 730°C.142
Tabla 23: Recorridos de fluidez de la aleación 332 desgasificado a una temperatura de 690°C. ..145
Tabla 24: Desempeño del quemador conforme a la variable de temperatura en el proceso de vaciado.....146
Tabla 25: Desempeño del quemador conforme a la variable de fluidez en el proceso de vaciado 146
Tabla 26: Comparación de la desgasificación de las aleaciones y su comportamiento porcentual ante la geometría total del espiral 147
Tabla 27: Mejores muestras recolectadas de la aleación 356 a diferentes parámetros de temperatura, su clasificación de modificación y morfología correspondiente.....149
Tabla 28: Mejores muestras recolectadas de la aleación 332 a diferentes parámetros de temperatura, su clasificación de modificación y morfología correspondiente.....150
Tabla 29: Composición química de las muestras con mayor índice de fluidez de la aleación 356 con limpieza y sin limpieza a diferentes temperaturas.....151
Tabla 30: Composición química de las muestras con mayor índice de fluidez de la aleación 332 con limpieza y sin limpieza a diferentes temperaturas.....152

Índice de Figuras

Figura 1: Medición de la fluidez mediante la prueba en espiral (a), una nueva prueba desarrollada en la Universidad de Birmingham, Reino Unido (b) y la prueba de vacío (Ragone) (c) 7
Figura 2: Ejemplo de molde en espiral para evaluar la fluidez (Marco Actis Grande, Ilaria Forno, 2014) 8
Figura 3: Dibujo del molde en espiral que muestra a) vista superior, b) vista lateral de la varilla de tapón, la copa de vertido y el molde de arena (todas las dimensiones están en mm); c) molde abierto y muestra de fundición (Marisa Di Sabatino, 2005) 9
Figura 4: Especificaciones del espiral para plasmarlo en un molde 9
Figura 5: Fluidez de metales y aleaciones de corto rango de solidificación 10
Figura 6: Visualización tridimensional de un moldeo que simula la estructura de grano y crecimiento de poro. Los granos son las estructuras sombreadas con aleación Al-7Si totalmente fundido; los poros se dan como esferas. (Fuente: Solidification and Casting, Oxford-Kobe Materials Text, Edited by Brian Cantor and Keyna O´Reilly Department of materials, University of Oxford, UK) 11
Figura 7: Fluidez Continua en un molde para su llenado (Proceso de refundición) 13
Figura 8: Muestra de fundición "Espiral de fundición según Sipp" 14
Figura 9: Cuenco vertedor y molde de doble espiral de la versión original de fluidez en espiral equipo de prueba 15
Figura 10: Se muestra un boceto del molde en espiral de fundición recientemente diseñado. La parte superior la mitad del molde (Izquierda) contiene una abertura para el bebedero insertable hecha de arena unida en caja fría, orificios de ventilación y canales de calentamiento-enfriamiento. Las marcas a lo largo de la geometría en espiral corresponden a una dimensión en cm 16
Figura 11: a) Llenado de la cuchara vertedora con ayuda del brazo manipulador. b) La colada en el espiral de colada se realiza mediante un sistema de bebedero de arena. La cuchara manipuladora evita las fluctuaciones provocadas por el lanzador al llenar el molde 17
Figura 12: Espiral de fundición en molde permanente articulado con calentador de aceite conectado y bebedero 17
Figura 13: Muestra la geometría de una espiral de colada con bebedero (a) y el proceso de solidificación en ésta (b). La solidificación comienza en la capa exterior y continúa hacia el centro. Cuando las zonas solidificadas se juntan, la masa fundida se detiene y ya no es posible ninguna alimentación adicional; Fuente: Ciencia de los materiales y procesos de fabricación Schneider y Singer 19
Figura 14: Forma espiral para medir la fluidez de aleaciones para colada según Shneider y Hufngel. Fuente: Rojas I., “Influencia en las variables metalúrgicas en la expansión – contracción de fundiciones nodulares”, 2008, pp. 55 – 61 21
Figura 15: a) Molde de arena para la obtención de las probetas de ensayo de fluidez, b) Probetas en forma de espiral colada a las temperaturas de estudio, según el método de Schneider para evaluación de la fluidez 22
Figura 16: a) Secuencia de llenado espiral, llenado Pb-50Sn, TC=260ºC. b) Variación en el tiempo de la temperatura para varios tiempos de llenado, Caso1 23
Figura 17: Geometría y malla: a) entrada, vaso vertedor y espiral; b) mayor aumento para mostrar la calidad de la malla 24
Figura 18: Resultados de simulación de fluidez a)700°C, longitud de fluidez 550 mm; y B)730°C, longitud de fluidez 645 mm 25
Figura 19: Resultados experimentales de las pruebas de espiral a) 700°C, longitud de fluidez 460 milímetros; y b)730°C, longitud de fluidez 630mm 25
Figura 20: Aparato de prueba de fluidez. Las partes principales son: A-Varilla de tope, B- vaso vertedor, C-molde de arena, D-Abrazaderas metálicas, E-Cilindro neumático 26

Figura 21: a) Espiral fundida en molde de arena y dos lugares donde se tomaron las muestras para cada espiral investigada. (B-base de la espiral, cerca del recipiente de vertido; T-punta de la espiral) y b) Sección transversal de la espiral) 27
Figura 22: Micrografías ópticas de la muestra refinada 1R2 (0.01% en peso de Ti) de a) base y b) punta de espiral 27
Figura 23: Niveles de modificación eutéctica de Al-Si. Fuente: American Society for Metals. Metals handbook (9th ed., Vol. 15) 28
Figura 24: Diagrama de fases de equilibrio para una aleación aluminio-silicio. Fuente: A. Karney y E. L. Rooy," Aluminum Foundry Products" de ASM Handbook, Volume 2. 30
Figura 25: Clasificación de niveles de modificación de acuerdo a AFS Catalogo de imágenes Metallurgical Central Laboratory. Empresa mexicana de componentes automotrices 32
Figura 26: Diagrama de flujo de actividades actualizado 33
Figura 27: Molde de espiral de tapa superior e inferior 38
Figura 28: Tubos para aumentar la temperatura del molde con un calentador externo de aceite 39
Figura 29: Bisagras para la apertura de ambas tapas del molde 39
Figura 30: Parte exterior de la tapa superior del molde, se visualiza el hueco de vaciado al molde y los 24 huecos de las ventilas 39
Figura 31: Vista isométrica del diseño 3D en el software Solidworks del molde en espiral 40
Figura 32: Vista trasera del diseño 3D en el software Solidworks del molde en espiral 40
Figura 33:Vista explosionada del diseño 3D en el software Solidworks del molde en espiral 41
Figura 34: Vista superior de la tapa inferior del molde en espiral 41
Figura 35: Máquina granalladora de hielo seco 42
Figura 36: Hielo seco en bloques 42
Figura 37:Granallado del molde 43
Figura 38:Resultado del granallado en el molde de espiral 43
Figura 39: Ensamble del molde en espiral 44
Figura 40: Laboratorio GOM y escala de metrología métrica y ótica de tolerancia de 2mm por el color verde 45
Figura 41:Molde en espiral, ambas tapas vistas desde adentro. Fuente: Catalogo de imágenes laboratorio GOM- Empresa mexicana de componentes automotrices 45
Figura 42:Molde en espiral, ambas tapas vistas desde adentro. Fuente: Catalogo de imágenes laboratorio GOM- Empresa mexicana de componentes automotrices 46
Figura 43:Detalle del espiral. Fuente: Catalogo de imágenes laboratorio GOM- Empresa mexicana de componentes automotrices 46
Figura 44: Vista general del espiral con mallas 47
Figura 45: Las caras planas se presentan como un azul celeste, el perfil con un azul turquesa y como está conformado de mallas las aristas y vértices de color negro que integran a la pieza 47
Figura 46: Relación del tamaño para el cálculo de las áreas del cono/bebedero 49
Figura 47: Plano de cono de fondo de 2.42mm con abertura superior de 8.32 cm 52
Figura 48: Gráfico de líneas que demuestra el recorrido de fluidez(cm) contra diámetro de fondo y diámetro superior de diferentes conos calculados 54
Figura 49: Interfaz del programa Magmasoft® 55
Figura 50: Canal medio circular en el perfil del molde en espiral 55
Figura 51: Parámetros de aleación, temperatura del fluido y molde 56
Figura 52: 1er Prueba del canal medio circular, a una temperatura de 720°C en un vaciado de 1.340 segundos y como obtención un recorrido de 37 cm en el molde de espiral. 56
Figura 53: Plastilina dentro del canal para tomar la forma y poder medirla 57
Figura 54: Medidas actuales del canal 57
Figura 55: Área del nuevo perfil del molde en espiral 58
Figura 56: El trayecto cambia a una forma de "v" a lo largo de todo el espiral 58
Figura 57: Interpretación gráfica generada del software Magmasoft® del proceso de vertido del fluido en el molde 59

Figura 58: 2da Prueba del canal con forma de “v”, a una temperatura de 720°C en un vaciado de 1.572 segundos y como obtención un recorrido de 43 cm en el molde de espiral 59
Figura 59: Nueva medida de cono de llenado de 83.22mm para el molde de espiral 60
Figura 60: Comportamiento del fluido (Sobrecalentamientos que mejoran la ductilidad).....60
Figura 61: 3era Prueba del canal original del molde, a una temperatura de 720°C en un vaciado de 1.639 segundos y como obtención un recorrido de 44 cm en el molde de espiral 61
Figura 62: Avance del fluido 1 cm más que la prueba anterior.....61
Figura 63: Eliminación de tubos internos que tiene el molde 62
Figura 64: Cambio de parámetros de temperatura en la fluidez de 720°C a 730°C y el molde de 350°C a 400°C, la aleación se mantiene con los mismos valores.....62
Figura 65: Representación de molde sin ventilas ni tubos de calentamiento 63
Figura 66: Supercalentamientos atípicos del fluido dentro de un molde sin entradas de aire, ni salida de gases 63
Figura 67: 4ta Prueba del canal original del molde, a una temperatura de 730°C en un vaciado de 1.541 segundos y como obtención un recorrido de 45 cm en el molde de espiral 64
Figura 68: 3 Diferentes conos calculados y simulados en Magmasoft®; a) Cono de 41mm con 28.2mm de área superior, b) Cono de 8mm con 27.10mm de área superior y c) Cono de 12.1 mm con 83.2 mm de área superior 64
Figura 69: El cono que coincide con el canal no tiene problema de llenado sin en cambio los demás presentan problema de llenado debido a que no tienen exactitud con el canal 65
Figura 70: Modificación de entrada en el molde (tipo corcholata) para su llenado de la espiral con un cono más grande calculado 65
Figura 71: La corcholata coincide con el la entrada del cono 12.1mm y el ajuste con el canal del molde 66
Figura 72: Diseño de corcholata de 4cm de diámetro en el canal del molde 66
Figura 73: 5ta Prueba del canal original del molde, a una temperatura de 730°C en un vaciado de 3.190 segundos y como obtención un recorrido de 50 cm en el molde de espiral 67
Figura 74: 5ta Prueba del canal original del molde, a una temperatura de 730°C en un vaciado de 4.673 segundos y como obtención un recorrido de 44 cm en el molde de espiral 67
Figura 75: Canales propuestos para el canal del mismo molde en espiral, A) Medidas del canal utilizado por (Campbell y Harding, 1994), B) Canal de tamaño 9.1mm de ancho,7.5mm de altura total y 3.8mm de altura previa a la curvatura 68
Figura 76: Aplicación del nuevo perfil al canal del espiral 68
Figura 77: Plano con modificación de abertura de canal y entrada de llenada de 2.4 cm en el molde de espiral.....69
Figura 78: 6ta Prueba del canal original del molde, a una temperatura de 730°C en un vaciado de 2.075 segundos y como obtención un recorrido de 59 cm en el molde de espiral 70
Figura 79: Análisis térmico del molde en espiral de acero ya fabricado 70
Figura 80: Vista lateral del cono de 12.1mm 71
Figura 81: Vista seccionada del cono de 12.1mm.....71
Figura 82: Gráfico de datos no agrupados(tendencia) de los parámetros que pueden mejorar el recorrido de la fluidez dentro del molde y estableciendo el cono adecuado para su avance 73
Figura 83: Equipos de torneado, laboratorio GOM- Empresa mexicana de componentes automotrices.....74
Figura 84: Equipos de CNC, laboratorio GOM- Empresa mexicana de componentes automotrices74
Figura 85: Herramienta de corte Ø42 R6 del cono desbastando el cilindro 75
Figura 86: Molde completo con el cono integrado.....75
Figura 87: Vista del quemador de la parte frontal donde sale la llama.....76
Figura 88: Proceso de combustión y calentamiento del molde en espiral.....76
Figura 89: Quemador calentando al molde en espiral.....77
Figura 90: Temperatura de la tapa inferior del molde en espiral a una temperatura constante en un tiempo de 60 minutos.....77

Figura 91: Temperatura de la tapa superior del molde en espiral a una temperatura constante en un tiempo de 60 minutos 78
Figura 92: Pintura de silice aplicada al molde de espiral durante el proceso de calentamiento 78
Figura 93: Recubrimiento de grafito al molde de espiral durante el proceso de calentamiento 79
Figura 94: Herramientas auxiliares para el proceso de vertido del aluminio en el molde de espiral 79
Figura 95: Postcalentamiento del molde en espiral después de la pintura de sílice y recubrimiento de grafito 80
Figura 96: Sujetadores sosteniendo el molde con la mesa móvil 80
Figura 97: Vertido del aluminio fundido a una temperatura de 730°C con una cuchara de colado ..81
Figura 98: Abertura del molde de espiral después del vertido y muestra de la prueba del recorrido del aluminio 81
Figura 99: Primer y segunda prueba de vertido en el molde de espiral 82
Figura 100: Primer prueba de aluminio fundido vertido en 11 segundos en el molde de espiral, con un cono de 12.1 mm de fondo 82
Figura 101: Segunda prueba de aluminio fundido vertido en 3 segundos en el molde de espiral, con un cono de 12.1 mm de fondo 83
Figura 102: Metalografías de las microestructuras en base a las pruebas de espiral de fluidez con un acercamiento de 200x y 500x detallando sus fases y la representación del DAS 84
Figura 103: Simulación coincidente con las primeras pruebas presentadas, parámetros definidos para futuras pruebas en el software 85
Figura 104: Presentación de las medidas del canal en el software de diseño y su geometría final .85
Figura 105: Modificación del canal del molde y el área de desbaste presentada antes de maquinar 86
Figura 106: A) Proceso de maquinado en CNC de la tapa fija, B) Placa modificada con polvo de titanio encima debido a que lubricación de la herramienta de corte y la superficie 86
Figura 107: A) Tapa Fija, B) Tapa móvil y C) Tapas ensambladas en el molde de espiral 87
Figura 108: Simulación del fluido respecto al canal modificado y las tapas del molde diseñadas ...87
Figura 109: Modelo final de la estructura de levantamiento y giro para el molde en espiral 88
Figura 110: A) Fabricación de la estructura que permitirá el levantamiento, B) Y C) Giro a 45° y Giro a 90° de la tapa móvil del molde 88
Figura 111: A) Medición de la temperatura del molde a una distancia de 50 cm, B) Nos indica a que temperatura se encuentra el molde después de calentarlo de los 60 min, C) Dirección que tiene que estar la llama para que caliente de forma completa el molde, D) Termo Cámara que permite saber las variaciones de temperatura en el proceso de calentamiento 89
Figura 112: A), B) y C) Proceso de combustión con el nuevo proceso de industrialización del molde 90
Figura 113: A) Giro de tapa móvil a 90°, B) y C) Fácil pintado con pintura de sílice y grafito a la tapa fija 90
Figura 114: Recalentamiento del molde y calentamiento de la copa con su contra copa 91
Figura 115: A) Vertido del aluminio en el molde, B) y C) Levantamiento de la tapa móvil para poder sacar la prueba de fluidez 91
Figura 116: Primeras 3 pruebas de vaciado con el nuevo proceso 92
Figura 117: Mejor primera prueba conseguida en el molde con un recorrido de 170 cm 92
Figura 118:Prueba con presencia de fugas y separación de ventilas, el recorrido de esta segunda prueba fue de 123 cm 93
Figura 119: En la tercera prueba se presenta temperatura baja del molde, fugas y residuos que no permiten el buen sellado 93
Figura 120: Pruebas con el proceso de industrialización del molde, incluido el mejor recorrido de 109 cm presentado con el antiguo proceso de vaciado 95
Figura 121: A) Sellado incompleto de las tapas del molde, B) Fugas del líquido, C) Desprendimiento de ventilas y residuos hacen que el líquido busque cualquier salida dentro del molde, D) Pandeo respecto a temperatura 96

Figura 122: A), B): Punto central que señala la temperatura de las tapa móvil y fija del molde y C), D): Copa y contra copa se calientan a una temperatura óptima para poder vaciar.....97
Figura 123: A) Equipo de rayos x bruker y B) Elementos contenidos en el molde 98
Figura 124: A) Demostración de donde se tenía que aplicar la soldadura en base a las pruebas de vaciado hechas en el molde, B) y C): Aplicación de soldadura y maquinado.....99
Figura 125: Recorrido de la aleación en prueba de fluidez con la adición de soldadura para evitar fugas, obteniendo un recorrido de 175 cm 99
Figura 126: Aplicación de soldadura y sílice la prueba tuvo un recorrido de 165cm 100
Figura 127: Gráfico actualizado de las mejoras de recorrido de fluidez en el molde al solucionar problemas de llenado 101
Figura 128: A) Tolerancias del molde después de su escaneo y B) Desviaciones en la geometría del molde 102
Figura 129: Las tolerancias en frío no son un factor crítico en el vaciado del molde. Deformaciones térmicas a altas temperaturas afecta al sellado y al vaciado. 102
Figura 130: A) y B) Las dimensiones de la nueva placa móvil que permitió un correcto sellado fueron: 37 cm de ancho con la parte extra agregada por un ancho de 31 con un corte en L que coincidió con la parte fija y un espesor de 4.5 cm 105
Figura 131: Medidas digitales a través de un espeso metro A) Pintura de sílice y B) Pintura de grafito pulverizado con una pistola de presión de aire a una temperatura de molde de 250°C.....105
Figura 132: Figura 132: A) y B) posición del contra copa y de los orificios cónicos por donde entra el material, C) pieza de fundición con la forma de ancla para extraer completamente la prueba ..106
Figura 133: A) Extracción de una prueba en espiral con el sistema de anclaje creado, a diferentes temperaturas 408°C, B) 385°C y C) 372°C. 106
Figura 134: A) Quemador de estrella industrial, B) y C) Calentamiento por debajo y transferencia de calor en las superficies del molde. 107
Figura 135: Gráfico de superficie 3D de la trayectoria del flujo a una temperatura desgasificada de 688-690°C 109
Figura 136:Gráfico lineal con marcadores de la trayectoria del flujo a una temperatura de 690°C con desgasificación 110
Figura 137: Gráfico de superficie 3D de la trayectoria del flujo a una temperatura sin desgasificación a 690°C 112
Figura 138: Gráfico lineal con marcadores de la trayectoria del flujo a una temperatura de 690°C sin desgasificación 113
Figura 139: Gráfico de superficie 3D de la trayectoria del flujo a una temperatura desgasificada de 710°C. 115
Figura 140: Gráfico lineal con marcadores de la trayectoria del flujo a una temperatura de 710°C con desgasificación 116
Figura 141: Trazado en 3D de la superficie de la trayectoria del flujo a una temperatura de 710°C sin desgasificación 118
Figura 142: Gráfico lineal con marcadores de la trayectoria del flujo a una temperatura de 710°C sin desgasificación 119
Figura 143: Gráfico de superficie en 3D de la trayectoria del flujo a una temperatura desgasificada de 730°C 121
Figura 144: Gráfico lineal con marcadores de la trayectoria del flujo a una temperatura de 730°C con desgasificación 122
Figura 145: Gráfico lineal con marcadores de la trayectoria del flujo a una temperatura de 730°C sin desgasificación 124
Figura 146: Gráfico lineal con marcadores de la trayectoria del flujo a una temperatura de 730°C sin desgasificación 125
Figura 147: Comportamiento del metal con limpieza y sin limpieza a diferentes temperaturas 690 – 730°C (aleación 356).....126

Figura 148: Gráfico de superficie 3D de la trayectoria del flujo a una temperatura desgasificada de 690°C 128
Figura 149: Gráfico lineal con marcadores de la trayectoria del flujo a una temperatura de 690°C con desgasificación 129
Figura 150: Trazado en 3D de la superficie de la trayectoria del flujo a una temperatura de 690°C sin desgasificación 131
Figura 151: Gráfico lineal con marcadores de la trayectoria del flujo a una temperatura de 690°C sin desgasificación 132
Figura 152: Gráfico de superficie en 3D de la trayectoria del flujo a una temperatura desgasificada de 710°C 134
Figura 153: Gráfico lineal con marcadores de la trayectoria del flujo a una temperatura de 710°C con desgasificación 135
Figura 154: Trazado en 3D de la superficie de la trayectoria del flujo a una temperatura de 710°C sin desgasificación 137
Figura 155: Gráfico lineal con marcadores de la trayectoria del flujo a una temperatura de 710 °C sin desgasificación 138
Figura 156: Trazado en 3D de la superficie de la trayectoria del flujo a una temperatura de 730°C con desgasificación 140
Figura 157: Gráfico lineal con marcadores de la trayectoria del flujo a una temperatura de 730 °C con desgasificación 141
Figura 158: Trazado en 3D de la superficie de la trayectoria del flujo a una temperatura de 730°C sin desgasificación 143
Figura 159: Gráfico lineal con marcadores de la trayectoria del flujo a una temperatura de 730 °C sin desgasificación 144
Figura 160: Comportamiento del metal con limpieza y sin limpieza a diferentes temperaturas 690 – 730°C (aleación 332)....145
Figura 161: Demostración del calentamiento del molde a través de una simulación por el quemador externo hacia la tapa fija. 153
Figura 162: Factores ingresados en el software Minitab® que nos dieron respuestas a diferentes comportamientos de fluidez 154
Figura 163: Gráfico de efectos principales que se presentaron en los datos fluidez....155
Figura 164: Gráfica de interacción entre los efectos de desgasificación, temperatura de metal, aplicación de pintura y el tipo de aleación. 156
Figura 165: Diagrama de Pareto de efectos estandarizados y sus combinaciones clasificadas en un rango de 0-12 de varianza de las variables para ambas aleaciones....157
Figura 166: Diagrama de Pareto de efectos estandarizados y sus combinaciones clasificadas en un rango de 0-8 de varianza de las variables para la aleación 332 158
Figura 167: Diagrama de Pareto de efectos estandarizados y sus combinaciones clasificadas en un rango de 0-9 de varianza de las variables para la aleación 356 158

Introducción

Las aleaciones 356 y 332 se distinguen por sus propiedades mecánicas, resistencia a la corrosión y su capacidad para tratamiento térmico y de llenado.

Analizar la capacidad que tiene el metal líquido para llenar los moldes durante el proceso de fundición es importante debido a que ayudan a prevenir ciertos problemas como inclusiones o la formación de óxidos, y se define la importancia de establecer parámetros en el molde y el fluido, conforme al tiempo de solidificación.

El objetivo del presente trabajo es estudiar las variables que influyen en la fluidez de las aleaciones de aluminio 356 y 332 durante la prueba de fluidez en un molde con geometría en espiral. Establecer cada uno de los parámetros conllevan a mejorar el recorrido del fluido dentro del molde.

Los principales puntos sobre los que se estudiará la fluidez son: la temperatura del molde, la temperatura del metal, la composición química, y el estado de la pintura dentro de la cavidad de la geometría del espiral, copa y contra copa. En la prueba de fluidez utilizando moldes de espiral pueden surgir otros factores que influyen en el comportamiento del fluido; es por eso que, al controlar las condiciones de la prueba, se ayuda a realizar una evaluación del recorrido de la fluidez de un fluido metálico para analizar las propiedades de flujo y su capacidad para vertido. Por esta razón es importante utilizar programas de diseño y simulación, como Solidworks® y Magmasoft®, para diseñar, modificar y evaluar la geometría del molde, para comenzar a predecir el comportamiento del metal líquido.

La hipótesis conlleva a que la fluidez de las aleaciones de aluminio en un molde de espiral es a causa de la temperatura del molde y del metal líquido, así como las características geométricas del molde. Determinar que problemas presentan estas variables puede mejorar el comportamiento del metal líquido, dando lugar a una mejor capacidad de flujo y un vertido más uniforme en los moldes.
En el apartado de resultados se presenta el trabajo con un molde semi permanente, su implementación de un proceso productivo en base a diseños y el cumplimiento de los objetivos definidos al realizar pruebas experimentales para evaluar la fluidez.

1. Fundamentos

1.1 Antecedentes

Flemings, JM Kim y cols. (1953,1974) estudiaron la solidificación en el molde por nucleación y crecimiento dendrítico, encontrando

En 1959, Flemings et al. Menciona que los recubrimientos de los moldes aumentaban la velocidad inicial del flujo, así como la vida útil del fluido. Por lo que el mecanismo de solidificación de las aleaciones en el espiral de fluidez, no parece que sea el responsable de aumentar la velocidad del flujo inicial.

Mollard et al. (1987) realizaron una prueba de fluidez en espiral, el efecto de un recubrimiento de hexacloroetano fue capaz de duplicar o triplicar la fluidez, teniendo incluso un aumento adicional cuanto menor era la temperatura de vertido.

Kolsgaard (1993) estudiaron la fluidez aumenta al incrementar el sobrecalentamiento para una composición de aleación determinada.

Tiryakioglu et al. (1994) encontraron que la fluidez también depende de la carga de presión que fuerza al metal (presión metalostática), por tanto, la altura de presión, no afecta significativamente la fluidez.

Tiryakioglu et al. (1995) establecieron que la fluidez es una propiedad compleja que representa la capacidad de un metal líquido para llenar la cavidad del molde. Aunque es bien sabido que la fluidez depende del sobrecalentamiento, también se ve afectada por factores como el uso de moldes.

Young-Dong et al. (2003) encontraron que la temperatura de la aleación puede aumentarse para mejorar la fluidez, sin embargo, presentan un efecto negativo que es el aumento de los poros de gas o los defectos de contracción.

Martin et al. (2006) trabajaron con el objetivo del fundente en el tratamiento es eliminar las impurezas del aluminio líquido. En algunas circunstancias, una

denominada impureza podría ser un agente de aleación y, por lo tanto, considerarse como una adición deseable.

Riverin et al. (2006) encontraron que la utilización de crisoles sigue siendo una herramienta común en las plantas de refundición y reciclaje para transportar el metal recuperado de las operaciones de reciclaje de la escoria y la fundición de chatarra. En estos casos, el metal suele estar contaminado con elementos alcalinos, principalmente calcio, y óxidos e inclusiones no deseadas.

1.2 Fundamentos Teóricos

1.2.1 Aleación

La aleación es un proceso de fundición entre un elemento metálico con otro elemento químico; la combinación de ambos materiales da como resultado un producto con mejores características de resistencia y resistividad ante cargas físicas. Acuerdo con su composición, forma del grano o su origen.

1.2.2 Tipos de aleación

Las combinaciones de diferentes aleaciones en el proceso de fundición la mayoría de veces contribuyen para obtener una moldeabilidad requerida, algunos de ellos se pueden conformar por los siguientes tipos de aleaciones:

Al-Si: reduce el punto de fusión y la ductilidad del metal fundido, mejora la capacidad de moldeo y la capacidad de llenado de moldes de la aleación misma. Las adiciones de Si disminuyen los efectos de contracción del volumen de solidificación del aluminio.

1.2.3 Aplicaciones y usos de las aleaciones

Las aleaciones de Al-Si o Al-Mn pertenecientes a la serie 300, se usan principalmente en la industria automotriz para prevenir corrosión y desgaste mecánico (deterioro de una pieza por fricción o impacto de una entre la otra) en piezas estructurales y del tren motriz del automóvil.

1.2.4 Propiedades del aluminio y silicio

En las proporciones generales de Al-Si, el silicio se maneja entre un 6% al 20% de adherencia al metal.

a) La presencia del Si tiene un efecto sobre las temperaturas de solidificación en las aleaciones de Al.

Las particularidades del silicio sobre las aleaciones con aluminio son 5:

1. Completar el ciclo al pasar de estado líquido a estado sólido a temperatura baja con un menor tiempo de solidificación.
2. Poseen granos de menor tamaño en estructuras cristalinas que proporcionan una mejor resistencia mecánica.
3. Las propiedades de aluminio con silicio mejoran la fluidez.
4. Se busca disminuir la contracción del volumen de solidificación del aluminio.
5. Evita la corrosión.

b) Efecto del afino del grano y de la inclusión de óxidos en la fluidez de las aleaciones Al-Si.

Como se comentó en el apartado anterior, mientras más pequeño y fino sea el grano en las aleaciones Al-Si, mayor será el movimiento de partículas en el líquido fundido. Esto hace que fluya continuamente el material entre los canales y el molde.

La oxidación en la aleación es perjudicial, produce una mayor ductilidad en el metal lo que causa una menor fluidez, y la presencia de poros también se pueden presentar a causa de una contracción (baja temperatura del metal, diseño incorrecto del molde y la pieza fundida, exceso de óxido) en el proceso de fundición.

c) Proporciones de Al-Si en la fluidez

En las aleaciones Al-Si de serie 300, la adición de silicio se utiliza principalmente para mejorar las propiedades de la aleación, el contenido de Al es de un 88% a un 95% el resto depende del porcentaje añadido del silicio debido a que contribuye al control de expansión térmica y mejora a la fluidez en el proceso de colado.

1.2.5 Definición de fluidez

La fluidez se refiere a la distancia que el metal fundido, a una temperatura determinada, fluye hacia un molde determinado antes de que termine el proceso de solidificación.

1.2.6 Factores que determinan la fluidez en distintos tipos de aleaciones

Los factores que influyen en la fluidez de la aleación Al-Si, también llamados variables que modifican las propiedades de la aleación son:

- Composición química: influye en las propiedades de la aleación y su fluidez en el molde que se vaya a verter.
- Rango de solidificación: control de temperatura para un llenado completo del molde.
- Ductilidad: a mayor temperatura, la ductilidad se reduce por lo que mayor será su fluidez; esto se logra aumentando la cantidad de silicio en la aleación.
- Calor de fusión: determina la eficacia en el proceso de solidificación a causa del calor liberado o absorbido, entre mayor sea el calor de fusión, el flujo del material aumenta.

1.2.7 Fluidez del aluminio

La fluidez del aluminio puro o sin aleaciones tiene un punto de fusión bajo al igual que su ductilidad, por lo que su fluidez es ligera y eficaz. Se puede decir que su temperatura de fundición y la velocidad de llenado son óptimas, pero no contendrá mucha resistencia mecánica ya que no tiene ningún compuesto que mejore sus propiedades.

1.2.8 Fluidez en las aleaciones de fundición del aluminio

La fluidez es la capacidad de una aleación fundida para llenar un molde y asegurar un proceso preciso y eficiente, dependiendo de la composición química de la aleación y la temperatura de fundición.

a) Fluidez de aleaciones en moldes metálicos

La fluidez de aleaciones en moldes metálicos es la interacción entre el molde y una aleación con proceso de fundición consta de diferentes parámetros de análisis, que a continuación se presentan:

- Sobrecalentamiento: es la diferencia entre la temperatura de fundición y la temperatura del líquido. Para una composición dada, la fluidez se incrementa al aumentar el sobrecalentamiento.
- Contenido de óxido/partículas: el flujo se reduce a causa de la masa fundida, lo que produce una detención en la fluidez.
- Diámetro del canal: la capacidad de flujo es directamente proporcional al diámetro del canal.
- Recubrimiento: existe una transferencia de calor entre la fundición y el molde
- Tensión superficial: se da un llenado uniforme del molde.
- Conductividad térmica del molde: entre menos enfriamiento sufra el molde, el metal permanece en estado líquido más tiempo. Si el molde está caliente, se reducen las impurezas en el metal. Entre mayor enfriamiento exista en el molde, se presenta más rápido la solidificación en el líquido.
- Vertido del metal (temperatura, velocidad, turbulencia) y desgasificación.

1.2.9 Proceso de fundición en moldes

(Loper Jr, 1992) señala que, en un proceso de fundición típico, primero el metal fundido llena la cavidad, según está descrito por las leyes de la dinámica de fluidos (ecuaciones de Navier-Stokes). La aleación se solidifica y se enfría y siguen las leyes de transferencia de calor (ecuación de Fourier). Con el tiempo, pueden ocurrir transformaciones de estado sólido controladas por la termodinámica y la cinética, que se describen mediante la metalurgia física (Ecuación de Avrami).

1.2.10 Prueba de espiral.

Mile et. al. (2010) mencionan que la fluidez es una propiedad muy importante de cualquier masa fundida que afecta directamente la calidad de los productos fundidos finales. Se han desarrollado varios métodos para medir la capacidad de la masa

fundida para fluir a través del sistema de entrada, llenar la cavidad del molde y producir la forma deseada. Tradicionalmente, la fluidez se ha medido en un molde en espiral. La Figura 1 muestra herramientas utilizadas para medir la fluidez del metal y las aleaciones.

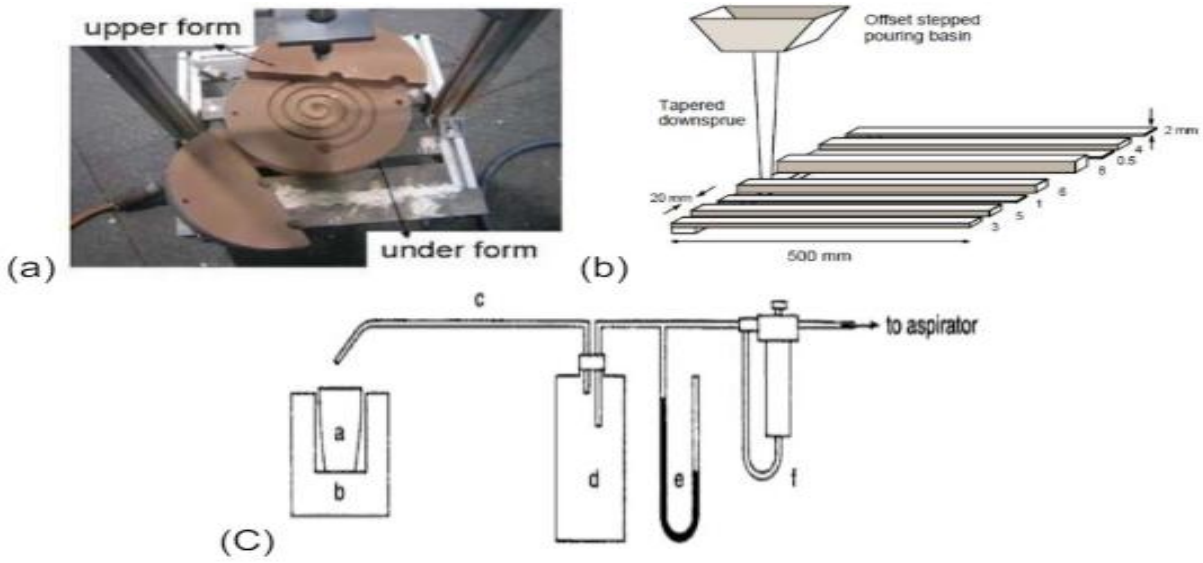


Figura 1: Medición de la fluidez mediante la prueba en espiral (a), una nueva prueba desarrollada en la Universidad de Birmingham, Reino Unido (b) y la prueba de vacío (Ragone) (c)

En las plantas de fundición de aluminio se utilizan dos pruebas de fluidez: la prueba de espiral y la prueba de vacío o Ragone. Aunque se utilizan ampliamente, también son muy criticados por varias razones, la más importante de ellas es la baja reproducibilidad de la prueba de fluidez. La fluidez de los metales se ve afectada por muchos parámetros, tales como: variables del metal (composición química y rango de solidificación), variables del molde y del molde/metal (revestimiento y conductividad térmica) y variables de prueba (contenido de óxido sobrecalentado). Por tanto, es difícil mantener todos estos parámetros bajo control en diversos experimentos. Para aumentar la reproducibilidad de las mediciones, muchos de los parámetros mencionados anteriormente deben controlarse durante los experimentos.

La calidad de los productos fundidos en las plantas de fundición de aluminio depende directamente de la calidad del metal fundido a partir del cual se funden los productos.

1.2.11 Métodos de evaluación de fluidez para Al-Si.

La evaluación de una aleación de Al-Si consiste en el análisis de la interacción del material con el molde, ya que tiene que fluir de manera uniforme para llenarlos completamente e ingresar sin atrancarse en los canales o paredes. El método más confiable y utilizado es el de prueba de espiral, que indica la longitud de flujo del metal dentro del molde con forma de espiral. Existen otros tipos como lo son la prueba de vacío, prueba de vertido en copa, prueba de vertido en embudo, prueba de índice de fluidez, entre otros.

1.2.12 Diseño y explicación del comportamiento del fluido en el molde.

Se diseña el molde con forma de espiral (Figura 2) según la parte automotriz que se desea fundir y conforme a la aleación Al-Si, se vierte en el punto de entrada y la presión hará que fluya la aleación en el espiral. Grande et al (2014) establecen que el tiempo de enfriado tendrá efectos de solidificación en la aleación con forma helicoidal, una vez que tanto el molde como la pieza, se encuentren a una

temperatura ambiente se procede al desmoldeo. Se mide el acabado superficial de las piezas generadas por el molde en espiral evaluando su calidad y determinando si se requieren ajustes en el molde y la eficiencia liquida/térmica de la aleación.

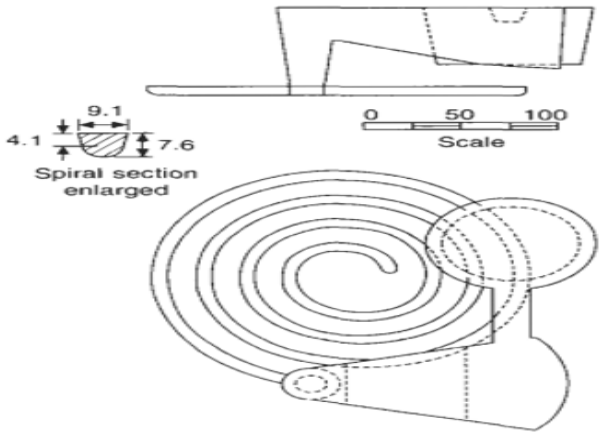


Figura 2: Ejemplo de molde en espiral para evaluar la fluidez (Marco Actis Grande, Ilaria Forno, 2014)

En el trabajo de Di Sabatino et al. (2005) se representan dibujos técnicos con acotaciones y un molde de espiral real fabricado (como se muestra en la Figura 3).

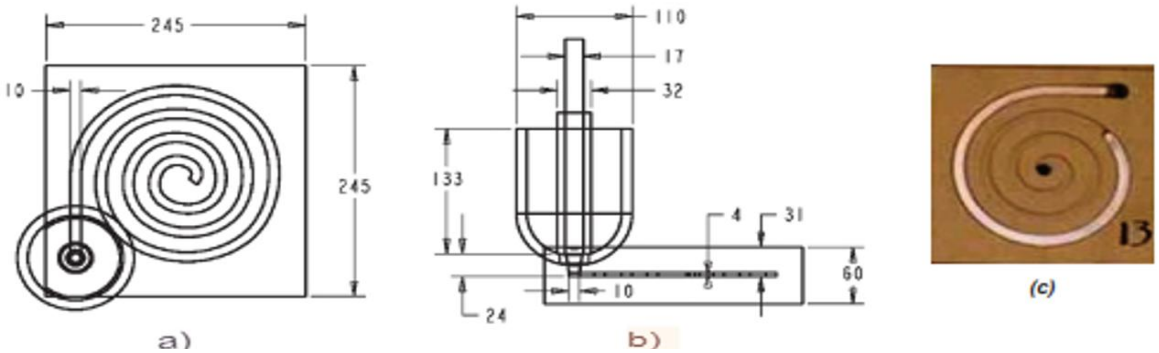


Figura 3: Dibujo del molde en espiral que muestra a) vista superior, b) vista lateral de la varilla de tapón, la copa de vertido y el molde de arena (todas las dimensiones están en mm); c) molde abierto y muestra de fundición (Marisa Di Sabatino, 2005)

1.2.13 Importancia de la fluidez en un molde en espiral.

John Campbell y Richard A. Harding (1994) señalan que tradicionalmente la fluidez se ha medido en un molde en espiral. La razón detrás de esto es claramente el deseo de comprimir la prueba de fluidez en un molde lo más pequeño posible, y que la distancia del flujo sea sensible a los errores de nivelación, y que estos se minimicen por la trayectoria en espiral del líquido (Figura 4).

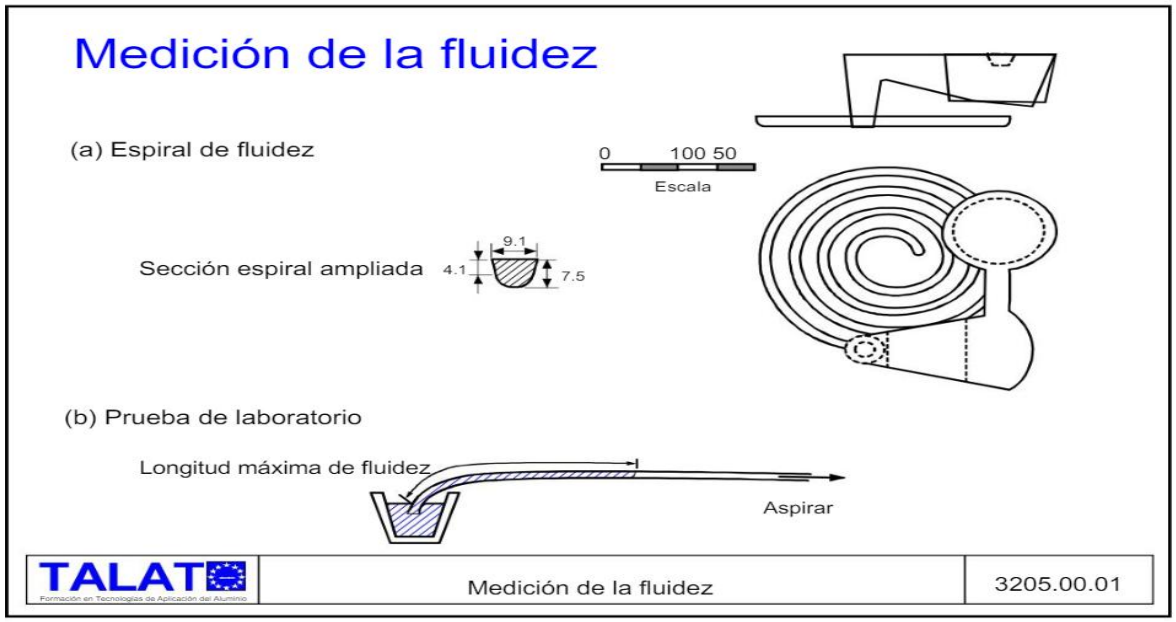


Figura 4: Especificaciones del espiral para plasmarlo en un molde

Durante el último medio siglo se han utilizado un gran número de variaciones de la prueba de la espiral.

Aunque se utilizan ampliamente, también son muy criticados por varias razones, probablemente la más importante de las cuales es que la prueba no guarda una relación clara con su aplicación en piezas fundidas reales. Por ejemplo, si se descubre que una aleación particular a una temperatura de fundición razonable proporciona una longitud de fluidez en espiral de 500 mm, no se asegura que esa misma aleación llené un molde con geometría real.

Un molde proporciona una gráfica de fluidez en función del espesor y varios moldes colados, que manejados a diferentes temperaturas caracterizan completamente la fluidez de un material determinado.

La figura 5 muestra el modo de solidificación desde las paredes exteriores hacia el centro a medida que el metal avanza a lo largo del molde. Un punto a tener en cuenta es la refundición de la parte del sólido congelado más cercana a la fuente de metal caliente. Por este motivo la zona solidificada migra progresivamente a lo largo del molde, arrastrándose detrás de la punta del líquido.

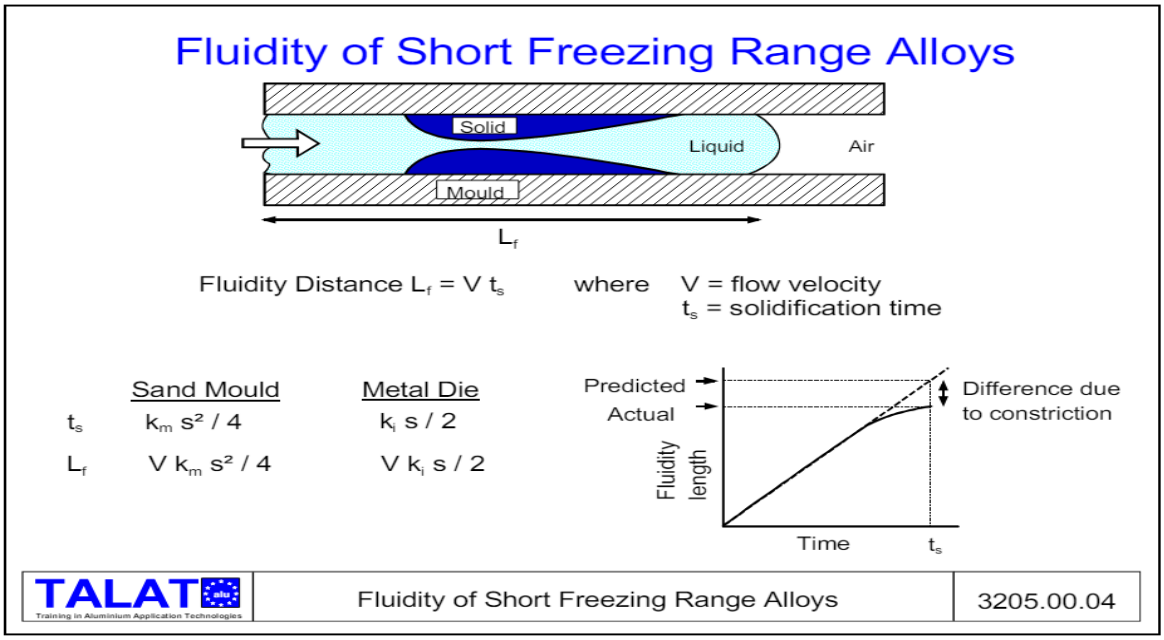


Figura 5: Fluidez de metales y aleaciones de corto rango de solidificación

Sin embargo, el punto importante a tener en cuenta es que el flujo de metal se detiene cuando los dos frentes de congelación se encuentran, aunque este a cierta distancia de la punta del flujo, esto corresponde a una solidificación del 100 % en este punto.

El frente de solidificación es dendrítico debido a que la congelación ocurre en un líquido en movimiento, la turbulencia masiva en el líquido causa remolinos turbulentos que barren las dendritas, llevando bolsas de líquido caliente a estas regiones más frías y así refundir los brazos de dendrita y otros fragmentos, para formar una suspensión de restos de dendrita. A medida que el fluido pierde calor, esta suspensión se concentra y gradualmente se vuelve tan espesa que es demasiado viscosa para fluir. Esto ocurre en diferentes fracciones de sólido en diferentes aleaciones y también parece estar influenciado por la cabeza metalostático que impulsa el flujo.

Sin embargo, en general, el flujo de líquido se detiene cuando la fracción volumétrica de sólido está entre el 25 y el 50 %.

Garrido Meneses y cols. (2011), señalan que en la figura 6 muestra el crecimiento de grano en aleaciones típicas de aluminio durante la solidificación

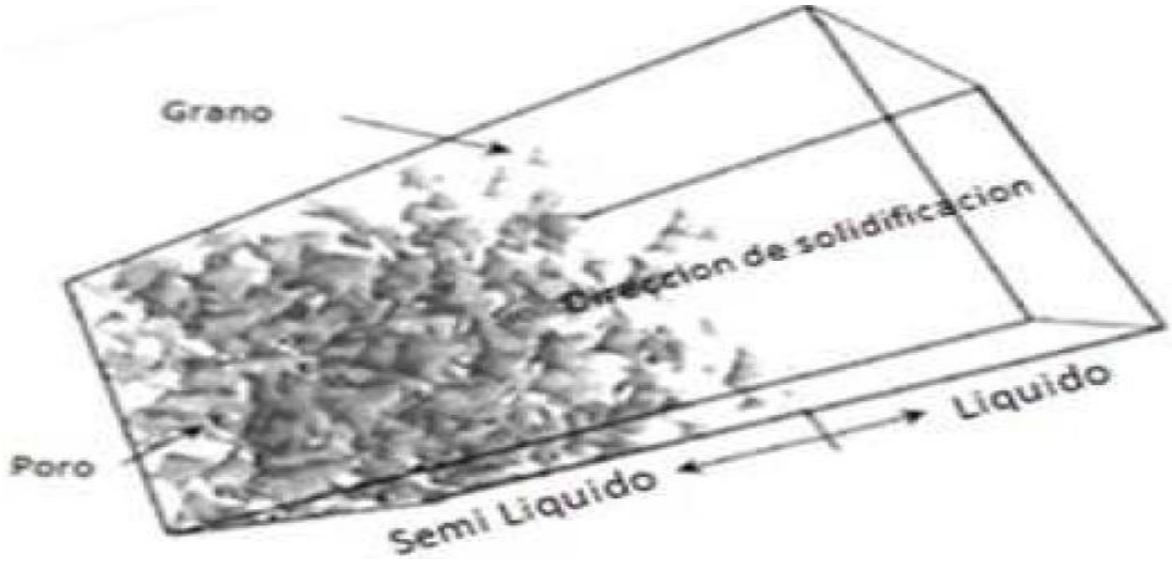


Figura 6: Visualización tridimensional de un moldeo que simula la estructura de grano y crecimiento de poro. Los granos son las estructuras sombreadas con aleación Al-7Si totalmente fundido; los poros se dan como esferas. (Fuente: Solidification and Casting, Oxford-Kobe Materials Text, Edited by Brian Cantor and Keyna O´Reilly Department of materials, University of Oxford, UK)

El tamaño de grano es rápidamente observado, buscado, y es un rasgo importante en las aleaciones de aluminio. Un tamaño de grano fino y uniforme es siempre deseado. Una estructura de grano columnar es característica de aleaciones con bajo soluto que han solidificado con un determinado gradiente de temperatura, poca turbulencia en la colada para conseguir el efecto de refinamiento de grano por separación de los brazos dendríticos. En el caso de turbulencia presentada directamente en el flujo del metal, la estructura de la aleación tendrá granos columnares y equiaxiados. Los brazos dendríticos no son particularmente fuertes y en las primeras etapas de la solidificación se pueden romper por agitación o por vibración mecánica dando lugar a un tamaño de grano más fino, granos no dendríticos equiaxiales distribuidos más uniformemente en toda la fundición.

El efecto de la tensión superficial se puede comparar con una contrapresión, a menudo conocida como repulsión capilar; repulsión ya que los moldes y matrices están diseñados para evitar que el metal líquido los humedezca; si el molde o la matriz se humedecieran, el efecto sería el conocido fenómeno de atracción capilar. Es un método para determinar la tensión superficial efectiva en problemas de llenado. En algunos casos resulta útil poder definir la distancia a la que puede fluir un metal en un canal, en el que el metal seguirá circulando para siempre, al menos en principio. Esto puede suceder en tramos cortos de canal donde el canal se abre posteriormente en una sección más grande. Ocurre porque la llegada de nuevo metal caliente al canal vuelve a fundir continuamente el material originalmente solidificado, depositándolo efectivamente más abajo en el canal. El efecto se muestra en la figura 7 su frente de solidificación es dendrítico debido a que la congelación ocurre en un líquido en movimiento, la turbulencia masiva en el líquido causa remolinos turbulentos que barren las dendritas, llevando bolsas de líquido caliente a estas regiones más frías y así refundir los brazos de dendrita y otros fragmentos, para formar una suspensión de restos de dendrita. A medida que el fluido pierde calor, ésta se espesa y gradualmente se vuelve tan espesa que es demasiado viscosa para fluir. Esto ocurre en diferentes fracciones de sólido en diferentes aleaciones y también parece estar influenciado por la cabeza metalostática que impulsa el flujo.

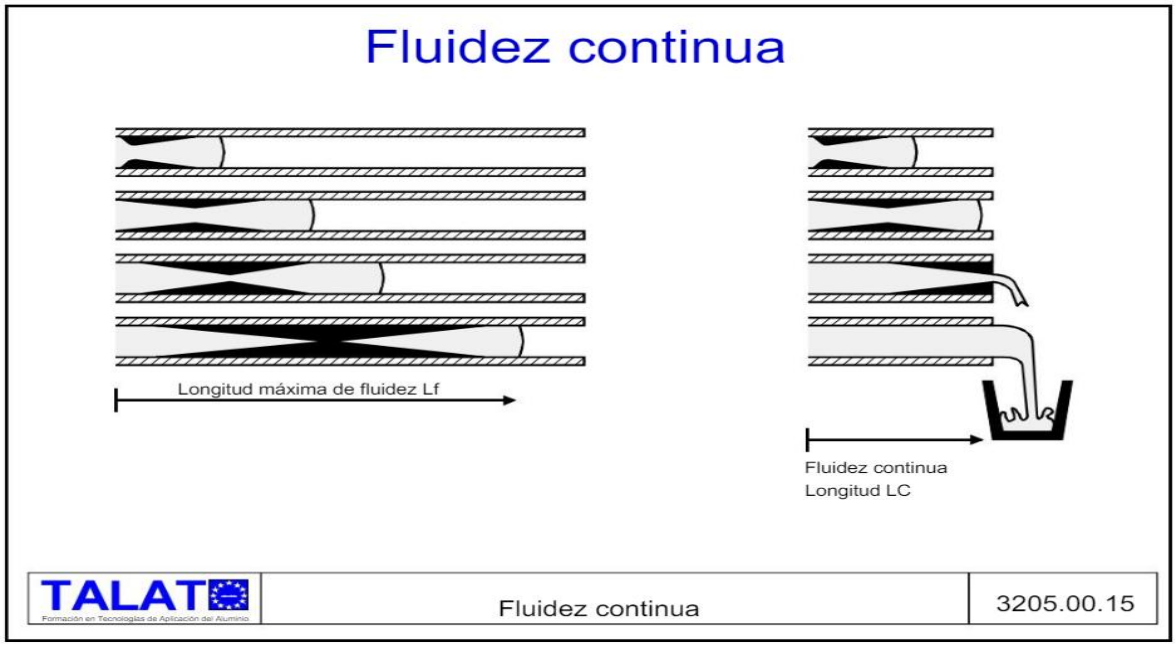


Figura 7: Fluidez Continua en un molde para su llenado (Proceso de refundición)

El concepto de fluidez continua puede permitir al ingeniero de fundición predecir qué tan pequeña puede ser la sección del sistema en funcionamiento y qué temperatura de fundición correspondiente se requerirá para evitar la congelación prematura en el sistema en funcionamiento. La fluidez máxima todavía existe con sobrecalentamiento cero porque hay calor latente en el líquido que permitirá que el metal continúe fluyendo por un corto tiempo.

Para una fluidez continua, siempre se requiere algo de sobrecalentamiento para que se produzca la acción de refundición.

1.2.14 Tipos de molde en espiral para determinar la fluidez en aleaciones

1.2.14.1 Primer diseño de molde en espiral

“Espiral de fundición”, según Sipp (ver figura 8). Se utiliza para determinar el flujo y la capacidad de llenado del molde de las aleaciones. La espiral de colada consta de un bebedero situado en el centro del molde y un canal de flujo con forma en espiral alineado horizontalmente. La determinación de la longitud de salida se determina utilizando las marcas que se muestran en el canal de flujo. La distancia entre las marcas es siempre el mismo siendo de 50 mm. La fluidez de la aleación corresponde a la longitud total del espiral mostrado y la capacidad de llenado del molde corresponde a la longitud de la pieza en espiral que proporciona una reproducción completa y sin errores del contorno del canal de flujo.

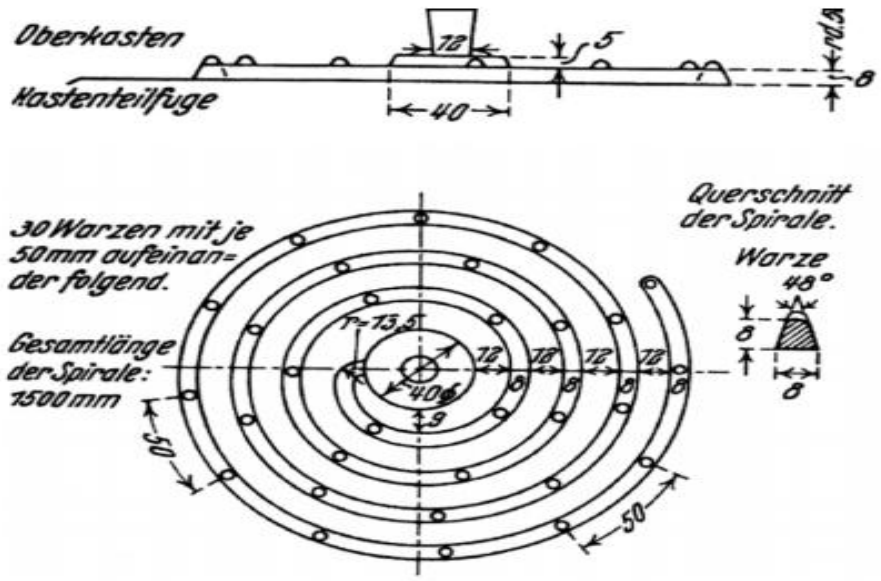


Figura 8: Muestra de fundición "Espiral de fundición según Sipp"

1.2.14.2 Segundo diseño de molde en espiral.

La Figura 9 muestra la cubeta de vertido y el molde de arena. Las dos espirales de Arquímedes, cada una con una sección transversal de 4 x 10 mm^2, constaba de 3.5 vueltas, dando una longitud máxima de recorrido de 1.2 m cada una. Ambos extremos de la espiral estaban completamente ventilados.

Di Sabatino (2005) menciona que el metal fundido se vertía manualmente desde el horno hasta el recipiente de vertido con una cuchara. La temperatura del metal fue medida por el operador con un termopar calibrado (tipo Precisión de ±1ºC) en la cuchara, antes de verter en la cuenca. El objetivo era verter el metal fundido en el depósito lo más rápido posible y llenarlo por completo, para tener la misma carga de presión metalostática inicial sobre el metal que fluye.

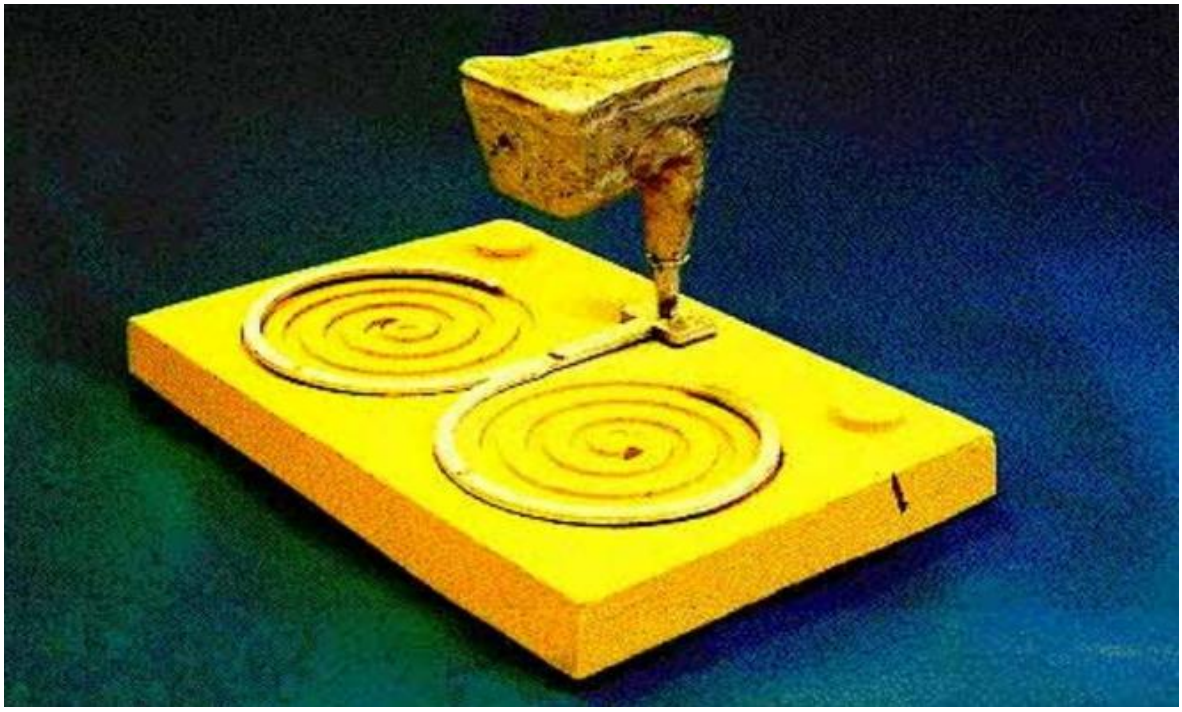


Figura 9: Cuenco vertedor y molde de doble espiral de la versión original de fluidez en espiral equipo de prueba

1.2.14.3 Tercer diseño de molde en espiral.

Las longitudes de flujo se determinan en un espiral de fundición para las aleaciones a examinar. El espiral de fundición utilizado aquí es un molde de acero de nuevo diseño (figura 10), que se calienta mediante un circuito de aceite regulado a una temperatura de 250°C. El llenado de la espiral de fundición es una innovación más en el experimento.

Para las aleaciones a examinar, las longitudes de flujo se determinan en un espiral de fundición según la hoja de datos VDG. Para ello, en un horno de resistencia se

funden sintéticamente aleaciones a partir de Al, Al-Si, Mg y otros componentes de la aleación en cantidades más pequeñas y con agentes refinadores de grano.

El molde consta de una parte superior en la que se integran ranuras de ventilación. Se utiliza un sistema de bebedero de arena para que la masa fundida no comience a solidificarse o incluso congelarse en el bebedero. Un canal de alimentación debe permanecer libre el mayor tiempo posible.

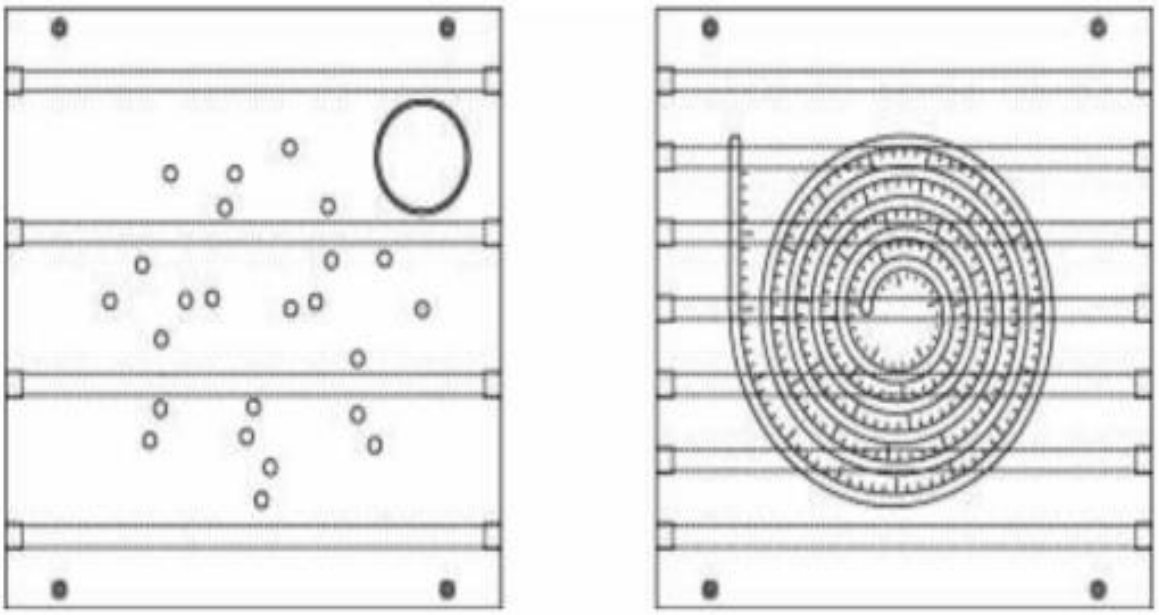


Figura 10: Se muestra un boceto del molde en espiral de fundición recientemente diseñado. La parte superior la mitad del molde (Izquierda) contiene una abertura para el bebedero insertable hecha de arena unida en caja fría, orificios de ventilación y canales de calentamiento-enfriamiento. Las marcas a lo largo de la geometría en espiral corresponden a una dimensión en cm

Proceso de vertido al molde en espiral con disposición realizada integrado un brazo manipulador con el fin de lograr una mejor reproducción para lograr precisión en los resultados (figura 11 y figura 12).



Figura 11: a) Llenado de la cuchara vertedora con ayuda del brazo manipulador. b) La colada en el espiral de colada se realiza mediante un sistema de bebedero de arena. La cuchara manipuladora evita las fluctuaciones provocadas por el lanzador al llenar el molde



Figura 12: Espiral de fundición en molde permanente articulado con calentador de aceite conectado y bebedero

1.2.15 Importancia del molde descrita por Bericht von Ricchard Franzmann

Bericht (2013) indica que con la norma DIN (por sus siglas en alemán: Deutsches Institut für Normung, Instituto Alemán de Normalización), la elección del molde queda en manos del inspector. La norma específica, cómo se debe procesar la barra de prueba fundida. El diseño del molde determina la cristalización y, por tanto, también las propiedades mecánicas. Esto significa que el probador tiene una influencia directa en los resultados a través de la elección del molde.

La cristalización también juega un papel decisivo en la dureza, el probador influye directamente en los resultados al elegir el lugar en el que se realiza la prueba de dureza.

Además de la fluidez, con estos espirales de colado también se puede determinar la capacidad de llenado del molde (Shculz, 1998). Por otro lado, se pueden encontrar espirales de fundición sin protuberancias, en las que sólo se determina el recorrido del flujo, ver figura 13 (Ilschner y Singer, 2000).

También es posible calentar estas formas permanentes. Este calentamiento intenta controlar las fluctuaciones de temperatura que se producen debido al autocalentamiento que se produce en el transcurso de una serie de pruebas. El calentamiento externo tiene como objetivo mantener constante la temperatura del molde para que todos los ensayos se realicen bajo los mismos parámetros.

En la empresa mexicana de componentes automotrices sólo se utilizan moldes permanentes, por lo que el comportamiento de la masa fundida en un molde de arena no es de primordial interés. Se utiliza un molde permanente calentado, ya que no debe sufrir fluctuaciones de temperatura, tampoco existen picos para determinar la capacidad de llenado del molde, ya que esto debe determinarse en una prueba separada.

Dado que no existen normas exactas para la forma de la espiral de fundición, se utilizan como guías espirales de fundición de Clausthal y Aquisgrán.

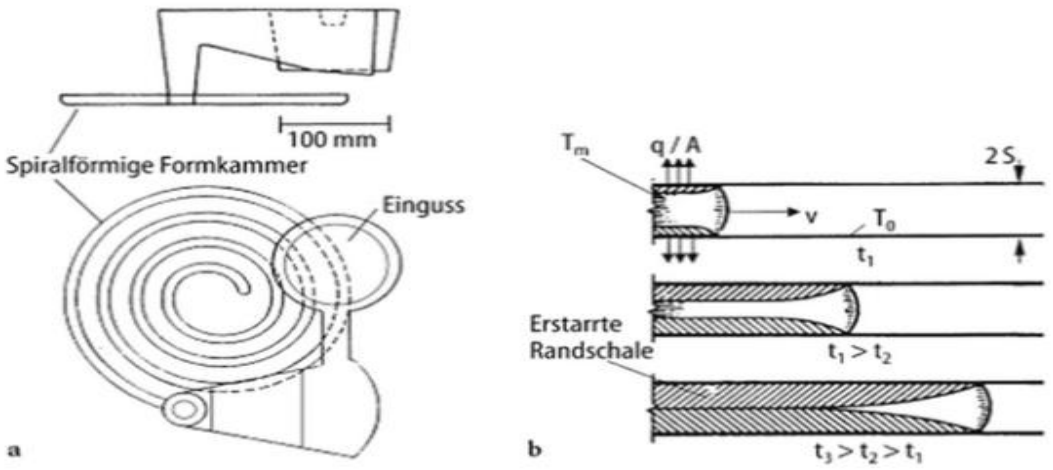


Figura 13: Muestra la geometría de una espiral de colada con bebedero (a) y el proceso de solidificación en ésta (b). La solidificación comienza en la capa exterior y continúa hacia el centro. Cuando las zonas solidificadas se juntan, la masa fundida se detiene y ya no es posible ninguna alimentación adicional; Fuente: Ciencia de los materiales y procesos de fabricación Schneider y Singer

La fluidez depende de la ductilidad de la masa fundida al verterla. Esto a su vez depende de la temperatura, la composición química y las impurezas. A mayor temperatura, la ductilidad aumenta, pero también aumenta la contracción. Esto aumenta el número de espiráculos (Fritz y Schultz,2022). Otra influencia negativa de una temperatura de flujo elevada es la tendencia a producir grietas en caliente [Defectos estructurales y de fundición Stephan Hasse]. La composición química influye en la ductilidad a través del tipo de solidificación. Se distingue entre tres tipos diferentes de solidificación: de paredes lisas, de paredes lisas a celulares y de paredes rugosas. La solidificación de paredes lisas sólo se produce en el aluminio muy puro. A medida que aumenta el contenido de aleación, la solidificación cambia desde tipos de solidificación de paredes rugosas a esponjosos. En el caso de una solidificación de paredes lisas, la nucleación comienza en el borde, mientras que en una solidificación blanda se puede observar una solidificación dentro de la masa fundida (tecnología de aplicación de aluminio de Ostermann). El proceso de fundición y el gradiente de temperatura asociado tienen una influencia importante en la solidificación. Las altas tasas de solidificación la modifican como una de paredes lisas. En pocas palabras, se puede decir que la solidificación de paredes lisas tiene mejores propiedades de fluidez.

Algunos ejemplos de pruebas de moldes por fundición por gravedad se muestran en la tabla 1:

Tabla 1: Tipos de fundición con las pruebas pertinentes

Tabla 1: Tipos de fundición con las pruebas pertinentes

Fundición por gravedad
Molde ASMT para prueba
molde francés
Muestra de perno
Espiral + bebedero de arena
prueba de contracción
K- molde

1.2.16 Diseño de probetas en forma de espiral colada a las temperaturas de estudio

Las probetas para evaluar el efecto de la temperatura de colada de la aleación de aluminio ASM 356 sobre la fluidez, se realizarán en forma de espiral según el método Shneider para molde de arena, el cual se muestra en la figura 14 (Mantilla Castañeda, J. E., & Torres Rivas Plata, T. A. (2016)).

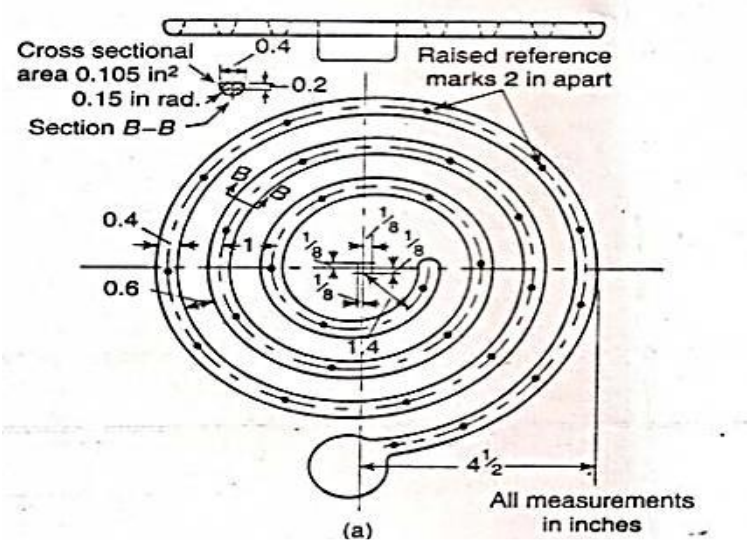


Figura 14: Forma espiral para medir la fluidez de aleaciones para colada según Shneider y Hufngel. Fuente: Rojas I., "Influencia en las variables metalúrgicas en la expansión – contracción de fundiciones nodulares", 2008, pp. 55 – 61

En la figura 15, se observa que a medida que se incrementa la temperatura de colada desde 680°C hasta 800°C, la fluidez medida en centímetros (cm) aumenta desde 35.90 cm para 680°C hasta 159.90 cm para 800°C. 54, este aumento se debe a que el sobrecalentamiento (diferencia de temperatura de colada y la temperatura liquidus) se incrementa con el aumento de la temperatura de colada. Este incremento en el sobrecalentamiento retrasa la nucleación y crecimiento de los granos sólidos en la solidificación, y también a mayores sobrecalentamientos, mayor será el volumen de fluido que pasa a través del canal y el tiempo de disipación del calor latente de fusión (ΔHf) aumenta incrementando la colabilidad.



Figura 15: a) Molde de arena para la obtención de las probetas de ensayo de fluidez, b) Probetas en forma de espiral colada a las temperaturas de estudio, según el método de Schneider para evaluación de la fluidez

1.2.17 Importancia de la geometría del espiral y llenado en el molde.

Aunque la fluidez sea cuantificada consecuentemente como la máxima distancia con la cual el metal fluirá en unas inexactitudes en el aplanamiento del molde. (Maldini, C. & cols. 2004) destacan que el canal es enrollado en un espiral entonces el molde se torna más compacto y conveniente y, por lo tanto, es menos sensitivo a errores de aplanamiento. Por esta razón se utilizan moldes en espiral. Casi universalmente, los objetos metálicos comerciales son solidificados desde una fase líquida a sus formas finales, llamadas fundiciones o bien en formas intermedias llamadas lingotes, las cuales se transforman mediante trabajo u otra fundición a sus formas finales. El llenado de moldes es de máxima importancia en el proceso de fundición. Este proceso involucra problemas de mecánica de fluidos con transferencia de calor a lo largo de un canal horizontal. Este tipo de molde es inconvenientemente largo para usarse en una fundición y, además, los resultados son sensibles a ligeros cambios de temperatura y, en particular, a la predicción de la superficie interfaz móvil metal-aire. Dada la complejidad del problema se recurre al uso de herramientas computacionales para su análisis.

La solución obtenida con efectos de cambio de fase presenta un comportamiento adecuado. La temperatura solidus se encuentra en el frente del material cuando fluye, mientras que la del liquidus está exactamente detrás de este (véase en la figura 16) lo que describe en forma adecuada el comportamiento físico observado experimentalmente ya que el frente material, para desplazarse, no debe haberse solidificado. Sin embargo, el modelo no incluye el efecto sobre la velocidad de desplazamiento del frente material en función del estado del mismo. Sobre estos aspectos se deberá seguir trabajando en futuras investigaciones.

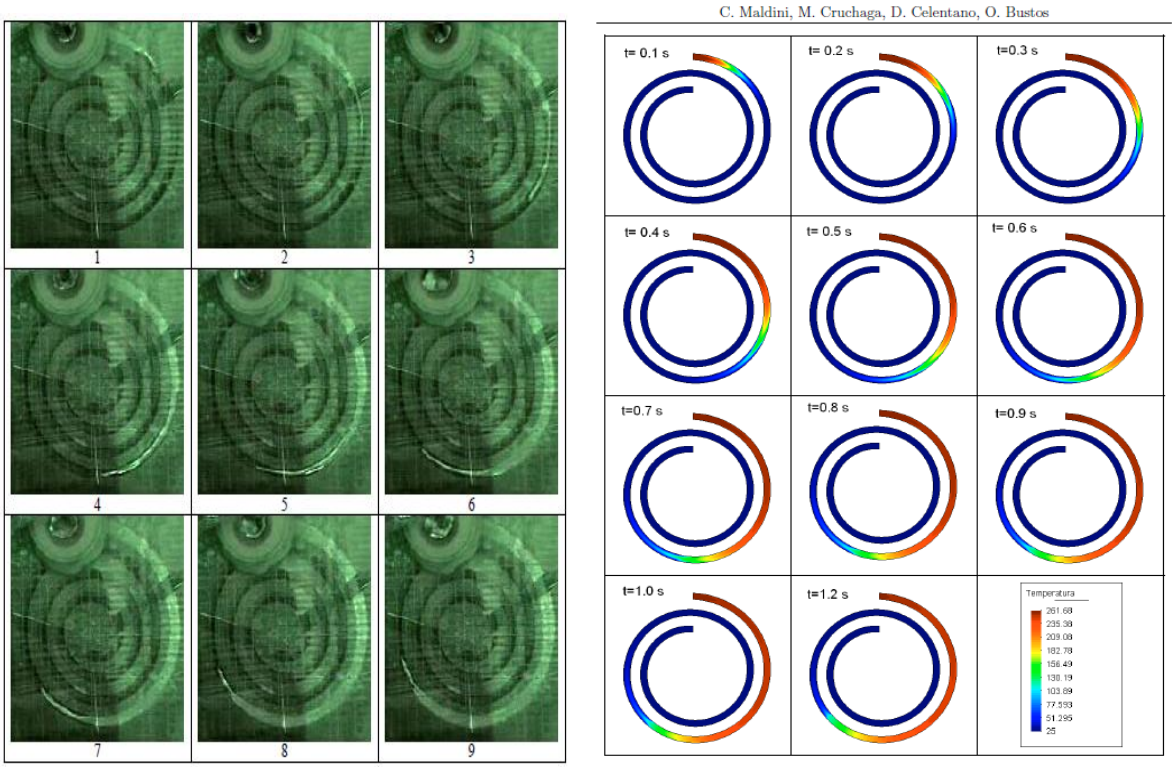


Figura 16: a) Secuencia de llenado espiral, llenado Pb-50Sn, TC=260ºC. b) Variación en el tiempo de la temperatura para varios tiempos de llenado, Caso1

1.2.18 Simulación de prueba de fluidez en el molde

Bonollo y S. Odorizzi (2001) establecen que el paquete que se utilizó para simular numéricamente el flujo de fluido de metal fundido. En moldes de arena en forma de espiral. Magmasoft®, que requiere del volumen de diferencias finitas (por sus siglas en inglés “FDV”) y el procedimiento de simulación se pueden describir con el orden de siguiente:

definición de geometría, generación de malla, definición de parámetros de material y proceso, simulación/solución de las ecuaciones y evaluación de los resultados. La geometría y malla utilizadas para las simulaciones se muestran en la Figura 17.

En primer lugar, esta investigación se centró en la generación de malla para lograr una óptima condición de simulación. Posteriormente, se llevaron a cabo simulaciones para evaluar la influencia del coeficiente de transferencia de calor, la temperatura de fundición y la coherencia de la temperatura sobre la fluidez de la aleación A356

El metal fundido se vertió en una taza y cuando su temperatura medida por un termopar colocado en la copa, alcanzó un valor preestablecido, el sistema de compuerta se abrió automáticamente mediante una varilla de tapón y el metal entró en la cavidad espiral en el molde de arena. En este sentido, Di Sabatino et al. (2005) establece que el equipo utilizado tiene una alta reproducibilidad porque permite un buen control sobre la temperatura de fundición (de ahí la aleación sobrecalentamiento) y tiene una velocidad de vertido altamente reproducible.

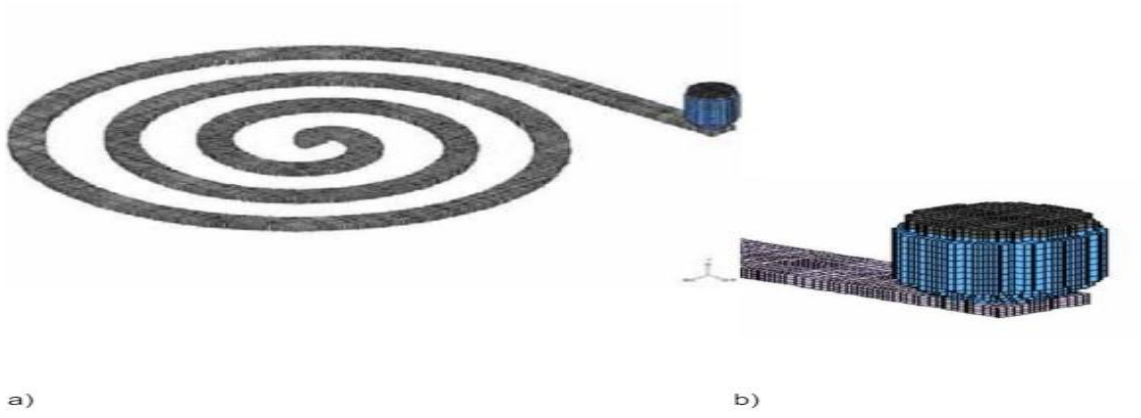


Figura 17: Geometría y malla: a) entrada, vaso vertedor y espiral; b) mayor aumento para mostrar la calidad de la malla

Los autores midieron la longitud de las espirales simuladas, la longitud promedio de los espirales experimentales con su desviación estándar y los valores medios. Claramente, las predicciones de la simulación encajan bien con los resultados experimentales como se muestra en las figuras 18 y 19. Los resultados de las simulaciones a 700ºC y 730ºC son consistentes con los resultados experimentales de las pruebas de espiral en la misma fundición.

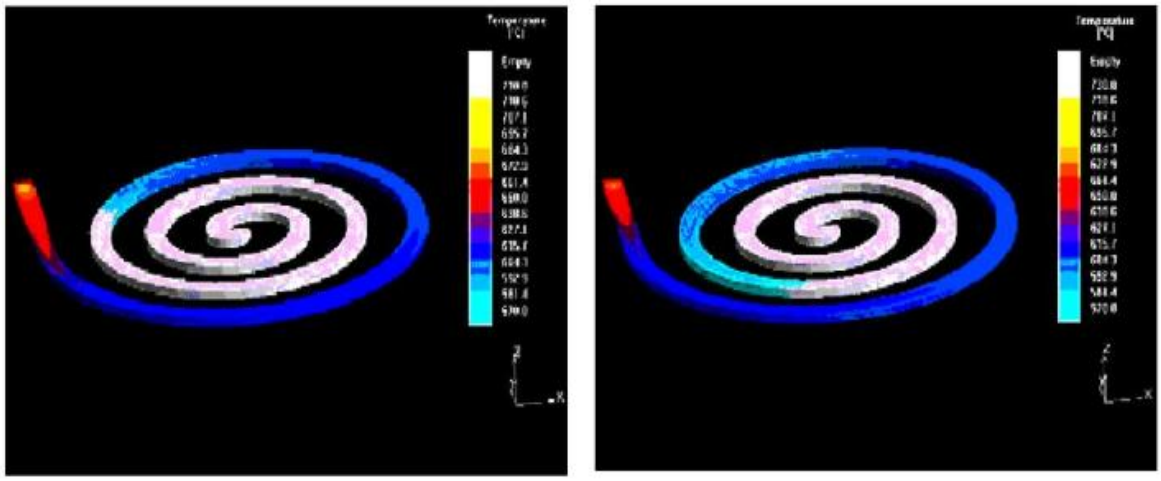


Figura 18: Resultados de simulación de fluidez a)700°C, longitud de fluidez 550 mm; y B)730°C, longitud de fluidez 645 mm

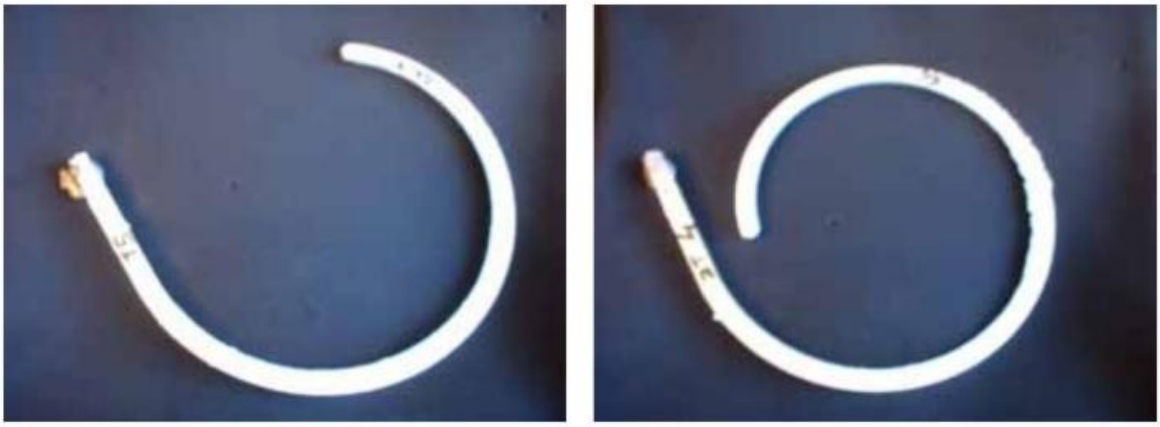


Figura 19: Resultados experimentales de las pruebas de espiral a) 700°C, longitud de fluidez 460 milímetros; y b)730°C, longitud de fluidez 630mm

La tabla 2 se comparan los resultados de las simulaciones y las pruebas en espiral presentadas en este trabajo donde se observa que, a mayor temperatura, mayor es la distancia recorrida en la espiral (Di Sabatino, et al. 2005).

Tabla 2: Comparación entre los resultados de la simulación corrida y prueba de espiral. Los resultados de tres temperaturas de fundición son comparados en: la longitud de las partes simuladas, y el promedio de longitud de los espirales experimentales con su desviación estándar en esos los valores medios, σ_m,medidos

Temperature [°C]	**Simulation runs** Length, $\bar{x}$ [mm]	**Spiral tests** Average length, $\bar{x} \pm \sigma_m$ [mm]
700	550	460±10
715	620	542±7
730	645	630±10

1.2.19 Procedimiento de llenado del molde de espiral.

Las partes principales del aparato de prueba de fluidez se muestran en la Figura 20. Este equipo consiste en una copa de vertido, un bebedero cónico circular corto, una varilla de tapón conectada a un cilindro neumático y un molde de arena de sílice hecho con un disparador de núcleos mediante el proceso de caja fría (resina de uretano fenólico curada con vapor de amina).

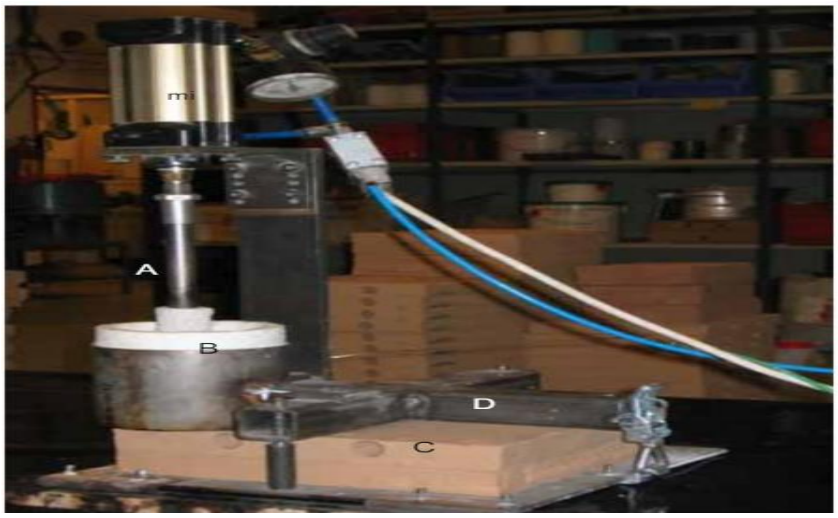


Figura 20: Aparato de prueba de fluidez. Las partes principales son: A-Varilla de tope, B- vaso vertedor, C-molde de arena, D-Abrazaderas metálicas, E-Cilindro neumático

Di sabatino et al, (2008) hace énfasis en que la varilla de tapón móvil cerró inicialmente el fondo del vaso de vertido y abrió automáticamente la compuerta cuando la temperatura del metal fundido alcanzó un valor preestablecido, que fue medido por un termopar en una posición fija en el vaso de vertido. La válvula neumática, controlada por un PLC, regulaba el movimiento de la varilla del tope. Cuando se abrió la puerta, el metal llenó el molde de arena en espiral. De esta manera, el equipo proporcionó un sobrecalentamiento preciso de la masa fundida. Anteriormente se presentó una descripción más detallada del aparato de prueba y la reproducibilidad de este. La aleación utilizada en estos experimentos fue A356. Se fundió un lote de 50 kg de la aleación a 760ºC en un horno de resistencia. La longitud de la espiral se tomó como valor de fluidez.

La Figura 21 muestra una espiral fundida en un molde de arena, los dos lugares donde se tomaron las muestras y la sección transversal (4 x 10 mm^2) de cada una de las espirales investigadas.

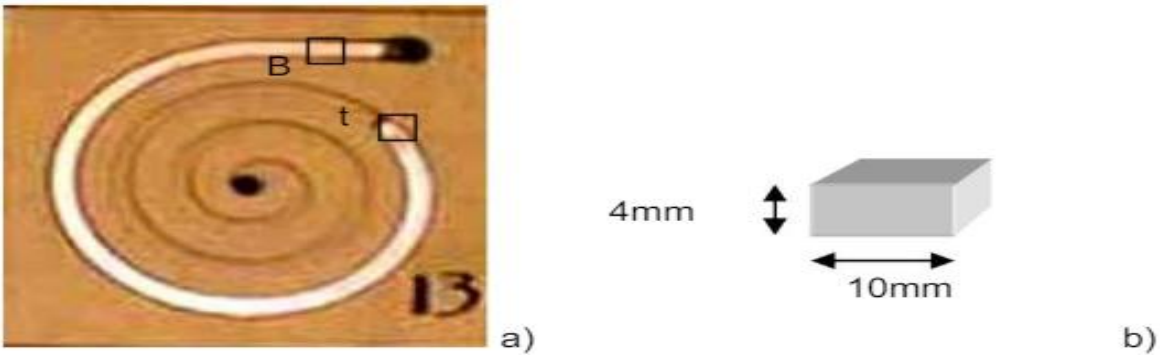


Figura 21: a) Espiral fundida en molde de arena y dos lugares donde se tomaron las muestras para cada espiral investigada. (B-base de la espiral, cerca del recipiente de vertido; T-punta de la espiral) y b) Sección transversal de la espiral)

Ejemplos de muestras de microscopia de ambas secciones de las pruebas en el molde de espiral (figura 22).

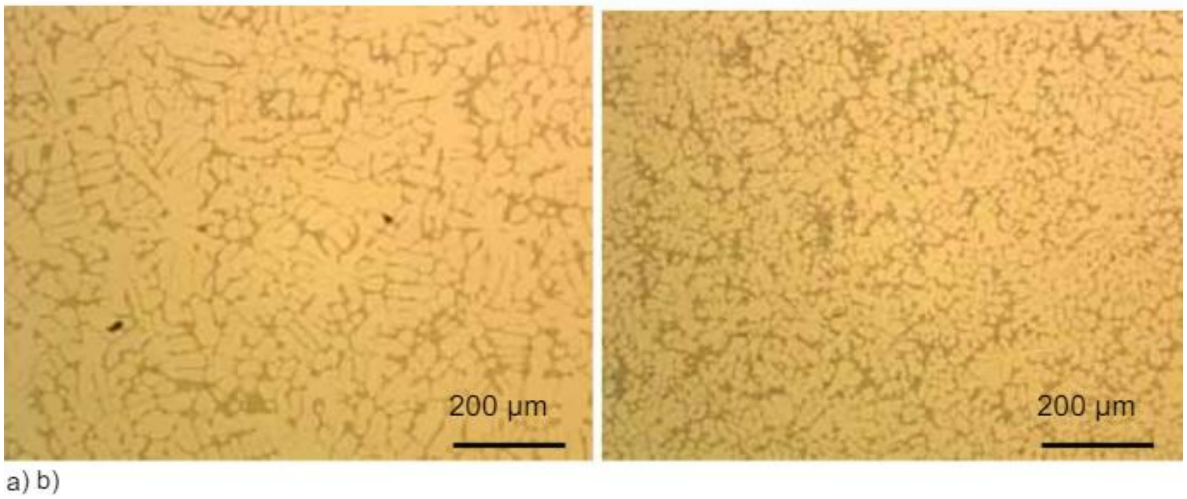


Figura 22: Micrografías ópticas de la muestra refinada 1R2 (0.01% en peso de Ti) de a) base y b) punta de espiral

1.2.20 Metalografías, microestructuras y efectos de las aleaciones

1.2.20.1 Tipos de metalografías de Al-Si

En el trabajo de Caluguillin Achina, J. G., & Lema Quishpe (2016) se indica que el nivel de modificación en la aleación se refiere al tipo de microestructura que presenta la fase eutéctica después de realizada modificación. Este cambio está representado en un sistema de clasificación adoptado por la American Foundry Society (AFS), en donde todo el rango de niveles de modificación se divide en seis clases, que se basan en el tamaño de las partículas de silicio eutéctico.

La figura 23, muestra los niveles de modificación eutéctica de una aleación (Al-Si). La clase 1 representa una microestructura no modificada (acicular), las clases 2,3 y 4 representan una microestructura sub modificada(laminar), las clases 5 y 6 representan una microestructura modificada y sobre modificada (fibrosa).

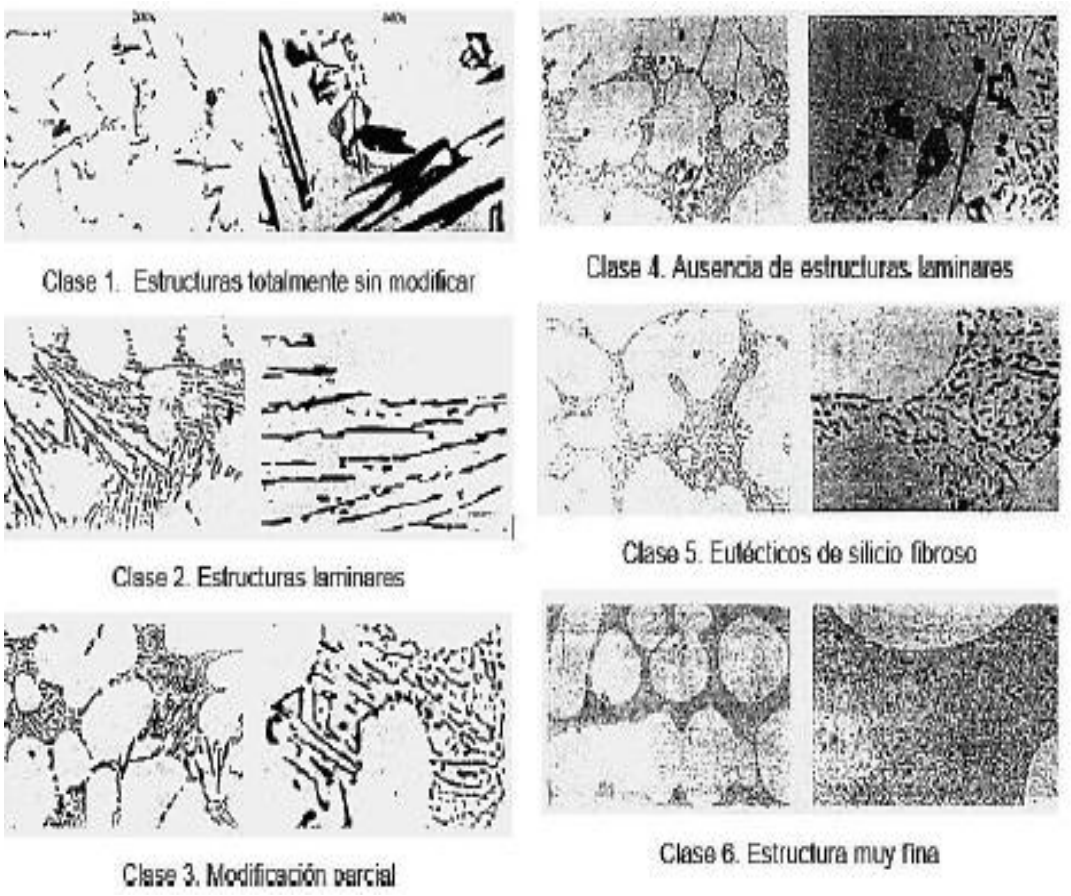


Figura 23: Niveles de modificación eutéctica de Al-Si. Fuente: American Society for Metals. Metals handbook (9th ed., Vol. 15)

1.2.20.2 Efecto de la modificación química en la estructura.

Los cambios estructurales de silicio acicular a fibras de silicio se presentan de una manera gradual, de tal manera que, a concentraciones insuficientes del agente modificador, se promueve una estructura mixta conformada por regiones aciculares, laminares y de fibras (Apeliann et. al., 1984,1990,1995)).

La Tabla 3 describe cada una de las estructuras observadas. La microestructura obtenida no sólo es producida por el agente modificador, sino es consecuencia de la interacción compleja que presentan cuatro variables adicionales: las impurezas presentes en el baño metálico, la cantidad empleada de modificador, la velocidad de solidificación y el contenido de silicio en la aleación menciona (Torres González, R. (2007)).

Tabla 3: Descripción de los niveles de modificación alcanzados con diferentes contenidos de Sr en aleaciones vaciadas Al-Si.

Nivel de Modificación		
Clase	**Descripción**	**Características de la estructura**
1	Sin modificar	• Placas largas de silicio • Partículas aciculares de silicio
2	Laminar	• Silicio laminar • Partículas aciculares de silicio
3	Modificación parcial	• Comienza a romperse la estructura laminar de silicio • Partículas aciculares de silicio
4	No laminar	• La mayoría de la estructura laminar de silicio se ha roto • Permanecen pocas partículas aciculares
5	Modificada	• Partículas de silicio con morfología de fibras • Han desaparecido las partículas aciculares de silicio
6	Muy modificada	• Partículas de silicio con morfología de fibras extremadamente finas

Por otro lado, Moreno (2020) indica que en los resultados observados en la Figura 24, la microestructura de la aleación cambia según el contenido de silicio:

• 99,95% de Al: Solo se observa granos grandes de aluminio.

• Al-Si hipoeutéctico (8% de Si): Las zonas de color blanco están compuestas por la fase α del aluminio, las cuales tienen un crecimiento columnar formando una estructura de morfología dendrítica. Mientras que el color gris que queda entre las dendritas es la fase eutéctica compuesta por una matriz de aluminio (zona blanca) y cristales silicio (placas finas que se observan como finas agujas oscuras).

• Al-Si eutéctico (12% Si): Idealmente todo el líquido se ha transformado en eutéctico, con lo que no se observa la fase α y solo se observa una matriz blanca de aluminio con oscuras agujas de silicio distribuidas en ella.

• Al-Si hipereutéctico (20% Si): Al aumentar el contenido de silicio, los cristales de silicio crecen y aparecen como granos primarios (áreas poligonales oscuras). Entre los precipitados de silicio primario se encuentra la fase eutéctica de Al-Si. Si se sigue aumentado el contenido de silicio (50% Si), las agujas se convierten en grandes placas de silicio primario y la fracción de eutéctico se reduce.

• 100% de Si: Solo se observan placas grandes de Si primario sin la presencia de aluminio.

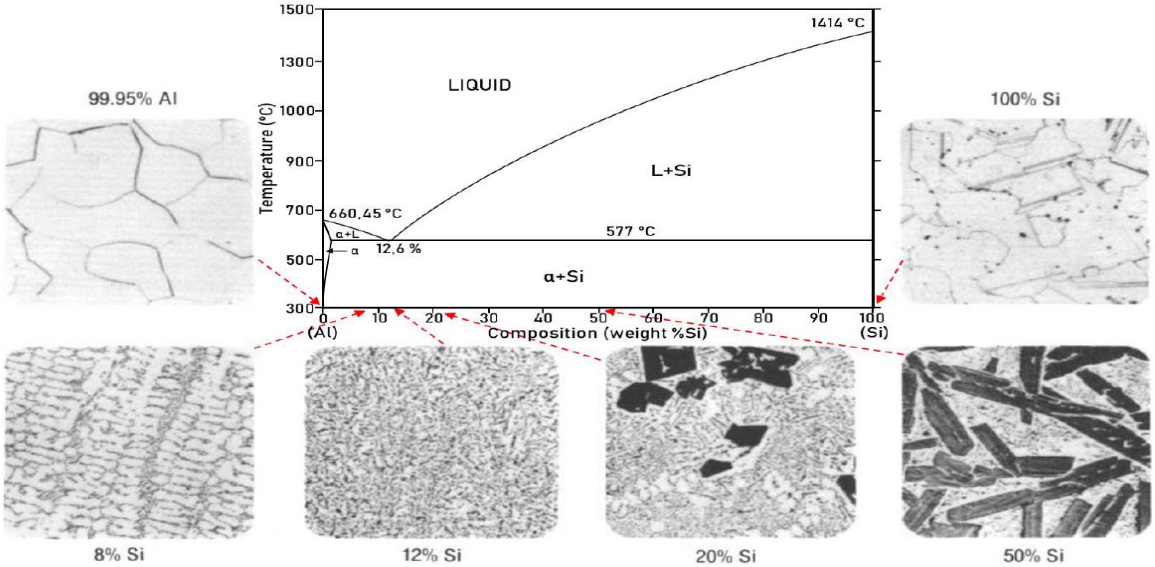


Figura 24: Diagrama de fases de equilibrio para una aleación aluminio-silicio. Fuente: A. Karney y E. L. Rooy," Aluminum Foundry Products" de ASM Handbook, Volume 2.

1.2.20.3 Efectos de la modificación en la microestructura

Los autores Gruzleski y Bernard (1990), indican que el cambio microestructural del silicio acicular al fibroso no es brusco y las piezas moldeadas con una cantidad inadecuada de sodio o estroncio presentarán una estructura mixta, con regiones de silicio fibroso, silicio laminar y silicio acicular. La modificación con estroncio suele ser menos uniforme que con sodio y, por supuesto, el antimonio sólo producirá una estructura laminar y nunca fibrosa.

En la figura 25 se muestra toda la gama de microestructuras observadas en la modificación de una aleación hipo eutéctica, tanto a un aumento relativamente bajo como a un aumento alto. Estas estructuras se han dividido en seis clases como demuestran las microestructuras (Apelian, D. y cols. (1984)), correspondiendo las estructuras bien modificadas a la clase 5, las poco modificadas a las clases 2-4 y las laminares a la clase 2. La formación de la estructura muy fina, a veces denominada supermodificada, de la clase 6, no se conoce bien en la actualidad. Puede producirse en el laboratorio por enfriamiento rápido de muestras parcialmente solidificadas, y aunque a veces se observa en coladas comerciales, su producción parece no ser repetible. Así pues, la gran mayoría de las piezas moldeadas modificadas tendrán estructuras del tipo 1 a 5.

Para evaluar la eficacia de la modificación, a veces es útil cuantificar la microestructura. Esto puede hacerse fácilmente examinando una sección pulida al microscopio y asignando a cada clase la proporción de la superficie de la muestra que tiene un tipo concreto de modificación.

Cinco variables determinan la microestructura exacta que se formará:

1. Tipo de modificador utilizado.
2. Impurezas presentes en la masa fundida.
3. Cantidad de modificador utilizado.
4. Tasa de congelación.
5. Contenido de silicio de la aleación.

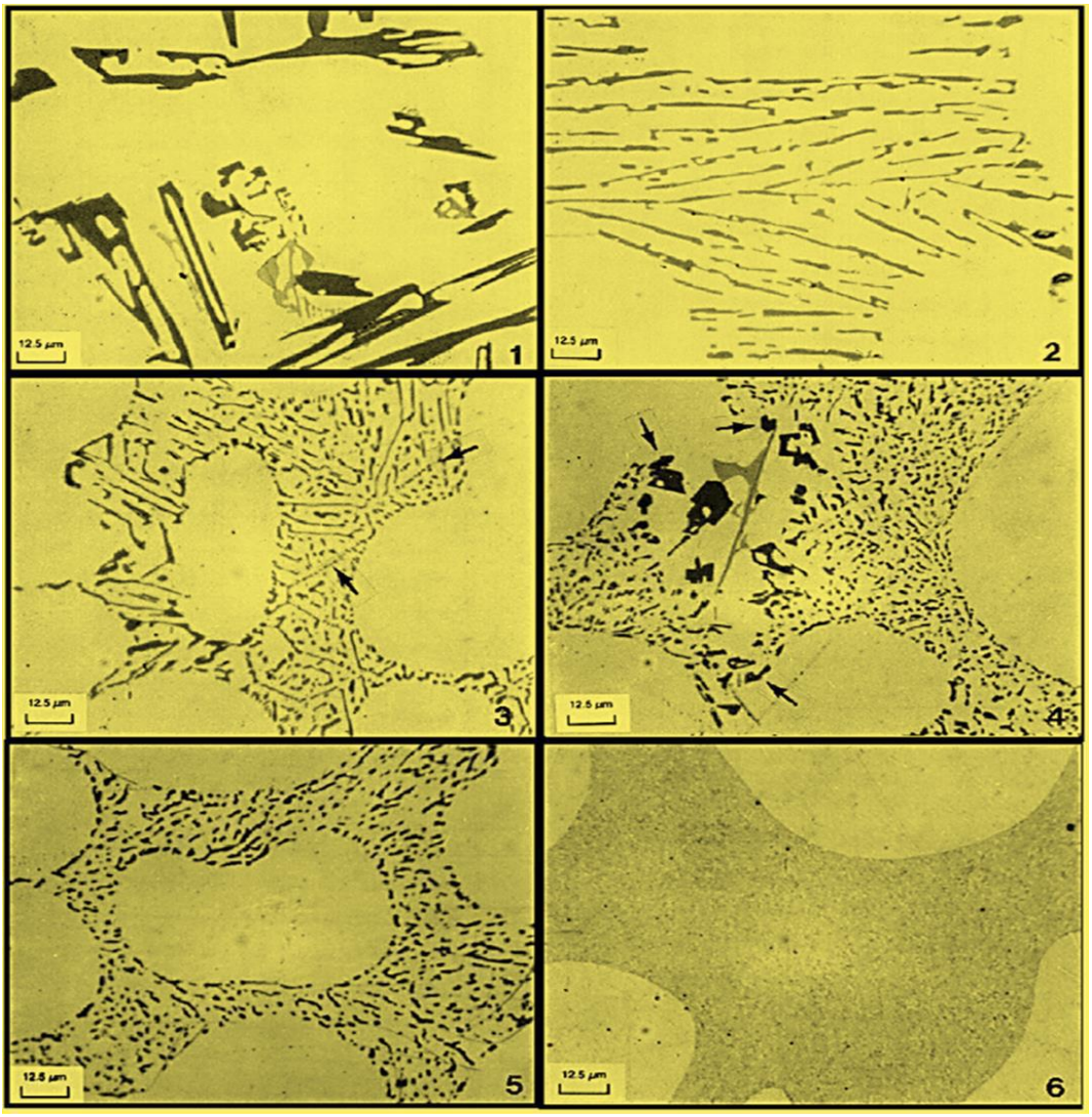


Figura 25: Clasificación de niveles de modificación de acuerdo a AFS Catalogo de imágenes Metallurgical Central Laboratory. Empresa mexicana de componentes automotrices

Estas cinco variables en la lista interactúan de manera muy compleja, y nuestros conocimientos actuales son insuficientes para permitir una predicción cuantitativa exacta de la microestructura, por ejemplo, mediante la manipulación del índice de modificación en cualquier conjunto específico de las cinco variables. Sin embargo, se pueden especificar tendencias generales para que el fundidor sepa al menos qué dirección seguir.

2. Métodología

En el diagrama de flujo de actividades que se presenta a continuación, se presentan las actividades realizadas para el desarrollo de este proyecto en la planta de una empresa mexicana de componentes automotrices (figura 26).

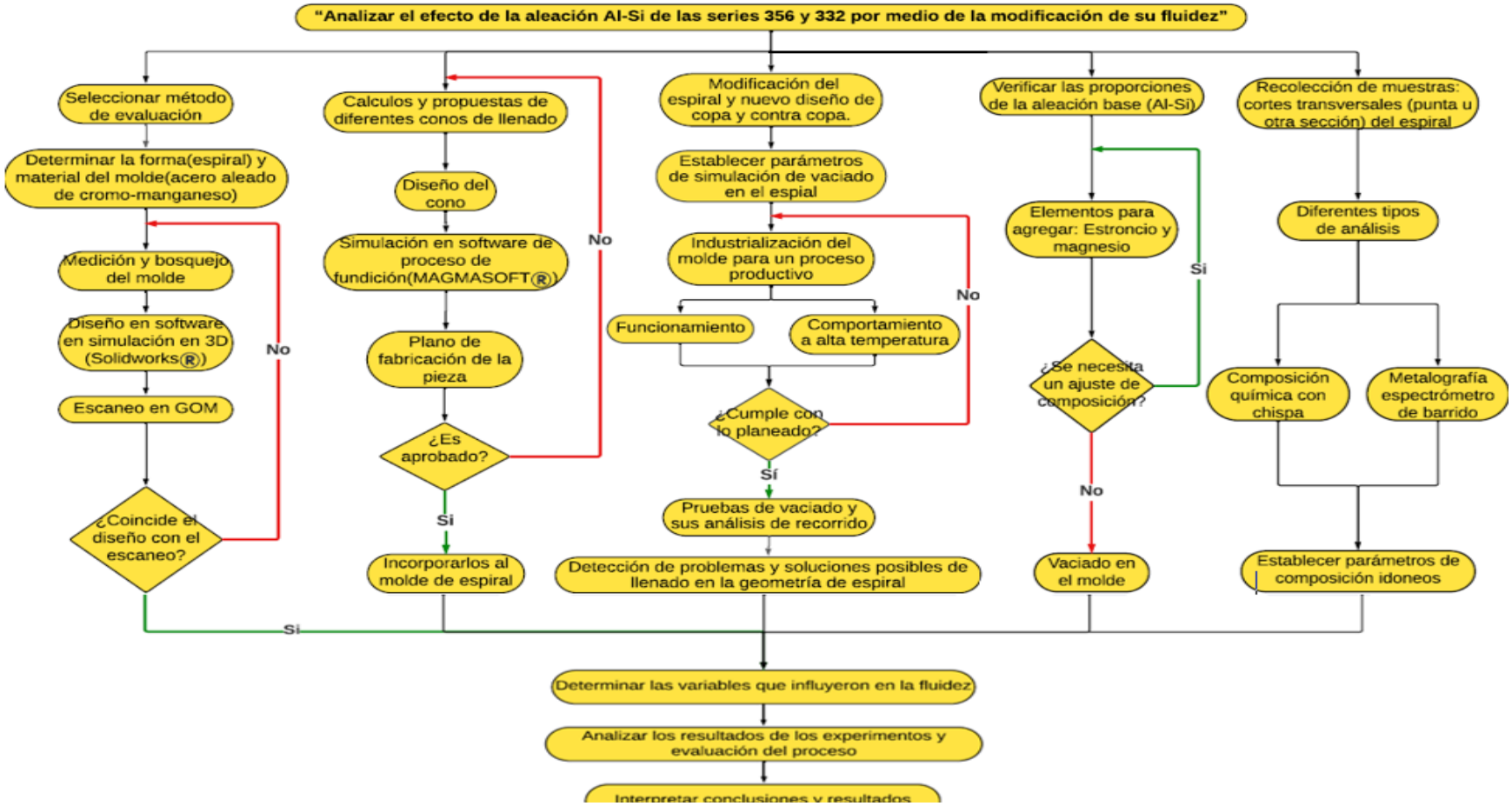


Figura 26: Diagrama de flujo de actividades actualizado

La descripción general del diagrama se describe a continuación:

- Seleccionar método de evaluación: Se indico el tipo de vaciado en el que se realizarían los estudios de fluidez en este caso fue el tipo es por gravedad.
- Determinar la forma(espiral) y material del molde (acero aleado de cromo - manganeso): Fue importante determinar las dimensiones que tenía la geometría en la cuál iba a recorrer el fluido y el material debido a prevenir futuros problemas de moldeo.
- Medición y bosquejo del molde: Se establecieron medidas del molde real y replicar un análisis dimensional preciso.
- Diseño en software en simulación en 3D (SolidWorks®): Se diseñó el molde con medidas semejantes para establecer planos de las cuales está conformado.
- Escaneo en GOM: Se comprobó el modelo mediante su escaneado y durante el diseño se ajustó al tamaño y entró en una escala de colores de su similitud, siendo verde el más cercano.
- Cálculos y propuestas de diferentes conos de llenado: Se realizaron los cálculos y diseños de los conos que permitieron conocer de que forma la aleación se iba a comportar mejor dentro de la cavidad, por su presión metalostática para ese tipo de molde.
- Diseño del cono: Una vez estableciendo el tamaño ideal para el vaciado, se hicieron los bocetos y modelo 3D permitiendo visualizar el diseño final.
- Simulación en software de proceso de fundición (MAGAMASOFT®): Se compararon los recorridos en un software de simulación de vaciado con los conos de diferentes diámetros de entrada y salida.
- Plano de fabricación de la pieza: El cono que presentó mayor recorrido de fluidez se mandó a fabricar a partir de las dimensiones calculadas y diseñadas.

- Incorporarlos al molde de espiral: Como el molde se encontraba solamente con el hueco de alimentación, la pieza fabricada se soldó sobre la superficie para que se adhiriera al molde.
- Modificación del espiral y nuevo diseño de copa y contra copa: Por cuestiones de manipulación y peso se tuvo que cambiar el cono por un sistema de alimentación más óptimo y parecido a los procesos de vaciado de producción.
- Establecer parámetros de simulación de vaciado en el espiral: Al establecer la temperatura del molde y del metal, se obtuvo información el software de acerca de cómo sería el trayecto de la aleación y sobre todo que mejoras se tenían que implementar para que la fluidez tuviese un mayor impacto.
- Industrialización del molde para un proceso productivo: La extracción de la pieza del molde conllevaba demasiado tiempo, por eso se hicieron bocetos, diseños y fabricación de una estructura para el molde; facilitando la interacción para un proceso de moldeo en serie.
- Funcionamiento: El ascenso y descenso de la tapa móvil del molde mediante un vástago de 2 pulgadas permitió el ingreso del quemador para su calentamiento además con la implementación del sistema de giro; el granallado y el pintado mostró una mejor aplicación y manipulación mejorando la calidad de la muestra y recorrido de fluidez.
- Comportamiento a alta temperatura: La respuesta ante fuerzas externas, internas y térmicas permitió obtener información de como resistía y de qué manera se tenía que utilizar para que no presentase fallas el proceso.
- Pruebas de vaciado y sus análisis de recorrido: La anticipación de la transferencia del líquido al molde en pruebas produjo información clave de las fugas y su desempeño de fundición.
- Detección de problemas y soluciones posibles de llenado en la geometría de espiral: Debido a la deformación y desajuste por fatiga, se tuvo implementar

un programa de mantenimiento, reparaciones y soluciones a los problemas de sellado o alineación.

- Verificar las proporciones de la aleación base (Al-Si): Al identificar los porcentajes que contiene la aleación en el proceso de desgasificado es fundamental debido a que deben de parecerse a sus estándares para que las pruebas resulten con una morfología favorable.

- Elementos para agregar (Estroncio y magnesio): Los principales modificadores irregulares en las probetas de chequeo de los elementos químicos eran el Sr y Mg, estos se añadieron en forma de varas eran máx. 3 cuando estaba por debajo el estroncio o 2 lingotes máx. de magnesio.

  Toda cantidad se ajustaba mediante a la escala establecida en producción.

- Vaciado en el molde: Una vez realizado el proceso de granallado, pintado, calentamiento, desgasificado, verificación de la composición química y el recalentamiento al molde, se procedía a vaciar la aleación en el sistema de alimentación del molde (copa y contra copa).

- Recolección de muestras (cortes transversales (punta u otra sección) de la espiral): Al completar cada parámetro se recolectaban todos los ejemplares; se separaba el recorrido de fluidez y la copa de alimentación hasta que quedará la “corcholata” siendo la principal parte donde se vertía el líquido en la cavidad del molde.

- Diferentes tipos de análisis: Se realizaban dos tipos de análisis primordiales que nos proporcionaban la fórmula química y morfología de los mejores recorridos registrados.

- Composición química con chispa: Este método se usa para determinar la composición de las aleaciones mediante la excitación de la muestra con una chispa eléctrica e inyección de argón. La energía generada permite que los átomos emitan luz en diferentes longitudes de onda y se identifican los elementos compuestos.

- Metalografía espectrómetro de barrido: Análisis de la microestructura de los metales utilizando un microscopio electrónico de barrido. Este método permite examinar la composición de la aleación con un haz de electrones.
- Establecer parámetros de composición idóneos: De todos los modelos se establecía la morfología del silicio eutéctico y los porcentajes de la aleación correspondiente.
- Determinar las variables que influyeron en la fluidez: Los factores principales que se detectaron en la prueba de fluidez fueron: la pintura, temperatura del metal y molde.
- Analizar los resultados de los experimento y evaluación del proceso: Mediante la recolección de cada parámetro (diferentes temperaturas, desgasificado y sin desgasificar) los recorridos permitieron determinar un porcentaje de eficacia, comparando cada uno y demostrar la influencia de las pruebas de fluidez de cada tipo de aleación: 332 y 356.
- Interpretar conclusiones y resultados: Todo registro de datos recopilados fueron plasmados en gráficas de superficie y lineales, su síntesis nos permitió presentar la efectividad e identificar nuevas variables que en la simulación no se presentó.

3. Resultados y discusión

3.1 Resultados

3.1.1 Preparación del herramental para pruebas de fluidez

El objetivo de este trabajo fue estudiar los efectos de las aleaciones 356 y 332 enfocados en pruebas de fluidez en un molde en espiral estándar disponible en la empresa mexicana de componentes automotrices, determinando en el fluido su composición química, sus impurezas y su temperatura.

Al controlar estas variables se analiza el recorrido del fluido, las propiedades de flujo y su capacidad de vertido. Para eso se usan softwares de diseño y simulación para predecir el comportamiento del metal líquido.

3.1.1.1 Descripción de las condiciones que se encuentra el molde de espiral

Se visualiza ambas tapas del molde en espiral (figura 27) con el que se trabajará este documento para su diseño y pruebas en simulación de softwares como SolidWorks® y Magmasoft®.

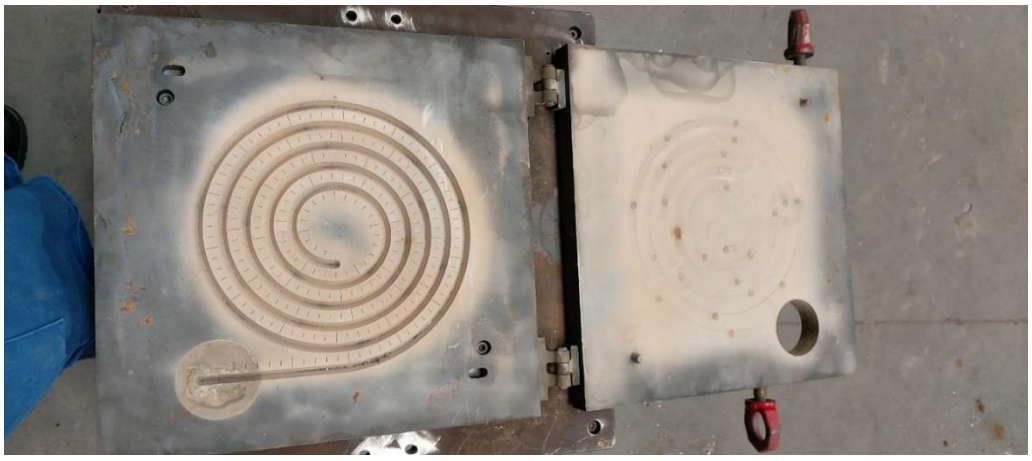


Figura 27: Molde de espiral de tapa superior e inferior

El sistema de calentamiento hidráulico del molde se conforma de tubos insertados y roscados (figura 28) donde pasa el aceite a través de mangueras enroscadas entre estos para su conducción.



Figura 28: Tubos para aumentar la temperatura del molde con un calentador externo de aceite

La apertura del molde está conformada de dos bisagras de tipo mariposa de acero (figura 29).



Figura 29: Bisagras para la apertura de ambas tapas del molde

3.1.1.2 Ubicación de las ventilas

Huecos de ventilación internos del molde con diámetros de 7.90 mm, ubicados en la tapa superior del molde; están separados a una distancia de 12 cm para permitir el avance de la aleación dentro del molde, pero pueden producir defectos como: porosidad, oxidación, escoria, etc. El hueco principal para el cono del llenado del molde tiene un diámetro de 7 cm (figura 30).



Figura 30: Parte exterior de la tapa superior del molde, se visualiza el hueco de vaciado al molde y los 24 huecos de las ventilas

3.1.2 Modelado y dimensiones en 3D del molde

Se hizo el diseño del molde de prueba de espiral a partir del objeto real fabricado, presentar el cono de alimentación y su estructura completa exterior e interior del modelo mostrándolo con una vista isométrica (figura 31) del diseño en 3D.

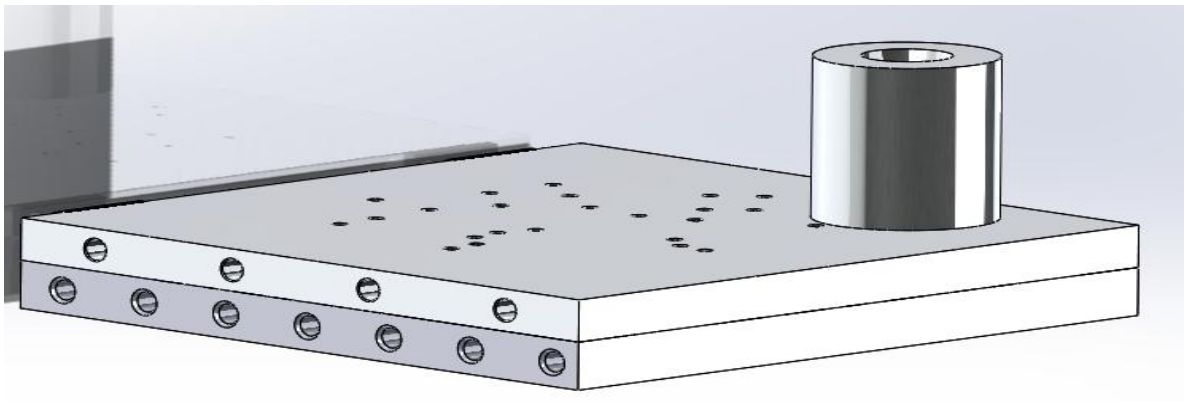


Figura 31: Vista isométrica del diseño 3D en el software Solidworks del molde en espiral

Vista trasera del molde en espiral (figura 32), se presenta la parte como visible para mostrar los tubos de calentamiento que pasan a través del molde, además partimos de una parte fundamental para determinar su apertura, el sistema de ventilas y calentamiento que ayudaran a la preparación del molde para un proceso de vertido.

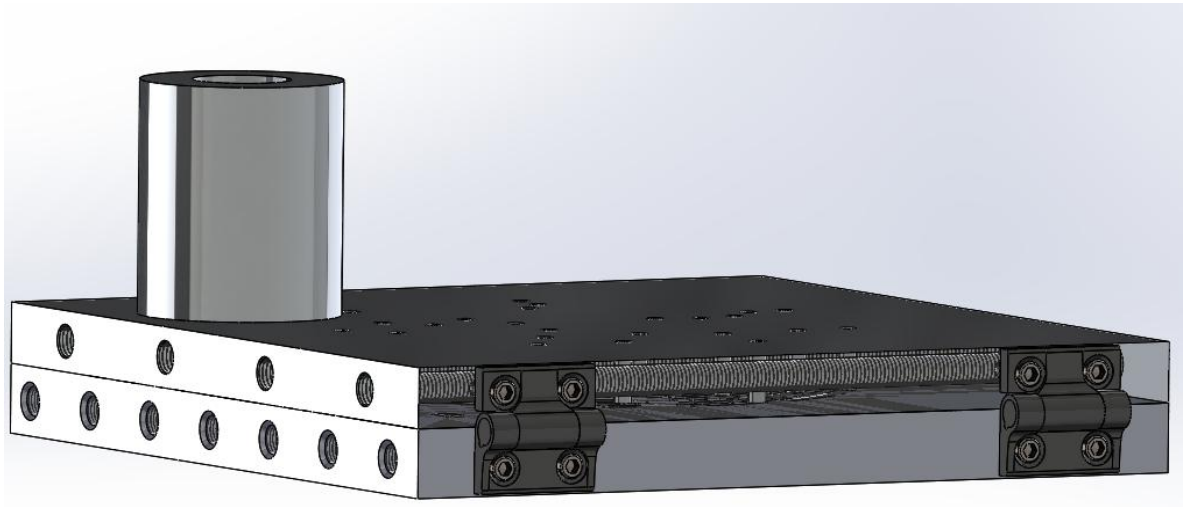


Figura 32: Vista trasera del diseño 3D en el software Solidworks del molde en espiral

Vista explosionada del molde de espiral (Figura 33) que indica cada una de las partes por la cual está conformado.

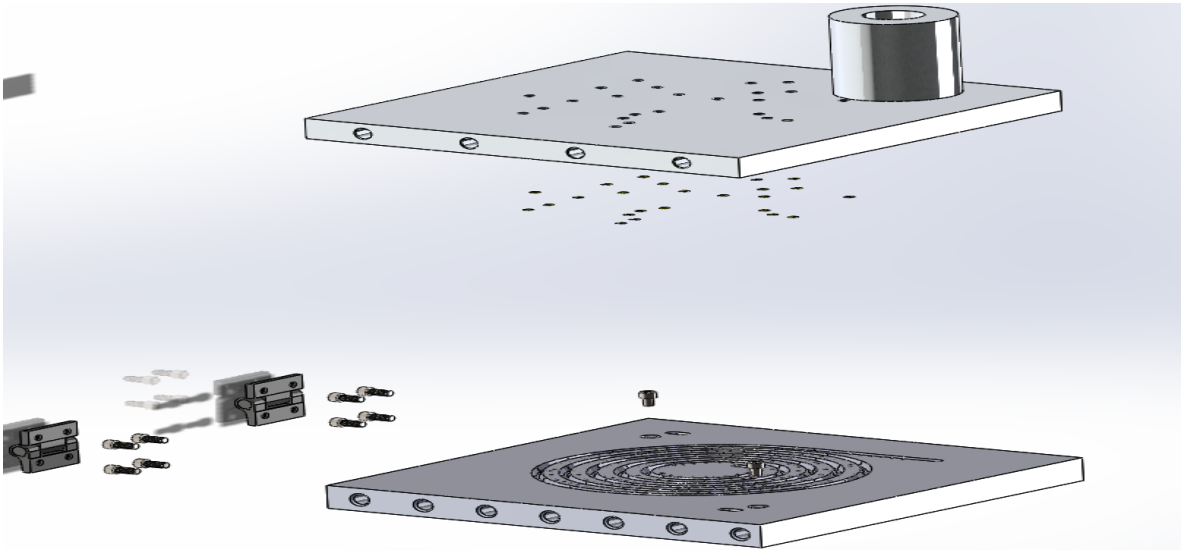


Figura 33:Vista explosionada del diseño 3D en el software Solidworks del molde en espiral

En la vista superior de la tapa inferior del molde, el espiral tiene una longitud de arco de 287.1251cm, conformado de 5 vueltas; los indicadores de la trayectoria están establecidos alrededor del espiral cada una de las marcas se encuentran separadas a 1 cm que permiten indicar la longitud del recorrido del fluido (figura 34).

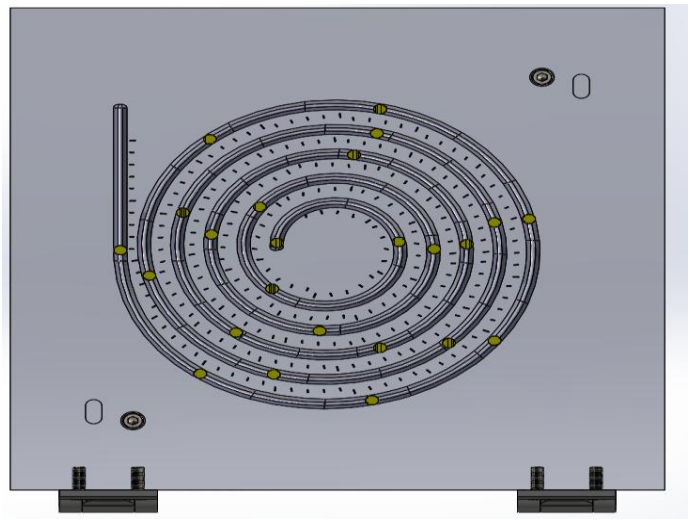


Figura 34: Vista superior de la tapa inferior del molde en espiral

3.1.3 Preparación del molde

3.1.3.1Granallado

Se hizo uso de una máquina granalladora de hielo seco Alpheus (figura 35) que produce la limpieza del residuo del molde.



Figura 35: Máquina granalladora de hielo seco

El funcionamiento de la maquinaria consiste en ingresar bloques de hielo seco dentro de la tolva (figura 36) convirtiéndolos en gránulos (granizo) y se expulsa con aire comprimido produciendo un efecto abrasivo contra la superficie del molde.



Figura 36: Hielo seco en bloques

Al impactar en el molde, el sólido se convierte en gas y como no es abrasivo se produce una transferencia de calor instantánea que hace la remoción de los contaminantes y produciendo la eliminación de algunas inclusiones(óxidos) del molde (figura 37) su ventaja frente a otro método de limpieza es que este reduce el desgaste del molde y disminuye la frecuencia de mantenimiento.



Figura 37:Granallado del molde

El color negro que se ve en el molde es del material del que está hecho en este caso es un acero al carbón (figura 38).



Figura 38:Resultado del granallado en el molde de espiral

3.1.4 Plano del molde

El plano de vista explosionada del molde en espiral junto con el cono propuesto se presenta en la figura 39. Aquí se presenta cada una de las partes de la que está conformado el molde, su función de abertura, calentamiento, ventilación y llenado del molde.

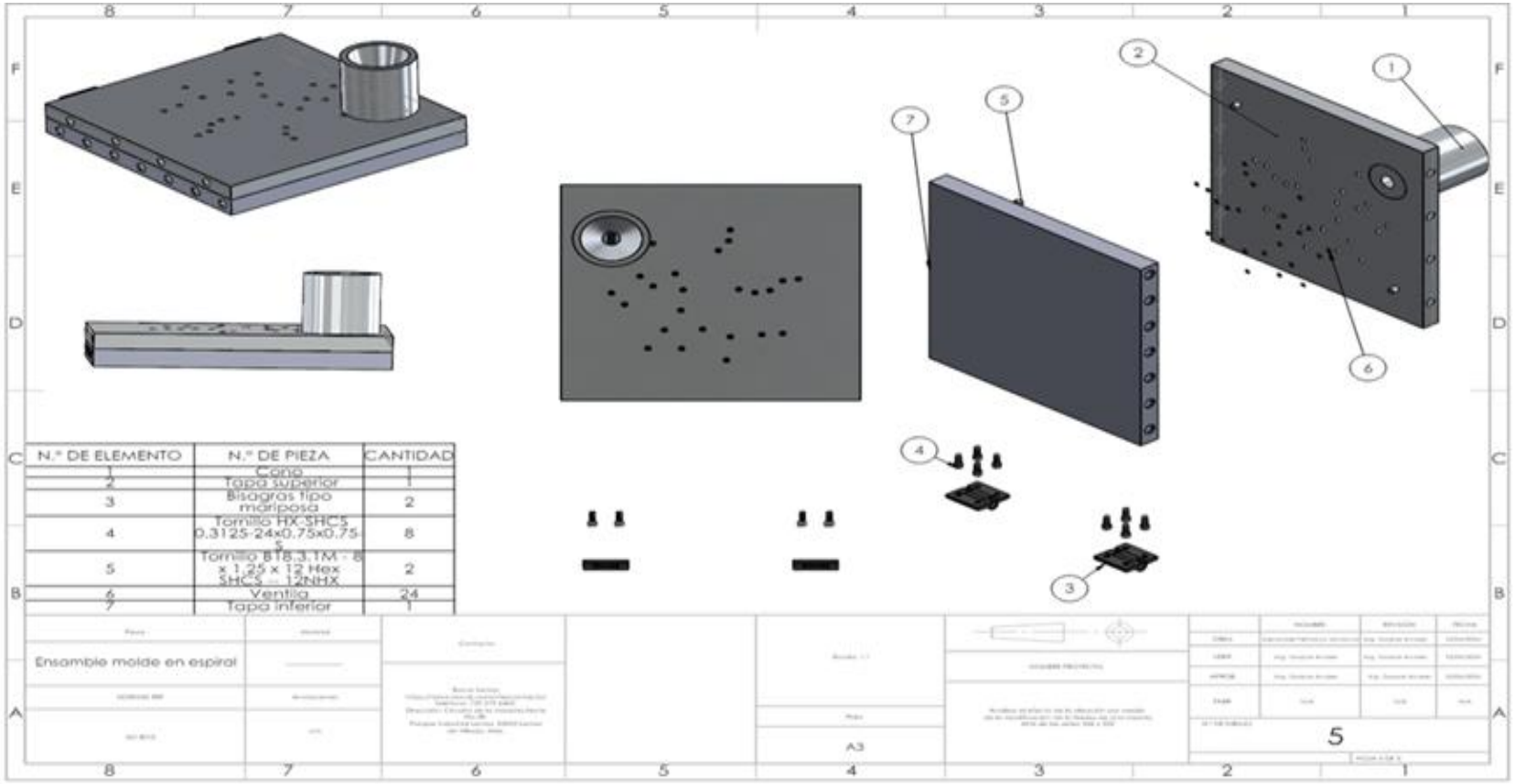


Figura 39: Ensamble del molde en espiral

3.1.5 Escaneo GOM

GOM (por sus siglas en alemán Gesellschaft für Optische Messtechnik, que significa Sociedad para la Metrología Óptica) es un laboratorio especializado encargado de la metrología óptica, escaneo 3D y análisis dimensional de moldes (Figura 40). Se realizó un análisis GOM para comprobar que el molde cumpla con las dimensiones de $\pm 2\,\mathrm{mm}$. de tolerancia con el molde real (color verde). Se validan los planos con el escaneo en 3D y metrología.

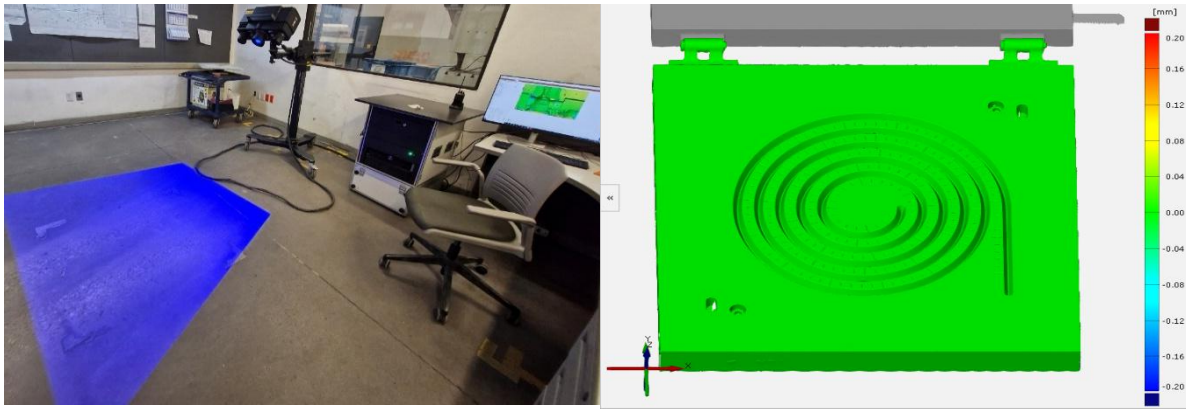


Figura 40: Laboratorio GOM y escala de metrología métrica y ótica de tolerancia de 2mm por el color verde

El archivo que se genera después del escaneo es. STL, abriéndolo en un programa de diseño se visualiza como gráfico (figuras 41,42 y 43) o mallas.

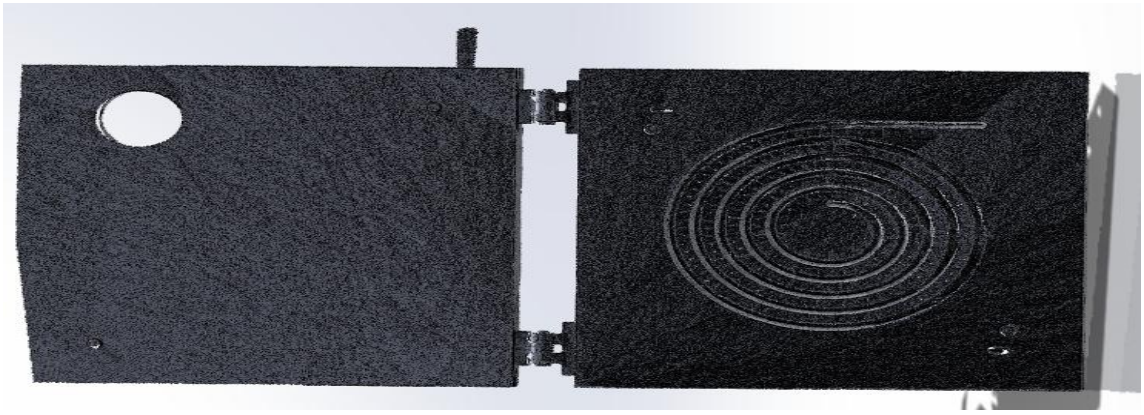


Figura 41:Molde en espiral, ambas tapas vistas desde adentro. Fuente: Catalogo de imágenes laboratorio GOM- Empresa mexicana de componentes automotrices

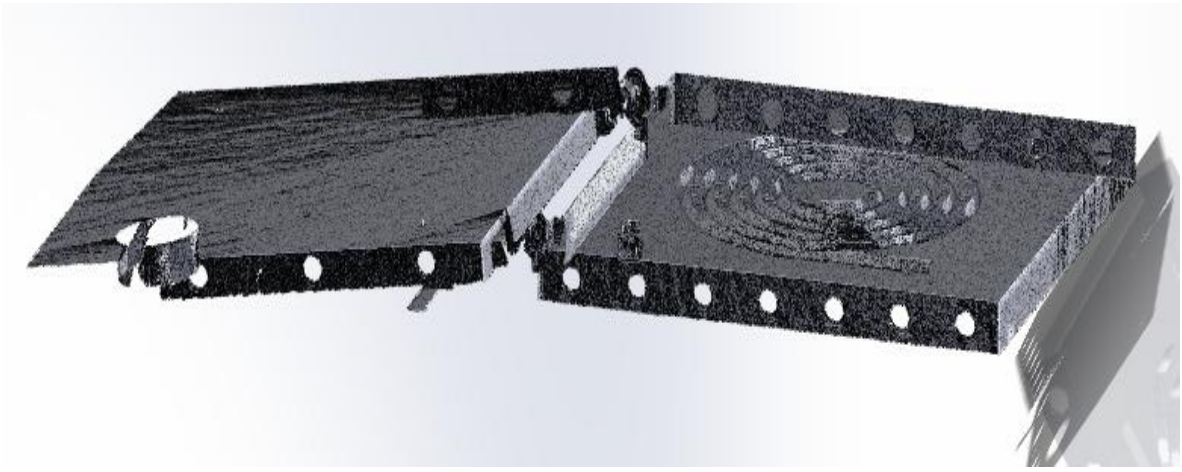


Figura 42:Molde en espiral, ambas tapas vistas desde adentro. Fuente: Catalogo de imágenes laboratorio GOM- Empresa mexicana de componentes automotrices

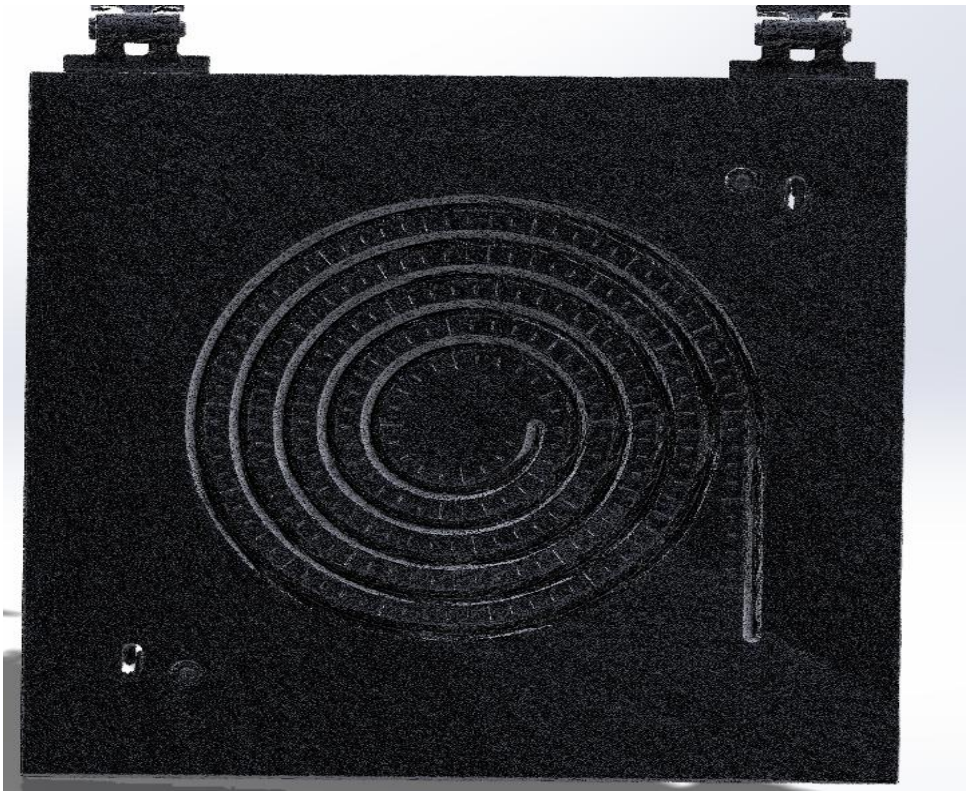


Figura 43:Detalle del espiral. Fuente: Catalogo de imágenes laboratorio GOM- Empresa mexicana de componentes automotrices

La malla 3D es un modelo en el que reconstruyen de manera precisa las entidades del molde, estableciendo o especificando diferentes tamaños de elementos de caras, aristas o vértices (la figura 44 y figura 45).

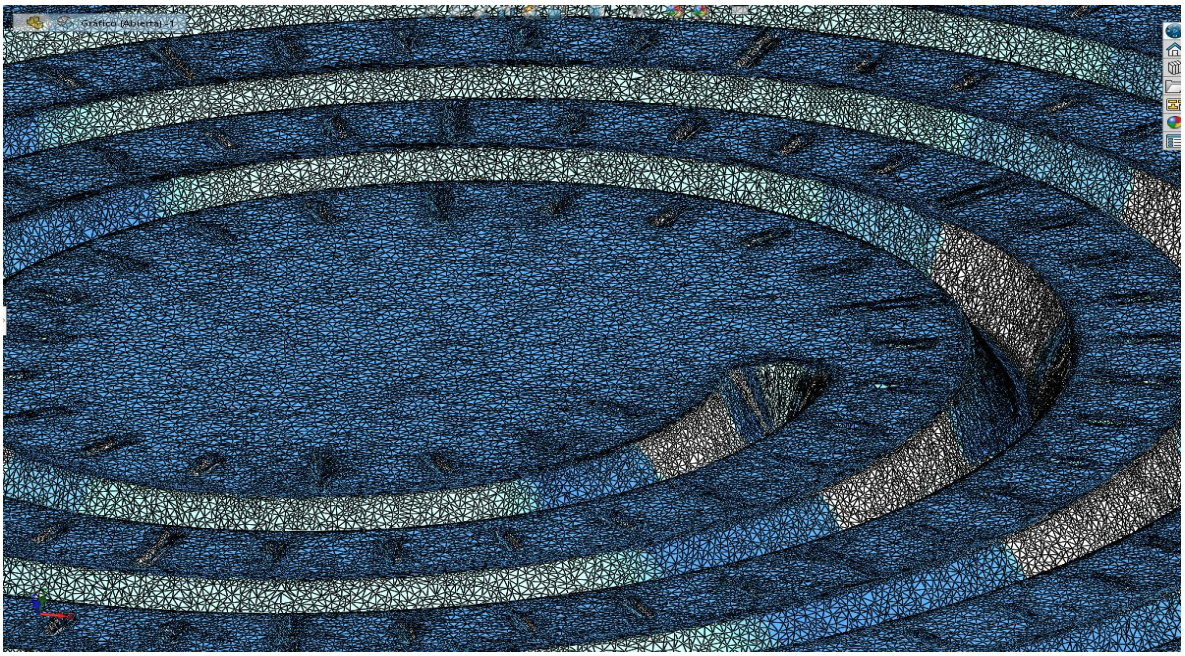


Figura 44: Vista general del espiral con mallas

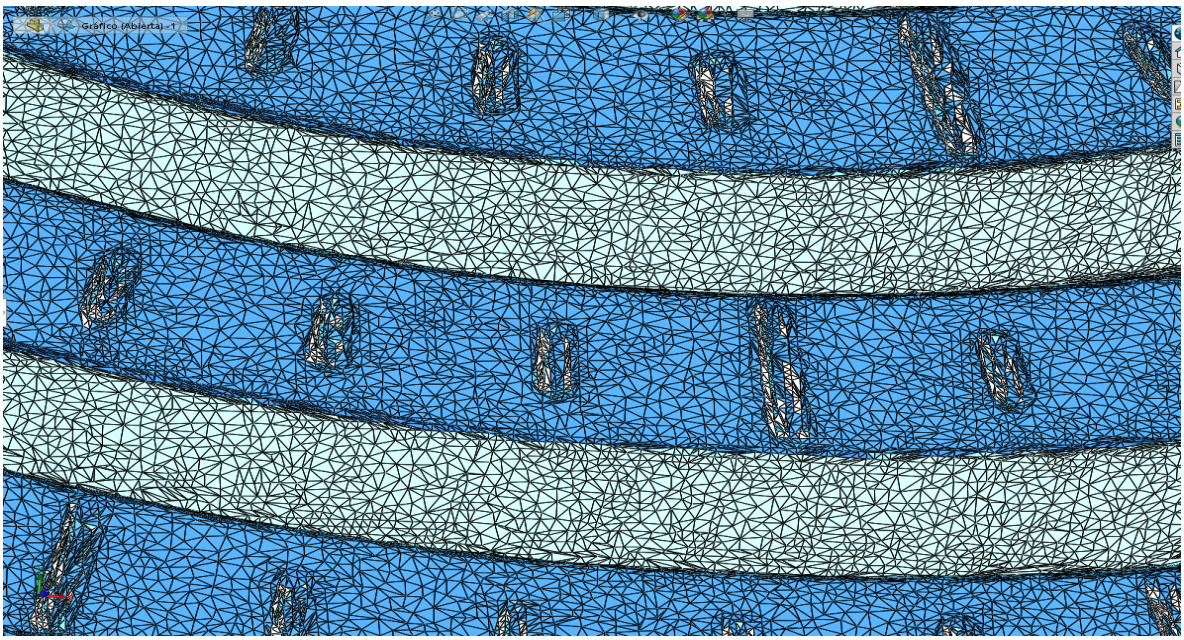


Figura 45: Las caras planas se presentan como un azul celeste, el perfil con un azul turquesa y como está conformado de mallas las aristas y vértices de color negro que integran a la pieza

3.1.6 Diseño primario del cono de llenado

El instituto de metales fundidos de la sociedad americana de fundidores, señalan lo siguiente:

Se debe utilizar un bebedero cónico con la pequeña zona hacia abajo para eliminar la aspiración de aire y gases del molde.

El área mínima de la parte superior del bebedero será función de la altura del cono/bebedero y podrá calcularse según la siguiente fórmula:

$$A_T = A_B\sqrt{\frac{h_1}{b}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

Donde:

$$A_T = \text{área de la parte superior del cono}$$

$$A_B = \text{Área del fondo del cono}$$

$$h_1 = \text{Longitud del cono}$$

$$b = \text{Profundidad del metal para deposito en el canal}$$

La relación que indica la ecuación (1) se ilustra en la figura 46: En la práctica, es deseable utilizar un área superior ligeramente mayor que la calculada para asegurar una presión positiva sobre las paredes del cono.

El área del fondo del espolón debe servir como estrangulador, es decir, debe ser el área de sección transversal más pequeña del sistema. El tamaño del fondo del grifo estará determinado por el caudal deseado.

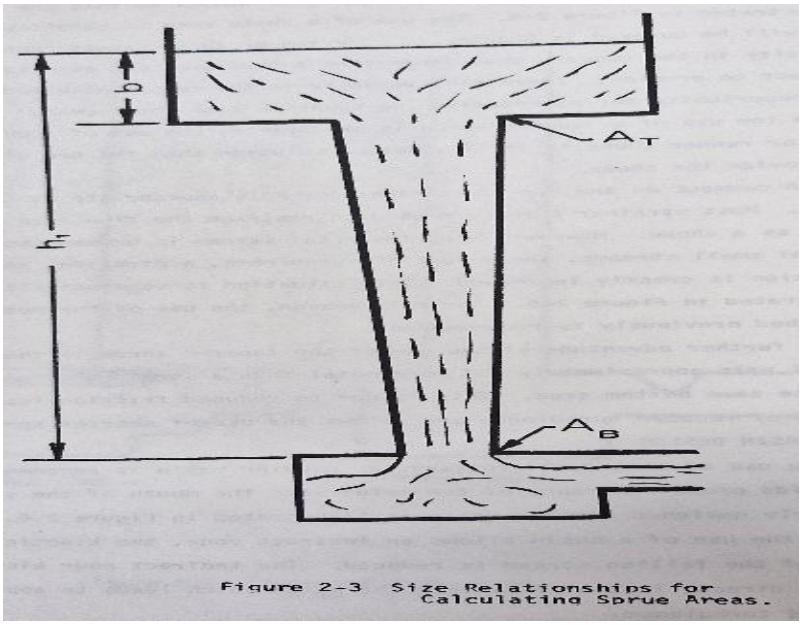


Figura 46: Relación del tamaño para el cálculo de las áreas del cono/bebedero

Se procedió a hacer cálculos de tres diferentes diámetros de conos de áreas de la parte superior del bebedero para realizar diferentes simulaciones en el software de simulación Magmasoft® y hacer una elección de cuál cono de alimentación nos da un mejor recorrido en la prueba de fluidez y poder fabricarlo:

3.1.6.1 a) Cono de 4.1 mm de fondo (coincidente con el canal actual del molde)

Utilizando la ecuación 1 para calcular el área superior del bebedero:

Se sustituye la ecuación (2) en la ecuación 1 para establecer el área de la circunferencia de la parte superior del cono/bebedero:

$$A_B = r^2\pi \ldots\ldots\ldots\

Como se sabe de qué medida es el canal 8.2 mm, se sustituye el radio del área del fondo debido a que tiene que ser coincidente a la entrada de llenado del molde.

$$\mathrm{A_B} = (4.1)^2\pi$$

$$\mathrm{A_B} = 52.81\mathrm{mm}$$

La altura ($\mathrm{h_1}$) debe de ser el doble de la ranura hecha en el molde de 7 cm tomando en cuenta el volumen que ejerce el fluido y su presión metalostática en este.

$$h_1 = 140mm$$

Se sustituyen los valores calculados en este caso b (Profundidad del metal para deposito en el canal) tomará el valor de 1, ya que se necesita una mayor presión y no se necesita la forma de copa en el cono.

$$A_T = 52.81\sqrt{\frac{140}{1}}$$

$$A_T = 624.85mm$$

Como:

$$A_T = r^2\pi \ldots\ldots\ldots\

Se repite el mismo procedimiento para el cálculo de los otros conos.

3.1.6.2 b) Cono de 12.1 mm de fondo (propuesta de abertura del cono).

Área superior del bebedero:

$$A_T = A_B\sqrt{\frac{h_1}{b}}$$

Área de la circunferencia de la parte superior del cono/bebedero:

$$A_B = r^2\pi$$

$$A_B = (12.1)^2\pi$$

$$A_B = 459.96mm$$

Establecer Altura:

$$h_1 = 140\text{mm}$$

Sustituir valores:

$$A_T = 459.96\sqrt{\frac{140}{1}}$$

$$A_T = 5442.32mm$$

Despejar el radio y definir la medida que debe de tener:

$$A_T = r^2\pi$$

$$r = \sqrt{\frac{A_T}{\pi}} = \sqrt{\frac{5442.32}{\pi}} = 41.62mm$$

3.1.7 Plano del cono de llenado utilizado y fabricado

El plano de cono de R12.1 mm de fondo modificando a un área superior ligeramente mayor que la calculada (8.32 cm) se muestra en la figura 47.

Cono de Ø2.42cm con medidas establecidas respecto a los cálculos (Ø8.32 cm), en la simulación representó una distancia del fluido recorrido en el molde (cm) de:59 cm, temperatura de la aleación 356 (°C) de: 710 y un tiempo de vertido (cm/s): 2.075.

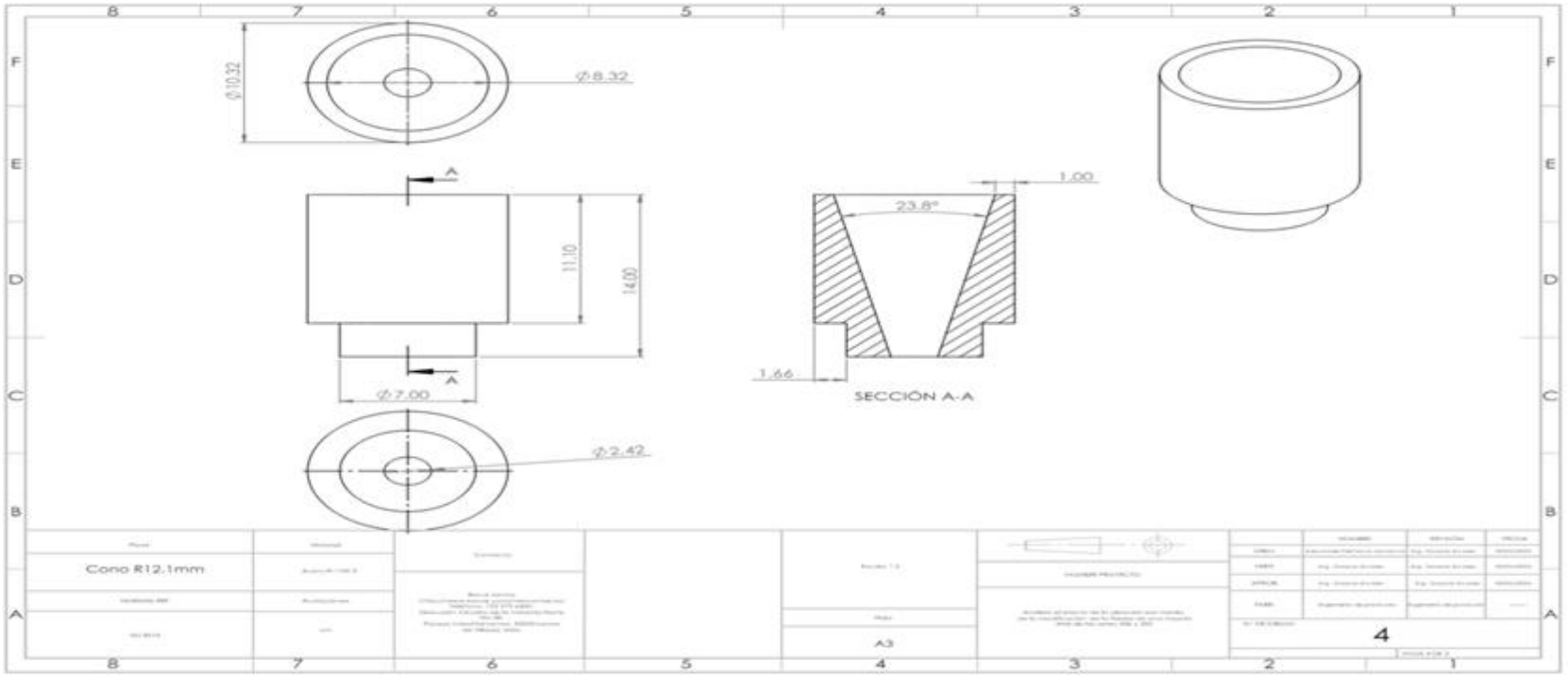
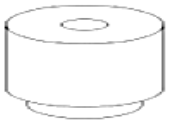
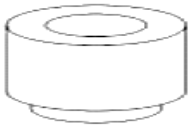
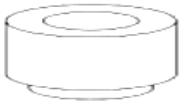
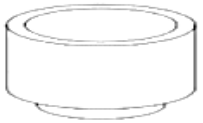


Figura 47: Plano de cono de fondo de 2.42mm con abertura superior de 8.32 cm

En la tabla 4 se muestran los diferentes diámetros de conos junto su simulación de vaciado en el software para demostrar que distancia presentaba un recorrido mayor del fluido al momento de vaciarlo dentro del molde.

Tabla 4: Simulación y resultados de distancias del fluido en el molde con diferentes conos diseñado

Medida de Cono	Dibujo del cono	Distancia del fluido recorrido en el molde (cm)	Temperatura de la aleación 356 (°C)	Tiempo de vertido (cm/s)
Cono de Ø0.82 cm con medidas establecidas respecto a los cálculos (Ø2.82 cm).		40 cm	710	5.104
Cono de Ø0.82 cm de fondo modificando a un área superior ligeramente mayor que la calculada (Ø5.40 cm).		44 cm	710	3.41
Cono Ø0.82 cm de fondo modificando a un área superior ligeramente mayor que la calculada (Ø8.32 cm).		45 cm	710	1.572
Cono de Ø1.6 cm con medidas establecidas respecto a los cálculos (Ø5.40 cm).		46 cm	710	3.074
Cono de Ø2.4cm con medidas establecidas respecto a los cálculos (Ø8.32 cm).		59 cm	710	2.075

La Figura 48 muestra el recorrido de fluidez en cm contra diámetro de fondo y diámetro superior de diferentes conos calculados para vaciar en el molde de espiral.

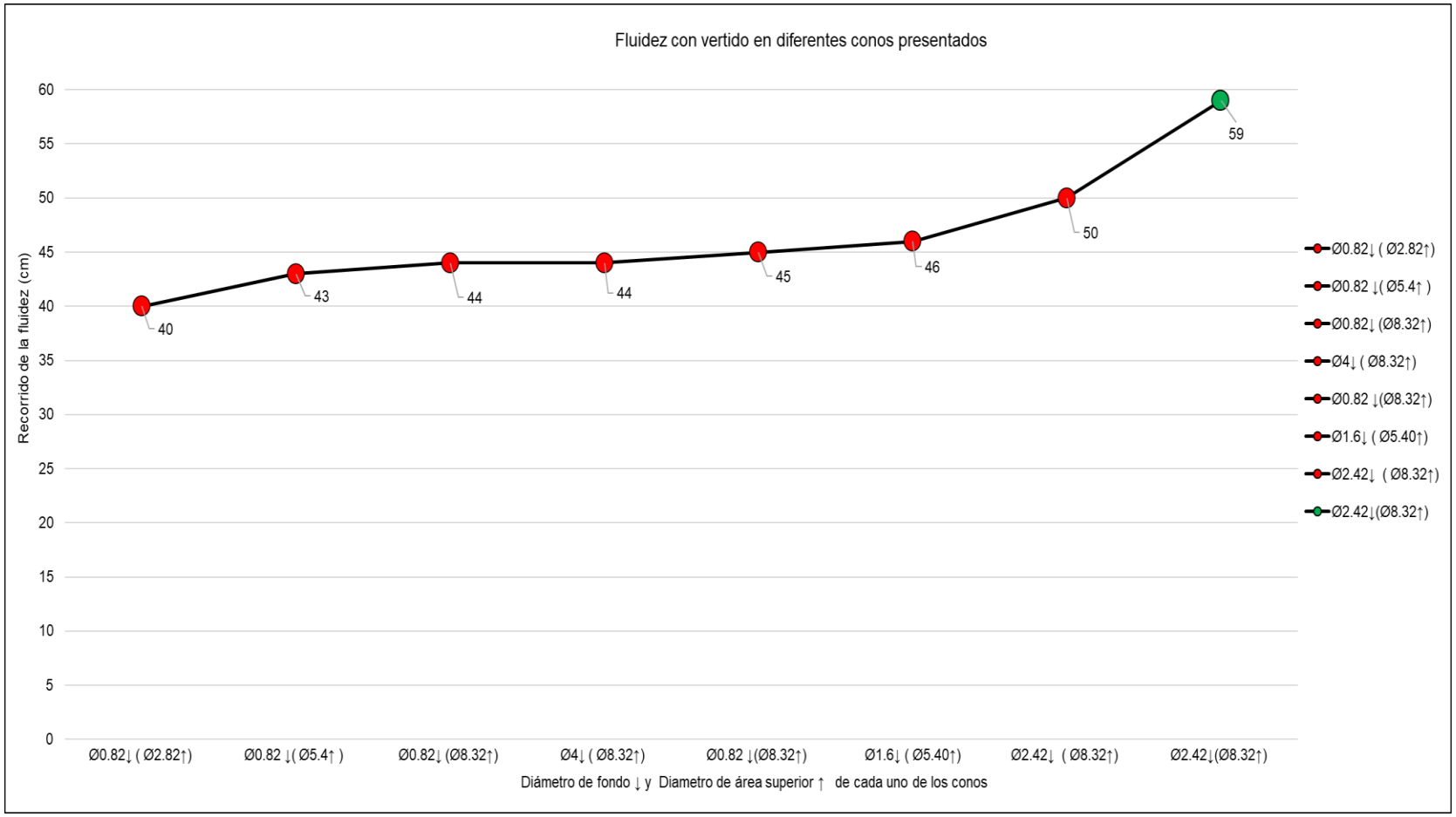


Figura 48: Gráfico de líneas que demuestra el recorrido de fluidez(cm) contra diámetro de fondo y diámetro superior de diferentes conos calculados

3.1.8 Simulaciones

Software utilizado es Magmasoft® (figura 49), es un software de simulación en procesos de fundición.



Figura 49: Interfaz del programa Magmasoft®

3.1.8.1 1er Prueba canal del molde con forma media circular

El diseño del canal del molde se modificó por un radio de 8.2 mm con una forma/figura medio circular (figura 50) se sugirió este tipo de geometría para el molde debido a que se quería buscar cómo se comporta el fluido en las simulaciones en este canal y porque se debe de respetar a la que está fabrica.

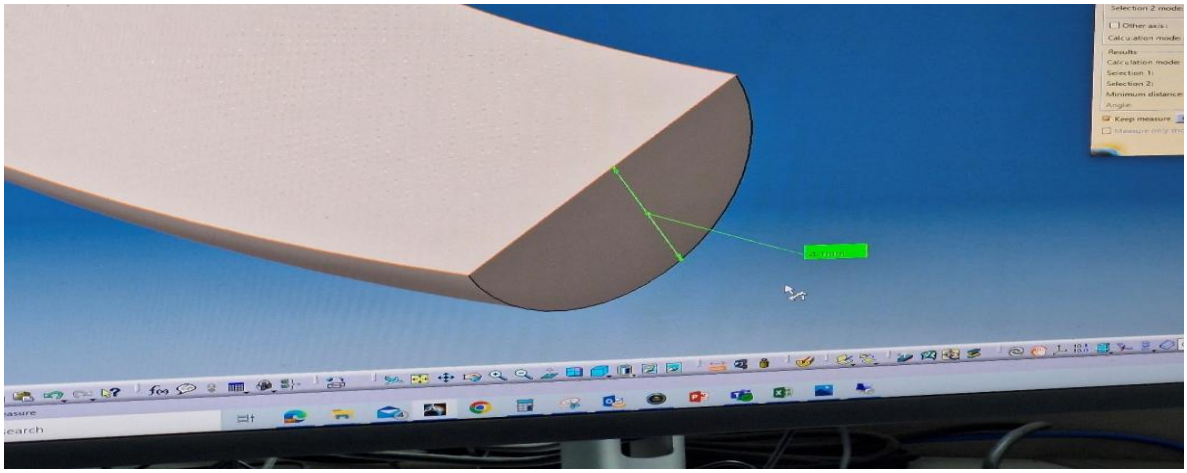


Figura 50: Canal medio circular en el perfil del molde en espiral

En el programa se establecen los parámetros de la aleación 356 (figura 51), temperatura del molde (350°C) y fluido (720°C).

Initial Temperature (°C)	Aluminum Composition		
720.0	Cr (Chromium)	0.0	%
	Cu (Copper)	0.03	%
	Fe (Iron)	0.5	%
	H (Hydrogen)	0.0	ml/100g
	Mg (Magnesium)	0.4	%
	Mn (Manganese)	0.3	%
	Na (Sodium)	0.0	%
	Ni (Nickel)	0.1	%
	P (Phosphorus)	0.0	%
	Sb (Antimony)	0.0	%
	Si (Silicon)	7.0	%
	Sr (Strontium)	0.0	%
	Ti (Titanium)	0.15	%
	Zn (Zinc)	0.1	%
Initial Temperature (°C)			
350.0			

Figura 51: Parámetros de aleación, temperatura del fluido y molde

En la primera simulación se observa el fluido en una vista superior del molde en espiral obteniendo un recorrido de 37 cm en un vaciado de 1.340 segundos (figura 52), el 63.50% corresponde al volumen que se ingresó dentro del cono y espiral utilizando un cono de 4.1mm con 54mm de área superior del bebedero.

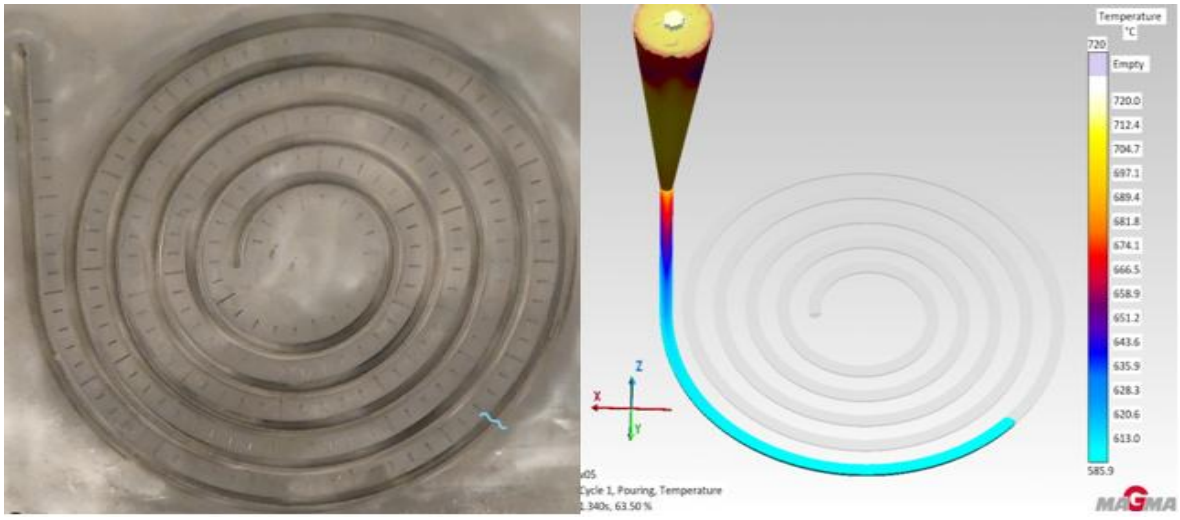


Figura 52: 1er Prueba del canal medio circular, a una temperatura de 720°C en un vaciado de 1.340 segundos y como obtención un recorrido de 37 cm en el molde de espiral.

3.1.8.2 2da Prueba con el espiral con su perfil en el espiral

Para determinar el canal del molde fue necesario hacer uso de un material que fuera moldeable: plastilina (figura 53) para establecer las medidas concretas del espiral con el apoyo de un vernier para su verificación.



Figura 53: Plastilina dentro del canal para tomar la forma y poder medirla

Las medidas con las que el canal fue diseñado y fabricado son de 8.2 mm de ancho, 7.5 mm de altura y un radio de 1.5 mm (figura 54) que posteriormente se llevaron a diseño.

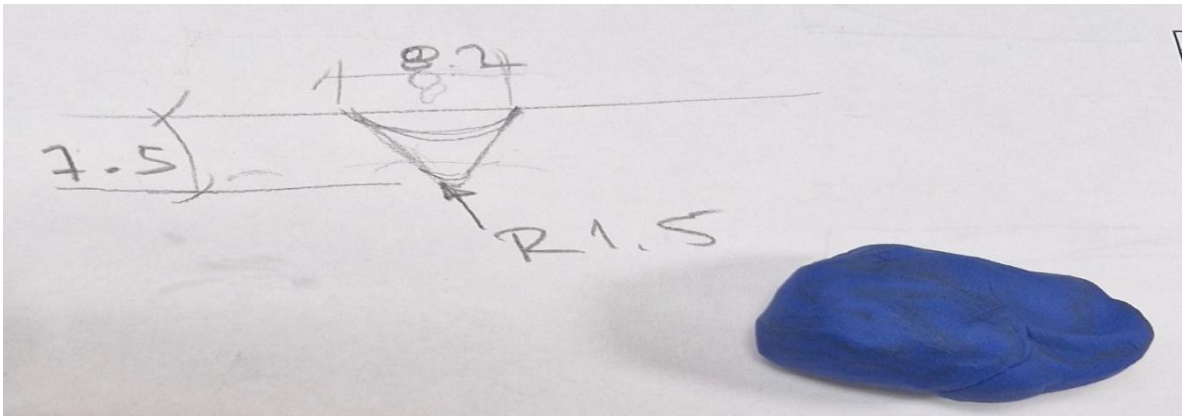


Figura 54: Medidas actuales del canal

Se hizo la modificación con las medidas del canal tomadas del molde en el diseño 3D, como resultado dio el área del espiral (figura 55), conformándose de un área de 37.86mm^2.

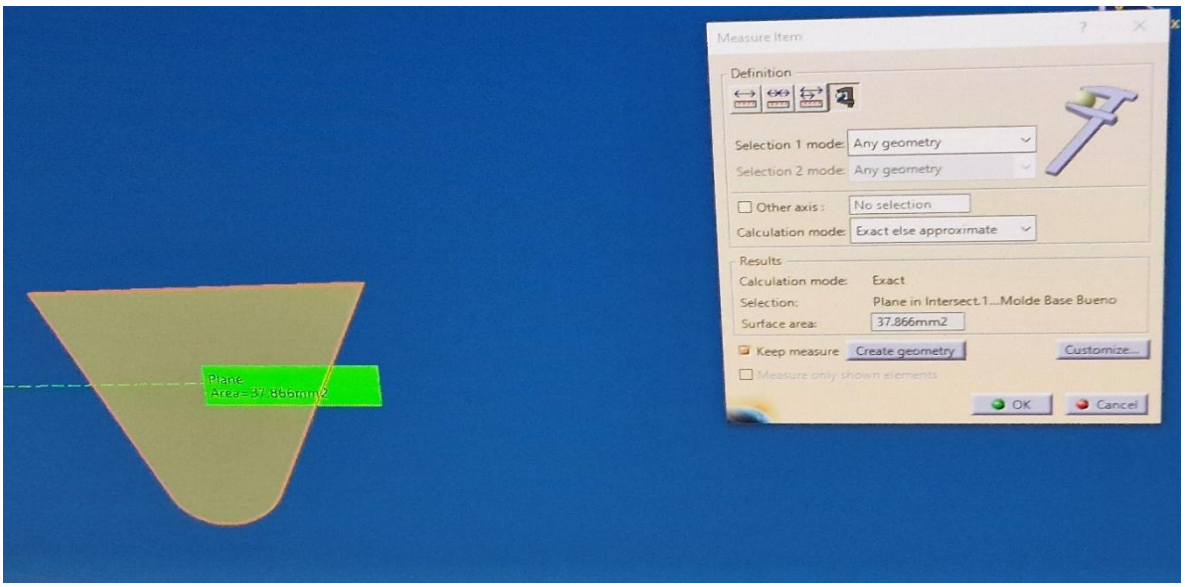


Figura 55: Área del nuevo perfil del molde en espiral

El espiral cambia de una forma medio circular a una forma con forma de "v" (figura 56).

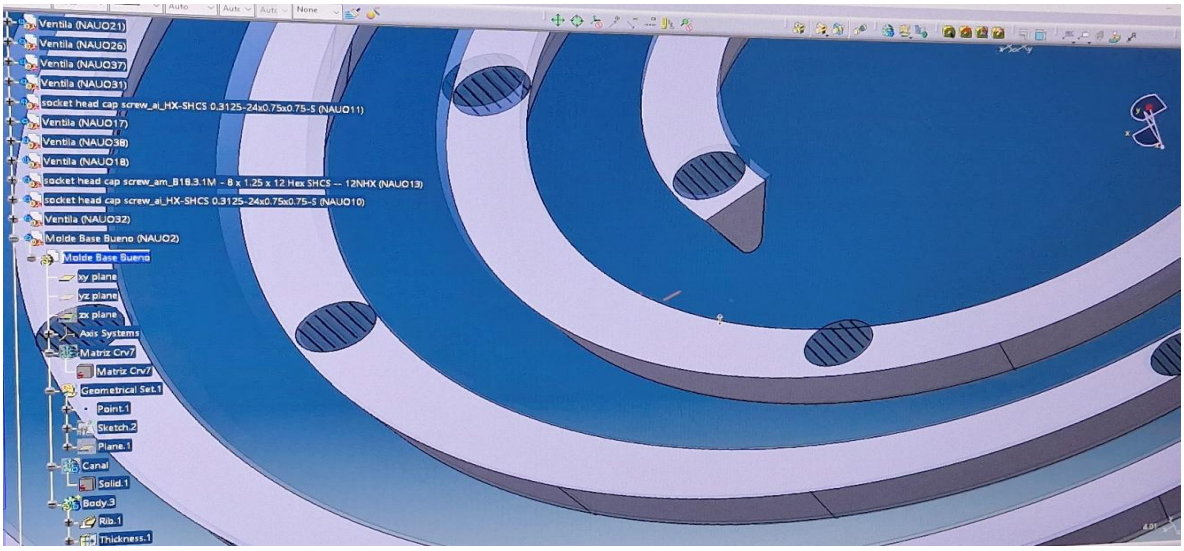


Figura 56: El trayecto cambia a una forma de "v" a lo largo de todo el espiral

En la gráfica (figura 57) se aprecia cómo se comporta la temperatura del fluido (línea azul marino), teniendo como limites la línea roja que indica la temperatura máxima del material, la línea amarilla cuando el líquido empieza a presentar sobrecalentamientos para pasar a una fase líquida a sólida (línea azul celeste).

La línea negra nos indica que el fluido se detendrá en un determinado tiempo correspondiente al flujo volumétrico total de la entrada, después se presenta un proceso de enfriamiento correspondiente a la solidificación.

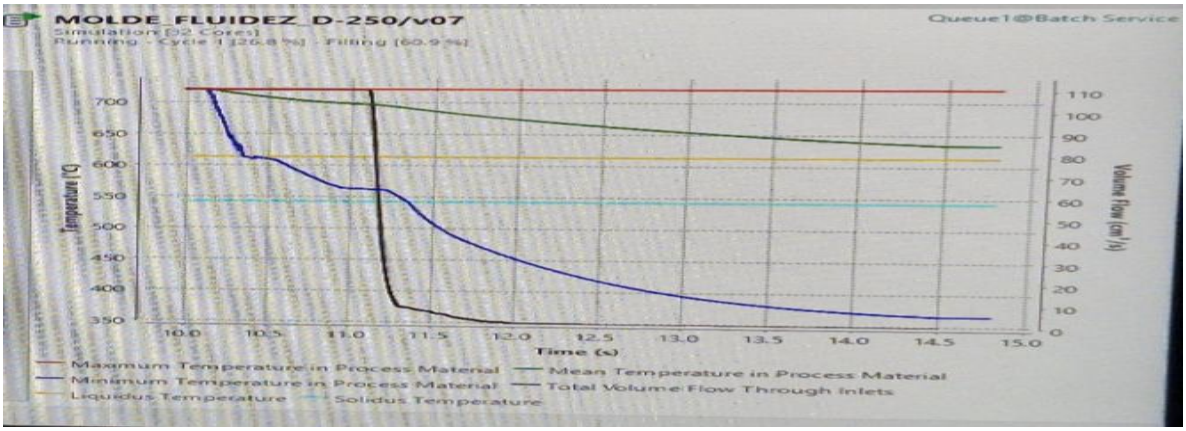


Figura 57: Interpretación gráfica generada del software Magmasoft® del proceso de vertido del fluido en el molde

En la segunda simulación se observa el fluido en una vista superior del molde en espiral obteniendo un recorrido de 43 cm en un vaciado de 1.572 segundos (figura 58), el 58% corresponde al volumen que se ingresó dentro del cono y espiral utilizando un cono de 4.1mm con 54mm de área superior del bebedero.

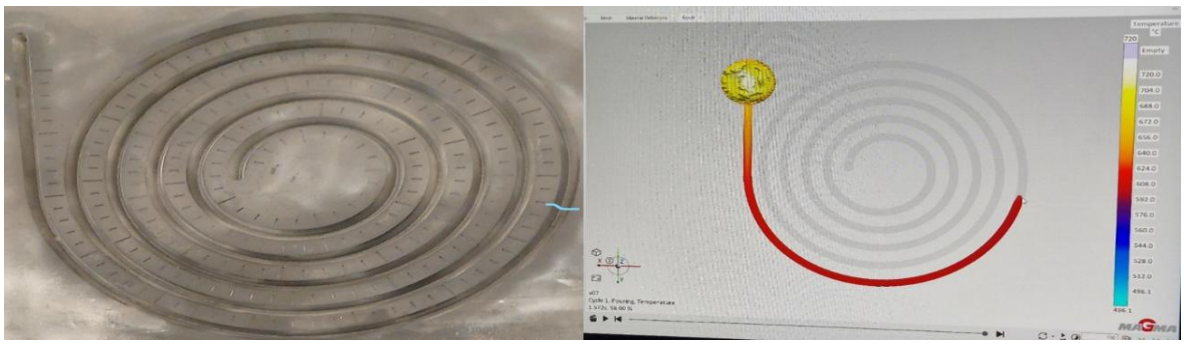


Figura 58: 2da Prueba del canal con forma de "v", a una temperatura de 720°C en un vaciado de 1.572 segundos y como obtención un recorrido de 43 cm en el molde de espiral

Se simuló el cono de 41mm cambiando el tamaño del área superior del bebedero a 83.22mm (figura 59).

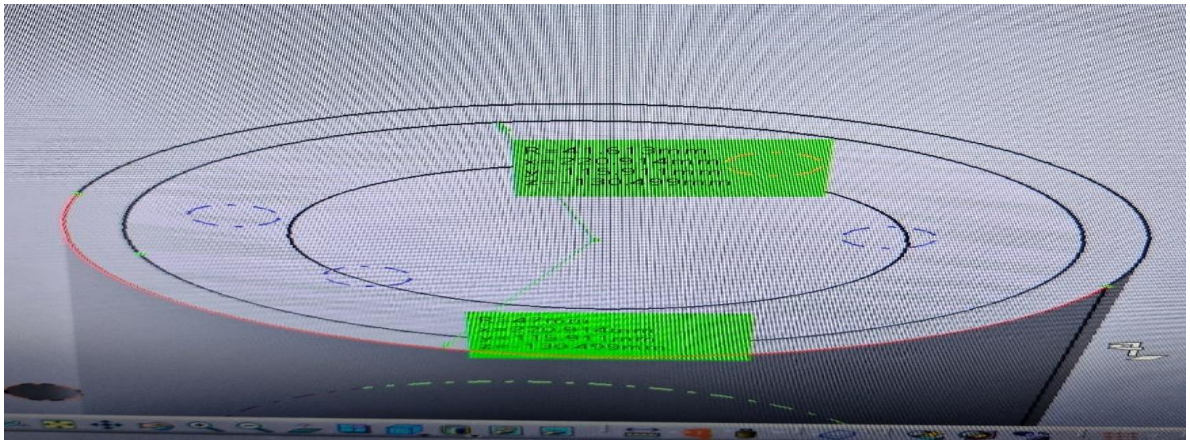


Figura 59: Nueva medida de cono de llenado de 83.22mm para el molde de espiral

Cuando se sobrecalienta la aleación (figura 60) esta tiende a disminuir su ductilidad, por lo tanto, el flujo es menos resistente. Los canales curvos y estrechos del molde en espiral hacen que al tener una menor ductilidad facilite la capacidad de llenado.

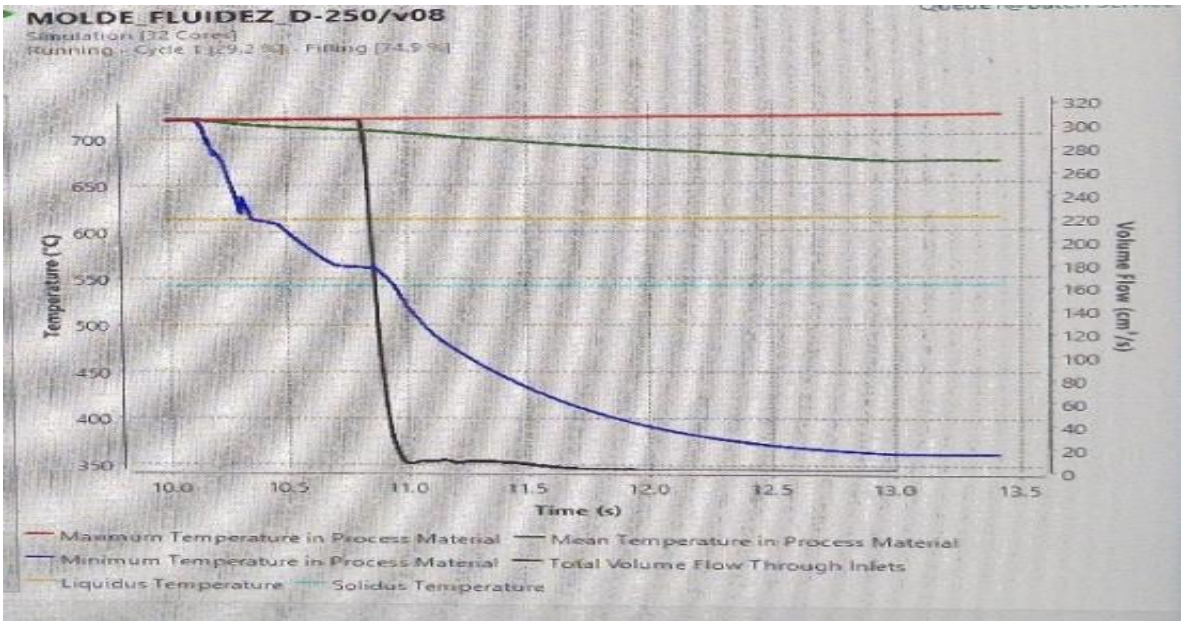


Figura 60: Comportamiento del fluido (Sobrecalentamientos que mejoran la ductilidad)

3.1.8.3 3er Prueba con el espiral

En la tercera prueba de simulación se agrandó el diámetro del cono a 8.32 cm y se observa el fluido en una vista superior del molde en espiral obteniendo un recorrido de 44 cm en un vaciado de 1.639 segundos (figura 61), el 71.50% corresponde al volumen que se ingresó dentro del cono y espiral utilizando un cono de 4.1mm con 83.22 mm de aumentar solamente el área superior del cono se obtuvo el anterior resultado.

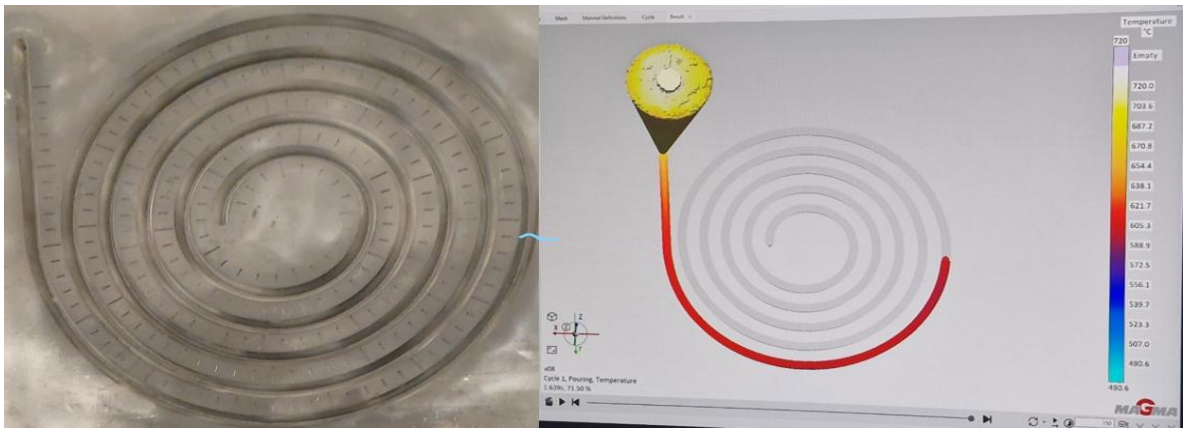


Figura 61: 3era Prueba del canal original del molde, a una temperatura de 720°C en un vaciado de 1.639 segundos y como obtención un recorrido de 44 cm en el molde de espiral

La comparación entre las dos últimas pruebas se presenta a continuación.

En el lado izquierdo de la figura 62 se tiene la anterior prueba y en el lado derecho se aprecia la mejora de la fluidez de un recorrido de 1 cm al agrandar la abertura superior del cono de fondo: 8.2mm; el área superior se modificó de 54mm a 83.2 mm.

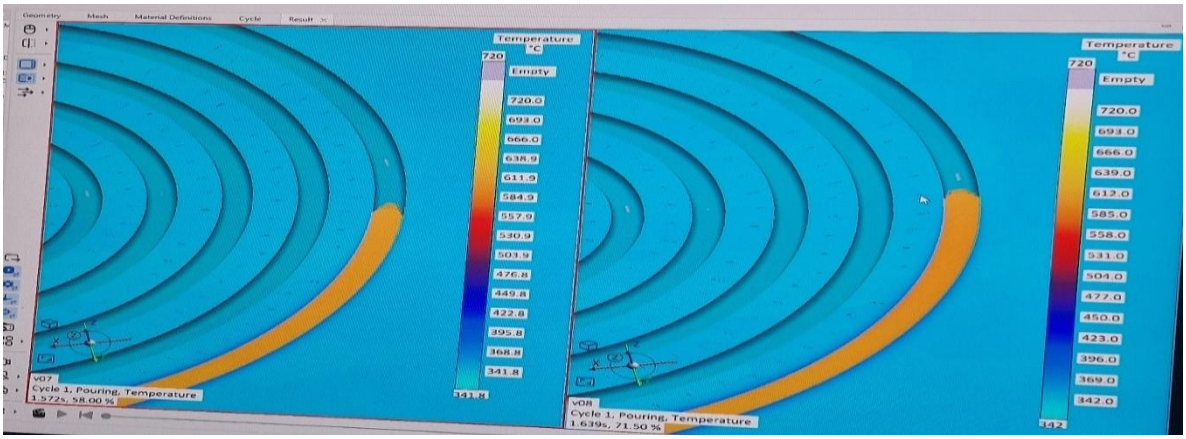


Figura 62: Avance del fluido 1 cm más que la prueba anterior

3.1.8.4 4ta Prueba con el espiral sin enfriamiento ni ventilación

Se agrandó el diámetro del cono a 83.22 mm y se quitaron las ventilas y sistema de calentamiento de los tubos roscados laterales (figura 63), asimismo al aumentar la temperatura del fluido de 720°C a 730°C y el molde de 350°C a 400 °C (figura 64).

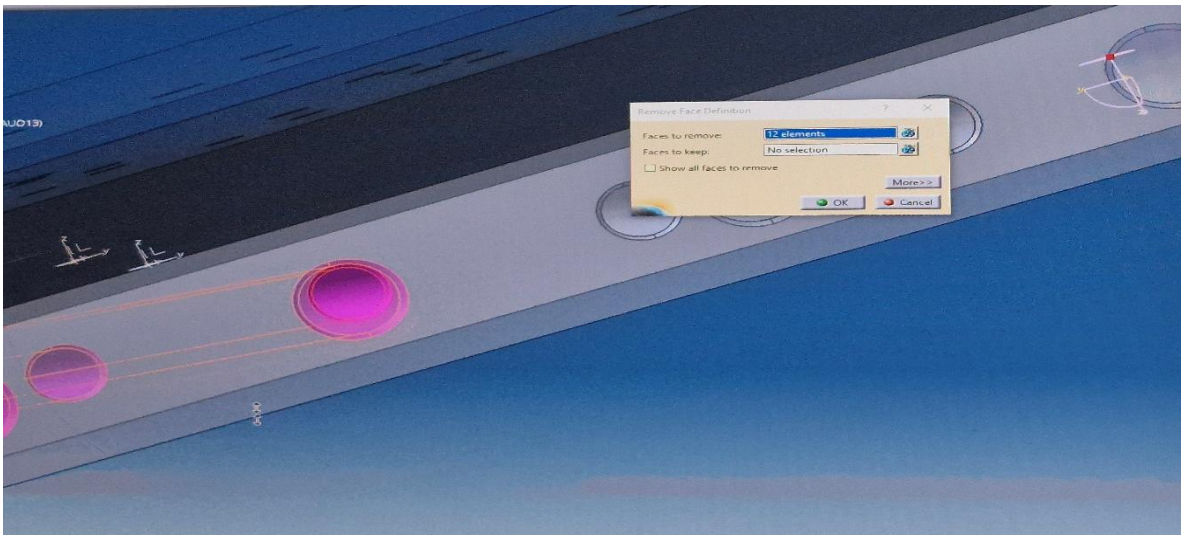


Figura 63: Eliminación de tubos internos que tiene el molde

Material Definitions

at ID	Database/Filename	Initial Temperature (°C)	Aluminum Composition		
	User/356_updated_18	730.0	Cr (Chromium)	0.0	%
			Cu (Copper)	0.03	%
			Fe (Iron)	0.5	%
			H (Hydrogen)	0.0	ml/100g
			Mg (Magnesium)	0.4	%
			Mn (Manganese)	0.3	%
			Na (Sodium)	0.0	%
			Ni (Nickel)	0.1	%
			P (Phosphorus)	0.0	%
			Sb (Antimony)	0.0	%
			Si (Silicon)	7.0	%
			Sr (Strontium)	0.0	%
			Ti (Titanium)	0.15	%
			Zn (Zinc)	0.1	%
t ID	Database/Filename	Initial Temperature (°C)			
	MAGMA/X40CrMoV5_1	400.0			

Figura 64: Cambio de parámetros de temperatura en la fluidez de 720°C a 730°C y el molde de 350°C a 400°C, la aleación se mantiene con los mismos valores

El molde se queda sin ventilas y sistema de enfriamiento (figura 65), se considera que el molde puede mantener una temperatura constante y alta. Se consideran desventajas que el molde se pueda deformar, ya que tendría una vida útil más corta y estaría en riesgo el operario a causa de un incendio o explosión. Además de que las ventilas ayudan a la liberación de gases y burbujas atrapadas en el molde durante su llenado, si la temperatura del molde es alta también pueden ocurrir contracción (grietas) en el material durante su enfriamiento.

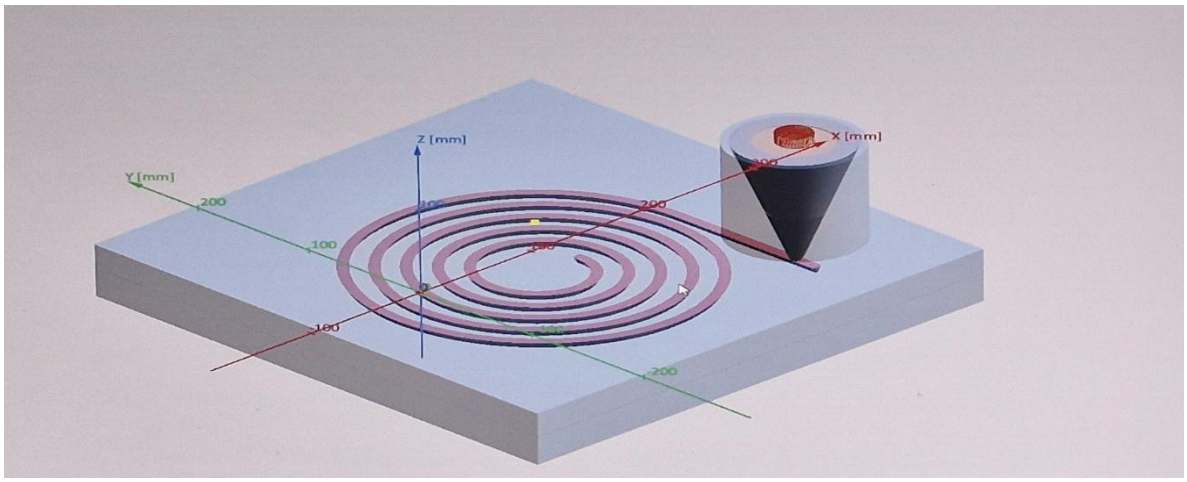


Figura 65: Representación de molde sin ventilas ni tubos de calentamiento

Los picos continuos de supercalentamiento indican cambios repentinos en la temperatura o el flujo del fluido. Es un resultado anormal se muestra en la gráfica (figura 66).

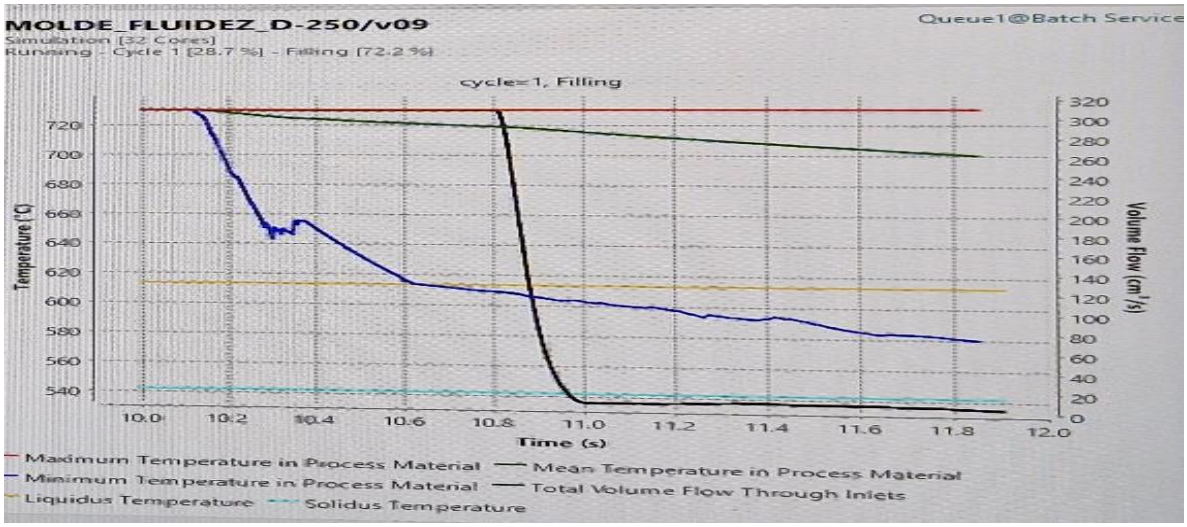


Figura 66: Supercalentamientos atípicos del fluido dentro de un molde sin entradas de aire, ni salida de gases

En la cuarta simulación se observa el fluido en una vista superior del molde en espiral obteniendo un recorrido de 45 cm en un vaciado de 1.541 segundos (figura 67), el 71.50% corresponde al volumen que se ingresó dentro del cono y espiral utilizando un cono de 4.1mm con 83.22 mm de área superior del bebedero.

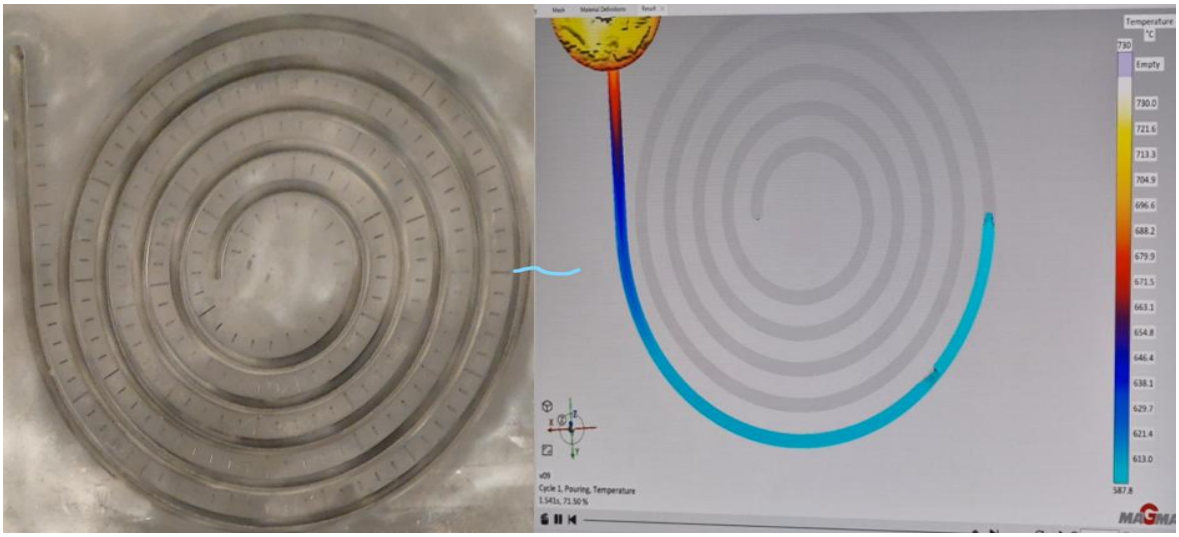


Figura 67: 4ta Prueba del canal original del molde, a una temperatura de 730°C en un vaciado de 1.541 segundos y como obtención un recorrido de 45 cm en el molde de espiral

3.1.8.5 5ta Prueba de 3 diferentes conos y modificación en el molde (Corcholata)

Prueba se presentan 3 tipos de diferentes conos a base de los cálculos de las ecuaciones del libro “Basic Principles of gating & Risering” (figura 68).

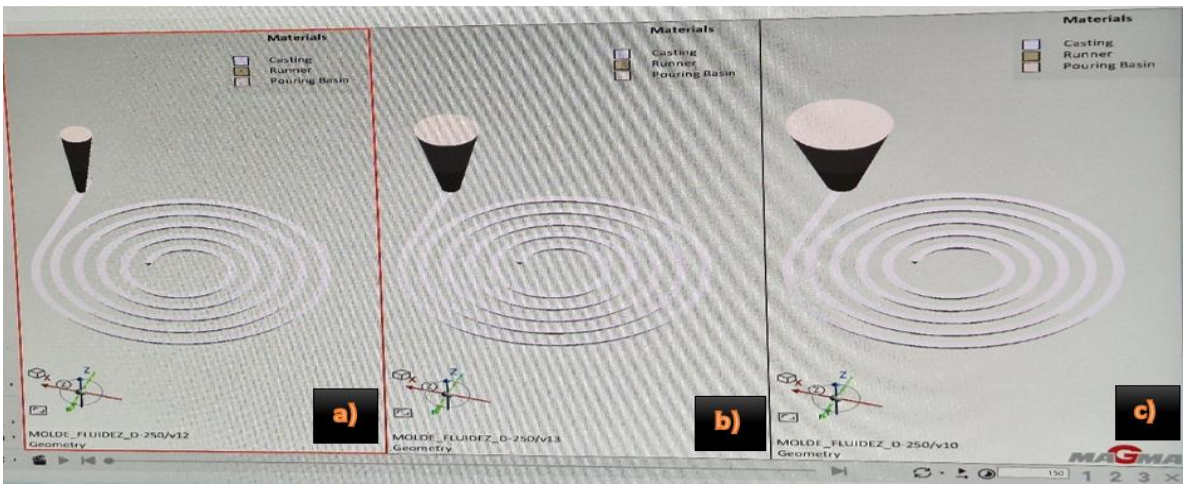


Figura 68: 3 Diferentes conos calculados y simulados en Magmasoft®; a) Cono de 41mm con 28.2mm de área superior, b) Cono de 8mm con 27.10mm de área superior y c) Cono de 12.1 mm con 83.2 mm de área superior

El área del fondo del cono en el caso a), coincide con la medida del canal 8.2 mm, sin embargo, para el caso b) y c) el fluido se derramaría por el molde, en las simulaciones se percibe que el llenado no es exacto (figura 69).

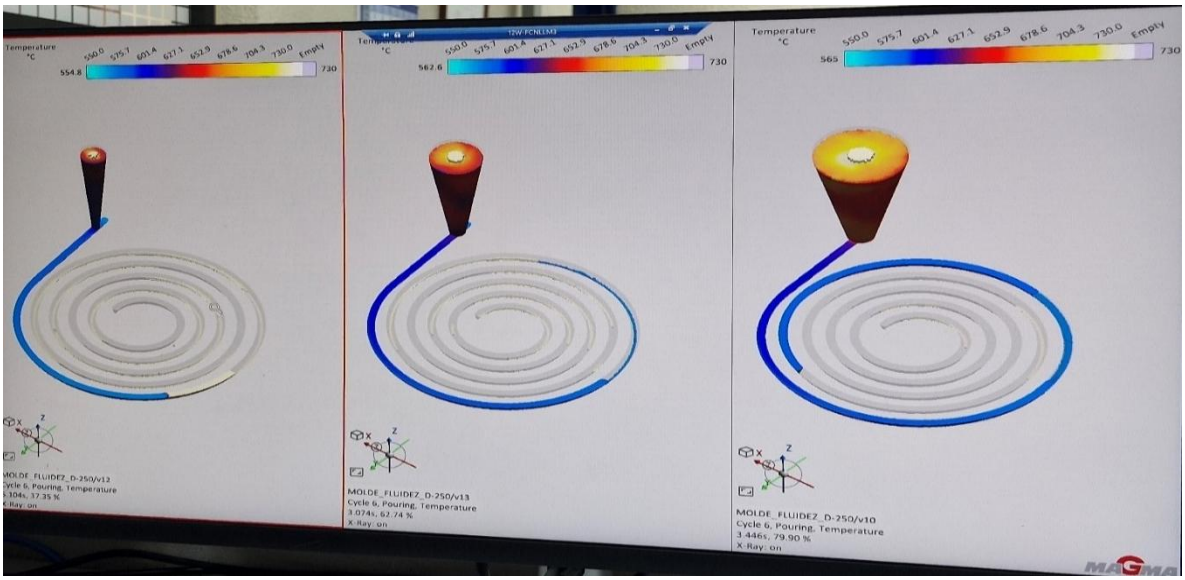


Figura 69: El cono que coincide con el canal no tiene problema de llenado sin en cambio los demás presentan problema de llenado debido a que no tienen exactitud con el canal

Se modifico el diseño original del molde haciendo una entrada tipo corcholata (figura 70) al llenado del canal de 2.4 cm para que el fluido entre correctamente al canal.

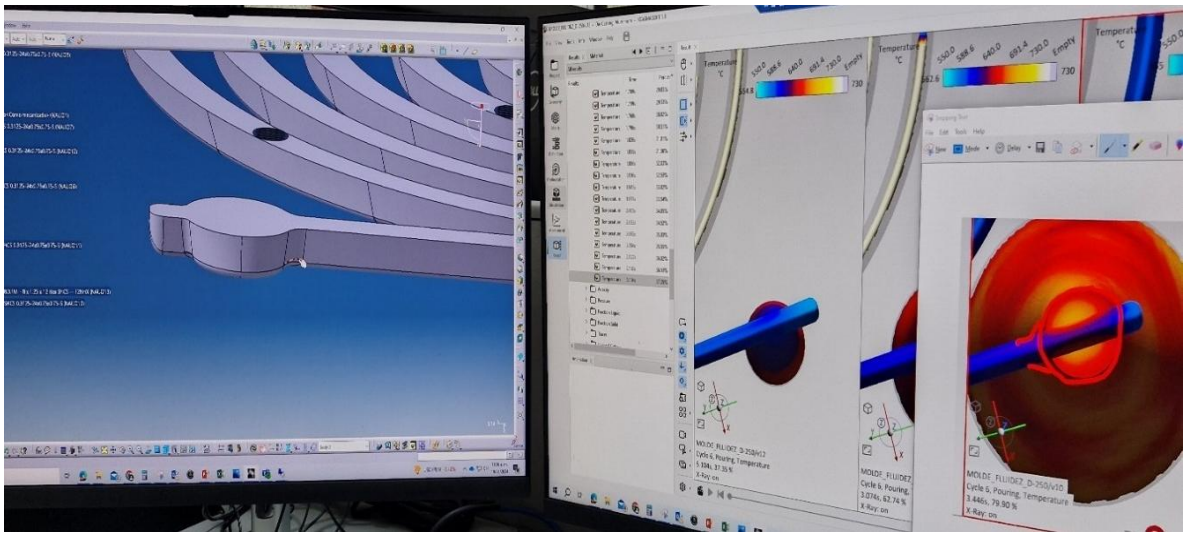


Figura 70: Modificación de entrada en el molde (tipo corcholata) para su llenado de la espiral con un cono más grande calculado

El color morado (figura 71) indica como queda la nueva entrada de llenado para el cono de 12.1 mm de fondo.

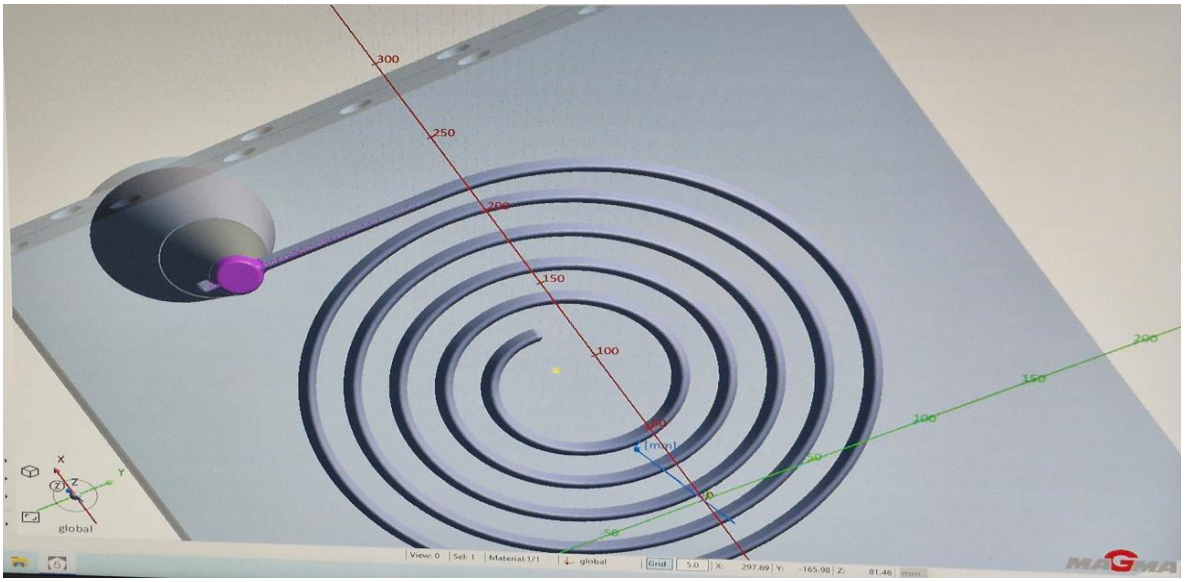


Figura 71: La corcholata coincide con el la entrada del cono 12.1mm y el ajuste con el canal del molde

También se modificó la entrada de llenado del molde a 4 cm (figura 72), la desventaja detectada en este tipo de modificación fue que si el líquido empezará a derramarse se estará en el límite para hacer cualquier otra modificación en la entrada de llenado del molde.

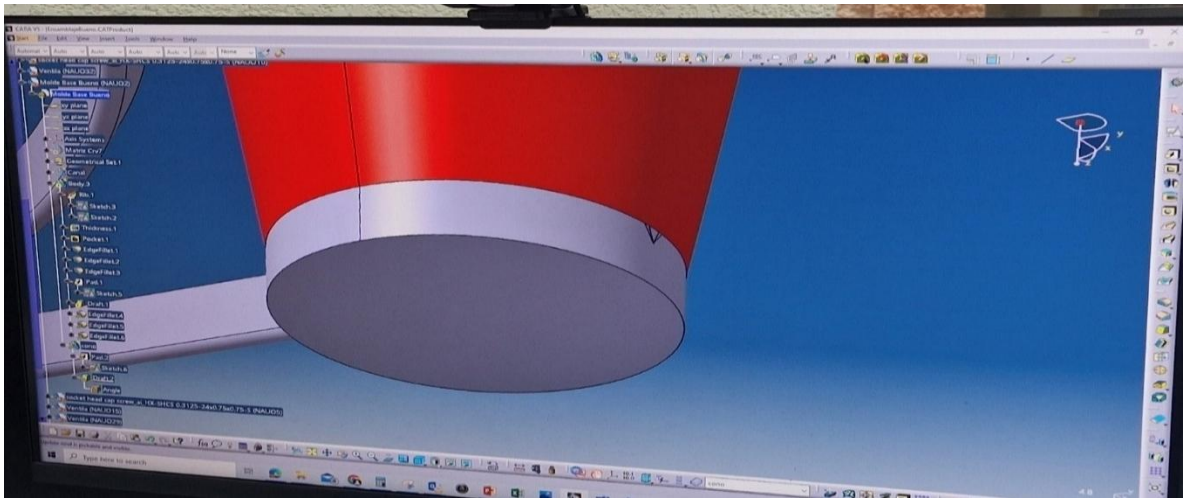


Figura 72: Diseño de corcholata de 4cm de diámetro en el canal del molde

En la quinta simulación A) se observa el fluido en una vista superior del molde en espiral obteniendo un recorrido de 50 cm en un vaciado de 3.190 segundos (figura 73), el 76.61% corresponde al volumen que se ingresó dentro del cono y espiral utilizando un cono de 12.1mm de fondo con 83.22 mm de área superior del bebedero.

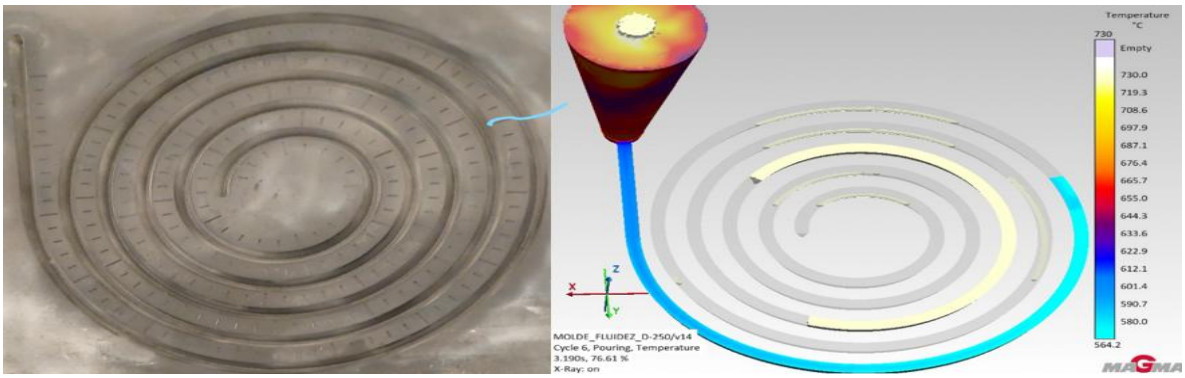


Figura 73: 5ta Prueba del canal original del molde, a una temperatura de 730°C en un vaciado de 3.190 segundos y como obtención un recorrido de 50 cm en el molde de espiral

En la quinta simulación B) se observa el fluido en una vista superior del molde en espiral obteniendo un recorrido de 44 cm en un vaciado de 4.673 segundos (figura 74), el 79.16% corresponde al volumen que se ingresó dentro del cono y espiral utilizando un cono de 20 mm de fondo con 83.22 mm de área superior del bebedero.

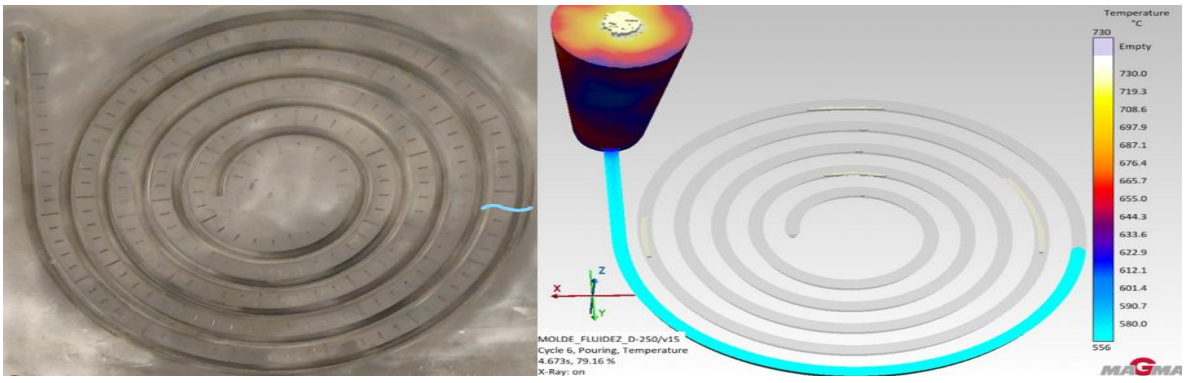


Figura 74: 5ta Prueba del canal original del molde, a una temperatura de 730°C en un vaciado de 4.673 segundos y como obtención un recorrido de 44 cm en el molde de espiral

La diferencia entre las mejoras del recorrido de las simulaciones es la presión metalostático en las paredes del cono y por eso se comporta mejor el de 12.1 mm de fondo que el de 20 mm de fondo junto a su entrada de corcholata del fluido en el molde.

3.1.8.6 6ta prueba

Conforme a lo que se revisó en la literatura, se realizó una sexta prueba ara agrandar más el canal.

En la imagen se presenta las medidas del canal encontrado en (Campbell y Harding,1994) en la (figura 75 A)), las medidas modificadas y establecidas para el molde en espiral fueron 9.1mm de ancho,7.5mm de altura total y 3.8mm de altura previa a la curvatura (figura 75 B)).

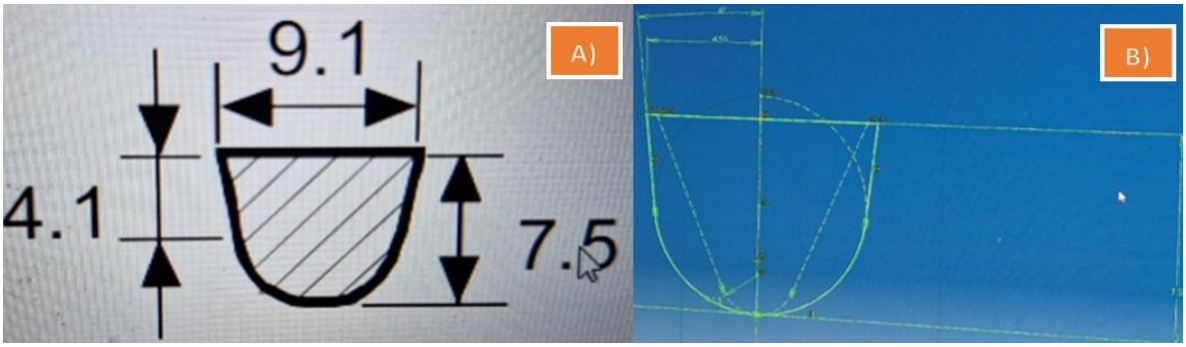


Figura 75: Canales propuestos para el canal del mismo molde en espiral, A) Medidas del canal utilizado por (Campbell y Harding, 1994), B) Canal de tamaño 9.1mm de ancho,7.5mm de altura total y 3.8mm de altura previa a la curvatura

La modificación del canal se muestra en la figura 76, los cambios en el perfil del espiral, el cambio de la trayectoria en este y la “corcholata” en la entrada de llenado del molde.



Figura 76: Aplicación del nuevo perfil al canal del espiral

El plano con modificación que indica la abertura del canal y la entrada de llenado en el molde con 2.4 cm tipo corcholata Se presenta en la figura 77. Aquí se aprecian los cambios que se han hecho en el molde como la entrada de corcholata y el agrandamiento del canal de la geometría del espiral junto a sus medidas acotadas en el molde fabricado.

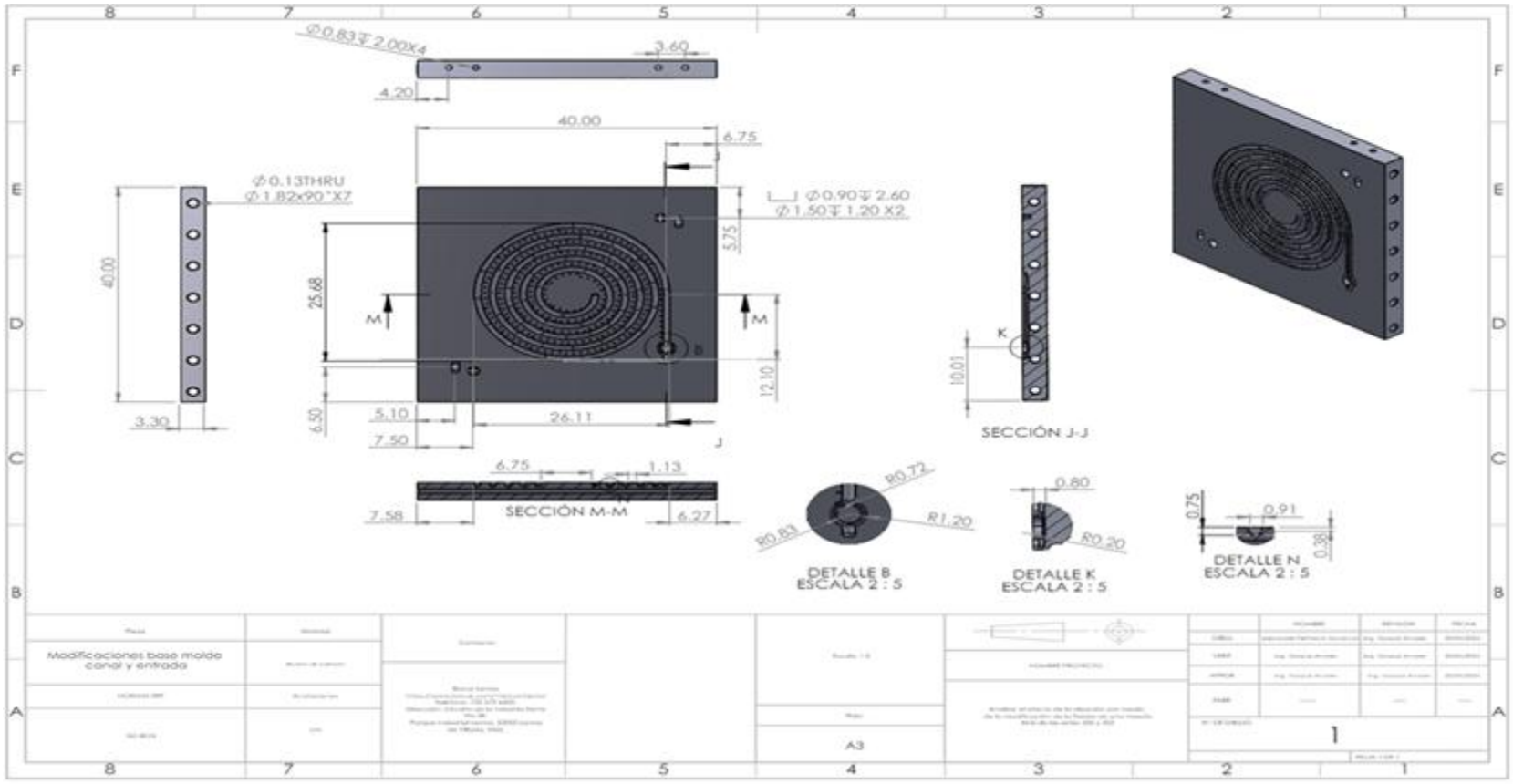


Figura 77: Plano con modificación de abertura de canal y entrada de llenada de 2.4 cm en el molde de espiral

En la sexta simulación se observa el fluido en una vista superior del molde en espiral obteniendo un recorrido de 59 cm en un vaciado de 2.075 segundos (figura 78), el 71.50% corresponde al volumen que se ingresó dentro del cono y espiral utilizando un cono de 12.1 mm de fondo con 83.22 mm de área superior del bebedero.

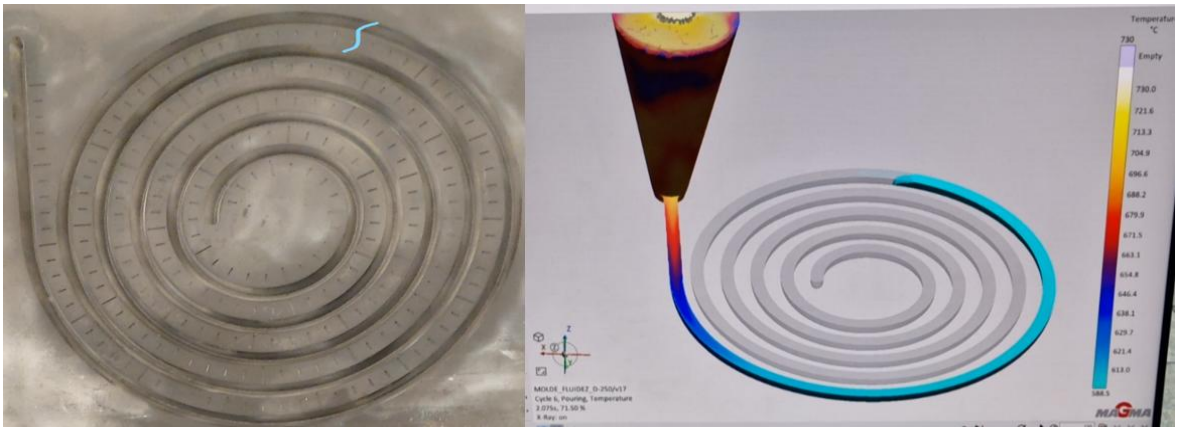


Figura 78: 6ta Prueba del canal original del molde, a una temperatura de 730°C en un vaciado de 2.075 segundos y como obtención un recorrido de 59 cm en el molde de espiral

3.1.8.7 Análisis térmico al molde

El análisis térmico del molde mostró que uno de los problemas por el cual el fluido no recorría una distancia mayor en el molde era debido a que los tubos que sirven para sistema de calentamiento (figura 79), circula aire y esas zonas están a baja temperatura (316.7-319.1°C).

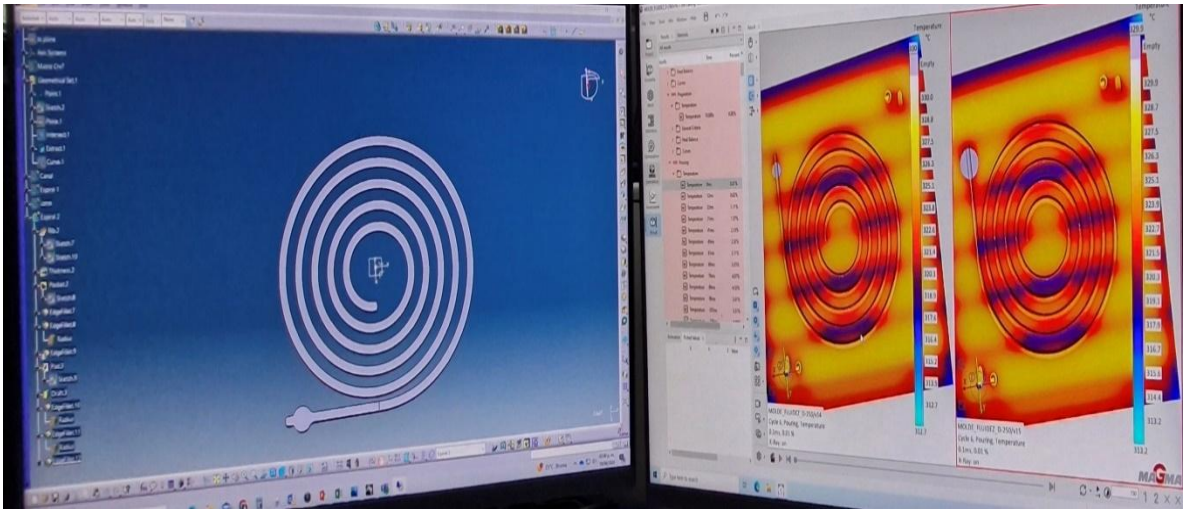


Figura 79: Análisis térmico del molde en espiral de acero ya fabricado

3.1.8.8 Elección del Cono de 12.1 mm y su diseño en software en 3D

Representación en 3D del cono de 12.1 mm de área del fondo del cono de llenado en el programa SolidWorks (figura 80 y figura 81) muestran diferentes vistas en la tapa móvil del molde, seleccionado como el mejor tamaño de cono y para representar la posición y ensamblaje en la tapa móvil del molde.

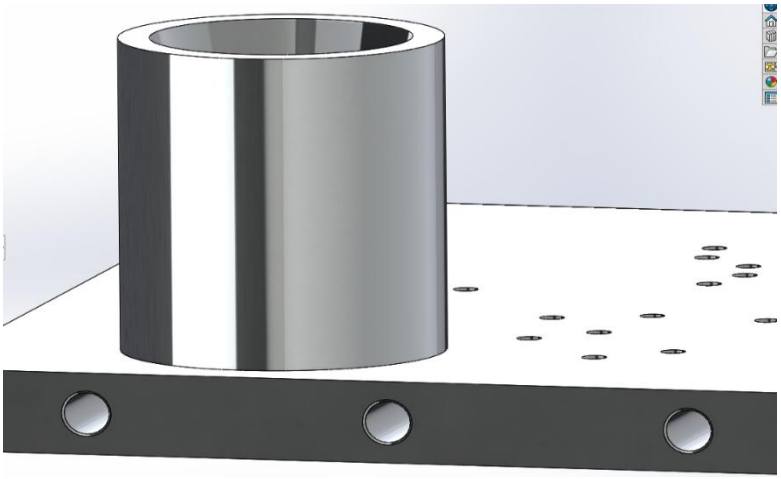


Figura 80: Vista lateral del cono de 12.1mm

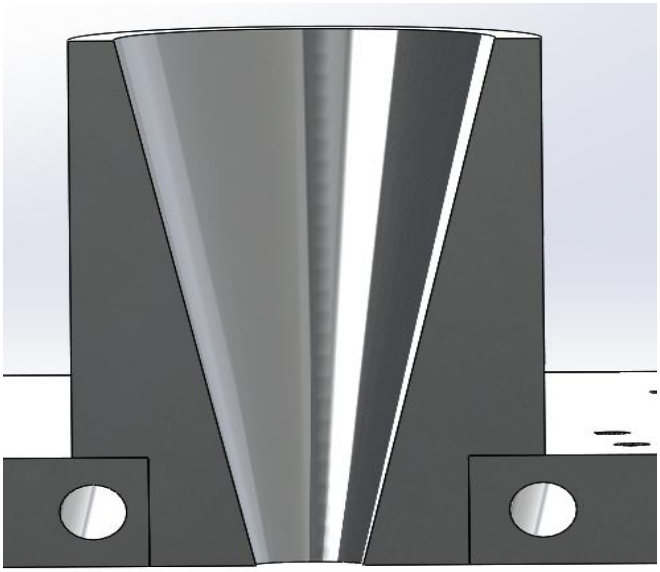


Figura 81: Vista seccionada del cono de 12.1mm

En la tabla 5 se presentan las diferentes modificaciones que se tienen que hacer en base a las simulaciones para que las pruebas a futuro presenten mejores resultados que las previas.

Tabla 5: Simulaciones en software Magmasoft®, variaciones en el molde de espiral, parámetros y conos

No. de Prueba	Descripción de la modificación del Molde o cono de alimentación	Aleación sin modificación	Cono de alimentación	Temperatura de Aleación (°C)	Velocidad de Vertido (cm/s)	Temperatura del molde (°C)	Revestimiento/ Pintura	Recorrido de Fluidez (cm)
1	Canal medio circular	356	Ø0.82 cm de fondo con Ø5.4 cm de área superior	720	1.34	350°C	Sílice/Grafito	37
2	Espiral con perfil "V"	356	Ø0.82 cm de fondo con Ø5.4 cm de área superior	720	1.572	350°C	Sílice/Grafito	43
3	Cono de 83.22 mm	356	Ø0.82 cm de fondo con Ø8.32 cm de área superior	720	1.639	350°C	Sílice/Grafito	44
4	Sin enfriamiento ni ventilación	356	Ø0.82 cm de fondo con Ø8.32 cm de área superior	730	1.541	400°C	Sílice/Grafito	45
5a	Diferentes conos	356	Ø0.82 cm de fondo con Ø2.82 cm de área superior	720	5.104	350°C	Sílice/Grafito	40
5b	Diferentes conos	356	Ø1.6 cm de fondo con Ø5.40 cm de área superior	720	4.673	350°C	Sílice/Grafito	46
5c	Diferentes conos	356	Ø4 cm de fondo con Ø8.32 cm de área superior	720	4.673	350°C	Sílice/Grafito	44
5d	Diferentes conos	356	Ø2.42 cm de fondo con Ø8.32 cm de área superior	720	3.19	350°C	Sílice/Grafito	50
6	Canal agrandado(9.1mmx7.5mmx3.8mm)	356	Ø2.42 cm de fondo con Ø8.32 cm de área superior	720	2.075	350°C	Sílice/Grafito	59

La figura 82 proporciona información que la prueba 6: la del canal agrandado junto con el cono de diámetro fabricado nos otorga una mejor distancia recorrida del fluido llegando a 59 cm.

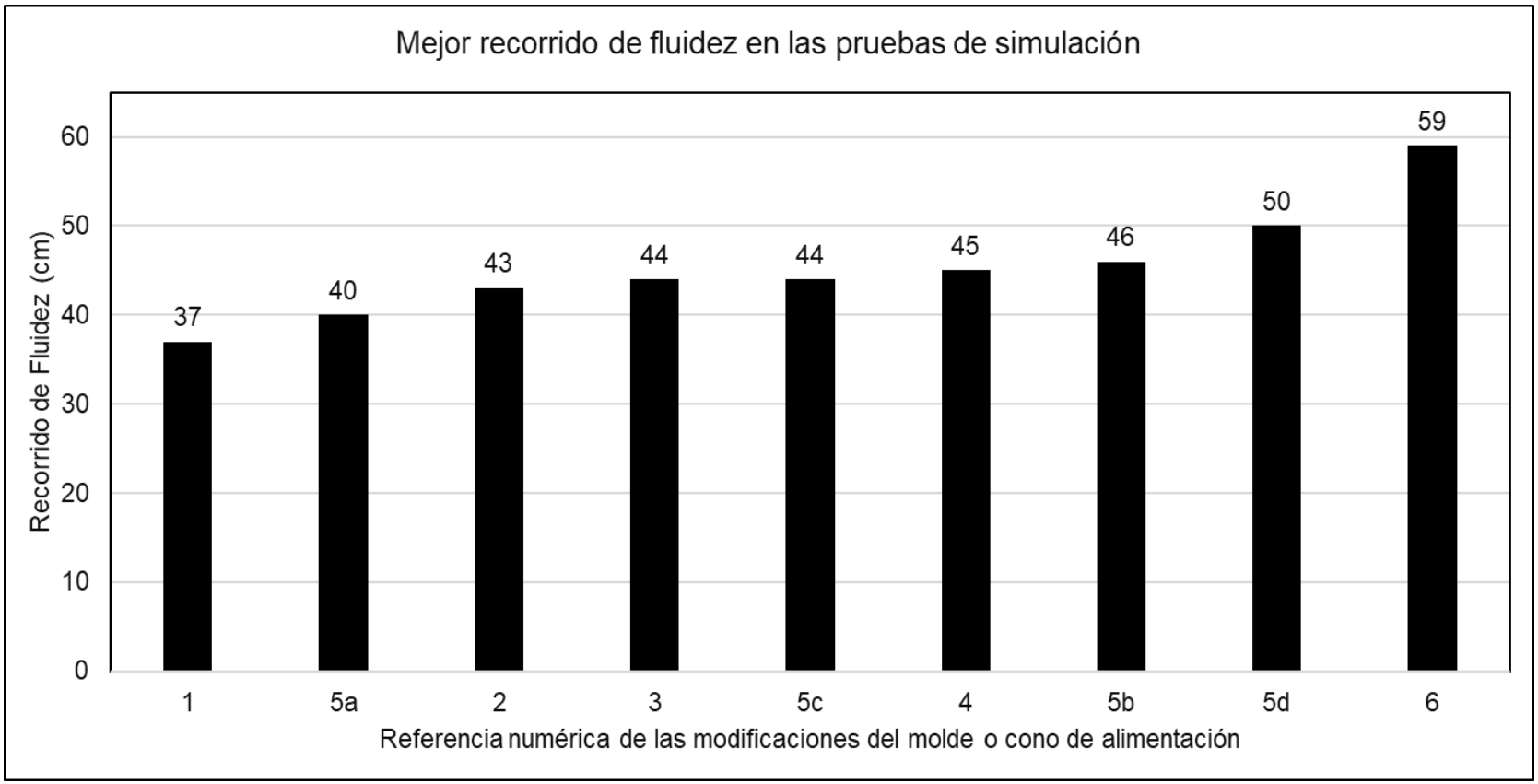


Figura 82: Gráfico de datos no agrupados(tendencia) de los parámetros que pueden mejorar el recorrido de la fluidez dentro del molde y estableciendo el cono adecuado para su avance

3.1.9 Proceso de fabricación del cono

La fabricación externa del cono consistió en que el departamento de ingeniería de producto torneó (figura 83), un cilindro de acero por la parte externa diseñado de acuerdo a las medidas mostradas en el plano (figura 47), con una herramienta de corte ajustando las velocidades de avance y rotación.



Figura 83: Equipos de torneado, laboratorio GOM- Empresa mexicana de componentes automotrices

Posteriormente se pasó el cilindro a un equipo llamado CNC (figura 84) para mecanizar la parte interior que tendrá la forma definida para el cono, se ejecuta el programa y este seguiría las instrucciones conforme a las especificaciones de diseño.



Figura 84: Equipos de CNC, laboratorio GOM- Empresa mexicana de componentes automotrices

El cilindro se desbasta de la parte de adentro en el CNC con una broca de Ø42 R6 (figura 85).



Figura 85: Herramienta de corte Ø42 R6 del cono desbastando el cilindro

Vista general del cono en la placa superior del molde (figura 86) según los parámetros o diseño definido.



Figura 86: Molde completo con el cono integrado

3.1.10 Quemador usado

Se usó un quemador que utilizan para calentar moldes en línea de producción con una temperatura de 380°- 410 °C.

El quemador tiene orificios y una ranura donde pasa el flujo de gas y aire para producir un proceso de combustión al combinarlo con fuego (figura 87).

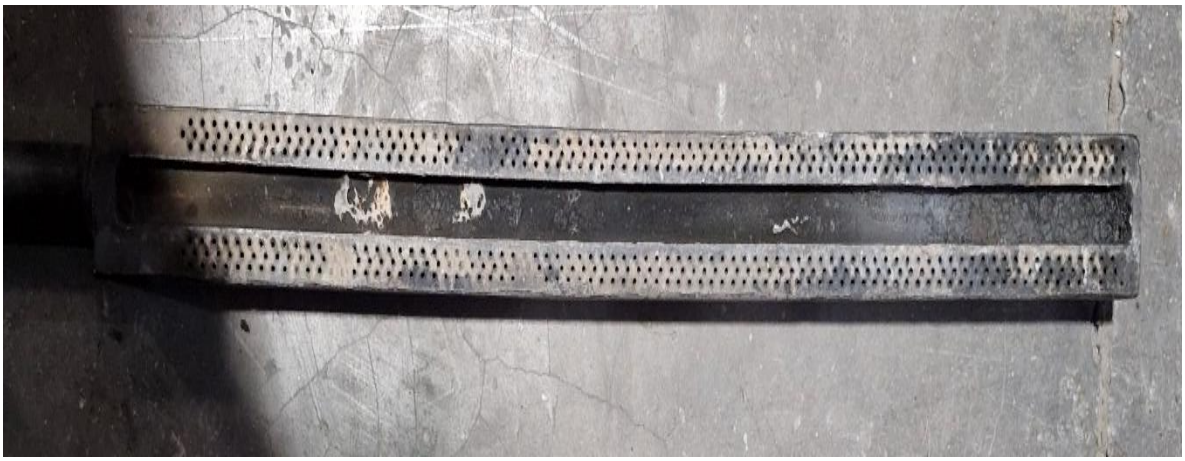


Figura 87: Vista del quemador de la parte frontal donde sale la llama

Funcionamiento del quemador en el molde de espiral, la flama calienta ambas tapas manteniéndolo a una temperatura constante y alta (figura 88).



Figura 88: Proceso de combustión y calentamiento del molde en espiral

3.1.11 Pruebas de fluidez en el molde de espiral

El proceso comienza ingresando el quemador entre ambas tapas del molde en espiral, se abrieron las válvulas de gas y aire; produciendo combustión mediante una ignición con fuego, es por eso que se muestra las llamas en el molde (figura 89).



Figura 89: Quemador calentando al molde en espiral

El molde presentó diferentes temperaturas debido a la dirección de la flama, el color amarillo indica una temperatura alta de 425.1°C y el color naranja intenso marca una temperatura de 381.7°C en la tapa inferior del molde en espiral (figura 90) en un tiempo de 60 minutos de calentamiento; las diferencias se deben a que el quemador por su posición de acomodo entre ambas tapas calienta más en unas regiones que en otras.

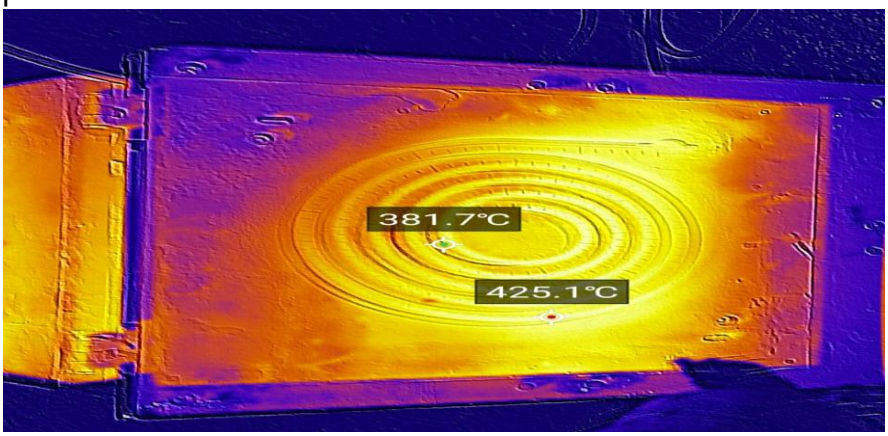


Figura 90: Temperatura de la tapa inferior del molde en espiral a una temperatura constante en un tiempo de 60 minutos

De misma forma la tapa superior del molde en espiral presenta diferentes temperaturas, el color amarillo indica una temperatura de 413.9°C y el color naranja vivo una temperatura de 360.6°C, debido a que es la parte más lejana de dónde puede llegar la flama (figura 91) en un tiempo de 60 minutos de calentamiento; las diferencias de temperatura son debidas al enfriamiento cada que se abre el molde en el proceso de vertido.

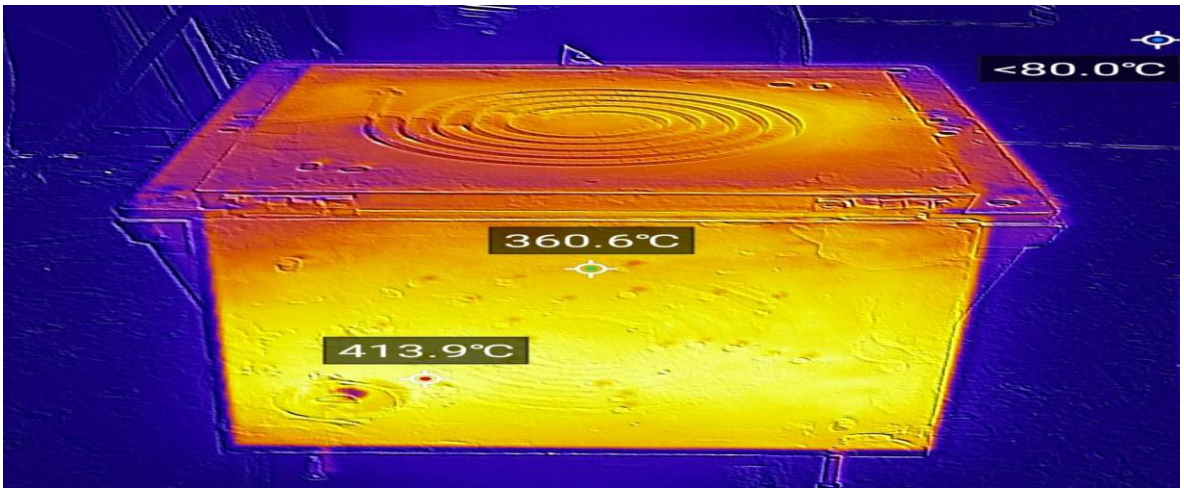


Figura 91: Temperatura de la tapa superior del molde en espiral a una temperatura constante en un tiempo de 60 minutos

Se le aplica pintura sílice (figura 92) para otorgarle resistencia a altas temperaturas y protección de corrosión; evitar que se deforme o desgaste el acero con el que está hecho el molde.



Figura 92: Pintura de silice aplicada al molde de espiral durante el proceso de calentamiento

Encima de la anterior pintura de sílice se hace el recubrimiento de negro de grafito (figura 93) que le proporciona a la superficie lubricación, es decir, previene la fricción entre el molde y el material a verter la diferencia con la pintura de sílice es: facilitar el flujo del material fundido y la liberación de la pieza del molde.



Figura 93: Recubrimiento de grafito al molde de espiral durante el proceso de calentamiento

Como se ve en la figura 94, las herramientas (sujetadores, tenazas de fundición, martillo, botador, una cuchara de colada) fueron ocupados para el proceso de vertido en el molde de espiral.



Figura 94: Herramientas auxiliares para el proceso de vertido del aluminio en el molde de espiral

Después de pintar y recubrir al molde de espiral se calienta por otros 25 a 30 minutos (figura 95) para volver a la temperatura que se encontraba y evitar que al momento de vertido no resulten tan favorables las pruebas por el calentamiento del molde.



Figura 95: Postcalentamiento del molde en espiral después de la pintura de sílice y recubrimiento de grafito

Los sujetadores como se muestra en la figura 96 son necesarios para asegurar que el molde no se abra o se mueva al momento de verter el aluminio fundido dentro del cono de llenado con ayuda de un martillo de aluminio.



Figura 96: Sujetadores sosteniendo el molde con la mesa móvil

La cuchara de colado está fabricada de un acero revestido que ayuda a soportar la recolección del aluminio fundido a alta temperatura (figura 97).



Figura 97: Vertido del aluminio fundido a una temperatura de 730°C con una cuchara de colado

El fluido recorre la forma del espiral aproximadamente entre 2-4 segundos, y la solidificación se aprecia en el cono de llenado durando aproximadamente 30- 40 segundos, ahí es cuando se puede abrir el molde con las tenazas de fundición (figura 98); la prueba de aluminio se despega de la tapa inferior del molde debido a que se adhiere a la salida del cono; las pruebas reales contra las simulaciones fueron mejores debido a que se pudieron controlar variables de temperatura del molde, la velocidad de vaciado, la composición del fluido, recubrimiento del molde y diseño del sistema de alimentación.



Figura 98: Abertura del molde de espiral después del vertido y muestra de la prueba del recorrido del aluminio

3.1.12 Resultados de las pruebas de fluidez

En el lado izquierdo se muestra el primer recorrido del aluminio vertido en el molde y en el lado derecho el segundo recorrido con menos distancia debido al enfriamiento del molde al momento de hacer esa segunda prueba (figura 99).



Figura 99: Primer y segunda prueba de vertido en el molde de espiral

La primera prueba y su distancia del aluminio fundido en una vista superior de su recorrido en el molde de espiral obteniendo un recorrido de 109 cm en un vaciado de 11 segundos (figura 100), utilizando un cono de 12.1mm de fondo con 83.22 mm de área superior del bebedero y su solidificación siendo de 45 segundos; no coincide con la simulación, el recorrido que presento en esta prueba es de 50 cm de diferencia con lo presentado.



Figura 100: Primer prueba de aluminio fundido vertido en 11 segundos en el molde de espiral, con un cono de 12.1 mm de fondo

La segunda prueba y su distancia del aluminio fundido en una vista superior de su recorrido en el molde de espiral obteniendo un recorrido de 101 cm en un vaciado de 3 segundos (figura 101), utilizando un cono de 12.1mm de fondo con 83.22 mm de área superior del bebedero y su solidificación siendo de 45 segundos no coincide con la simulación, el recorrido que se observó en esta prueba es de 42 cm de diferencia con lo presentado.

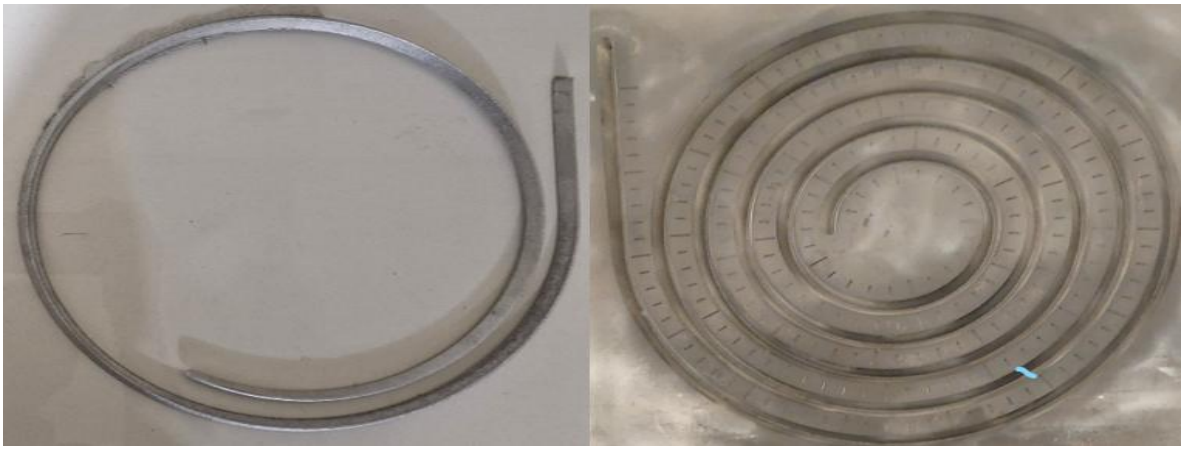


Figura 101: Segunda prueba de aluminio fundido vertido en 3 segundos en el molde de espiral, con un cono de 12.1 mm de fondo

3.1.12.1 Primer muestra metalográfica de la microestructura de las aleaciones

La aleación se funde a una temperatura de 700-800 °C, al momento de vaciarlo ocurre el proceso de nucleación a medida que la aleación empieza a enfriarse comienzan a formarse núcleos de solidificación, estos núcleos son conocidos como dendritas que empiezan a ramificarse en toda dirección.

Las dendritas dependen del proceso de solidificación que están presentes en la fase eutéctica de la aleación de aluminio 356 y 332, donde se encuentra el alpha aluminio. El tamaño de las dendritas que por sus siglas en ingles “DAS” (Dendrite Arm Spacing), es una de las variables que conforman a las propiedades mecánicas de una pieza, para la aleación 356 el tamaño de las dendritas es de 10-20 micrómetros y para la 332 es de 15-30 micrómetros definidas por su velocidad de enfriamiento, su pureza y el proceso de fundición.

Un menor DAS indica una microestructura más fina, que mejora las propiedades mecánicas de la aleación. El modificador de microestructura es importante debido a la formación y el tamaño de las dendritas durante el proceso de solidificación.

En la figura 102 se presenta el silicio separandose de la fase Alpha aluminio y forma la fase eutéctica con el aluminio, también se generan partículas de silicio por sí solas.

Se tiene una velocidad de enfriamiento moderada ya que el enfriamiento en molde de metal/acero es de 1-10°C/s, se forman microestructuras con dendritas cortas y partículas de silicio pequeñas.

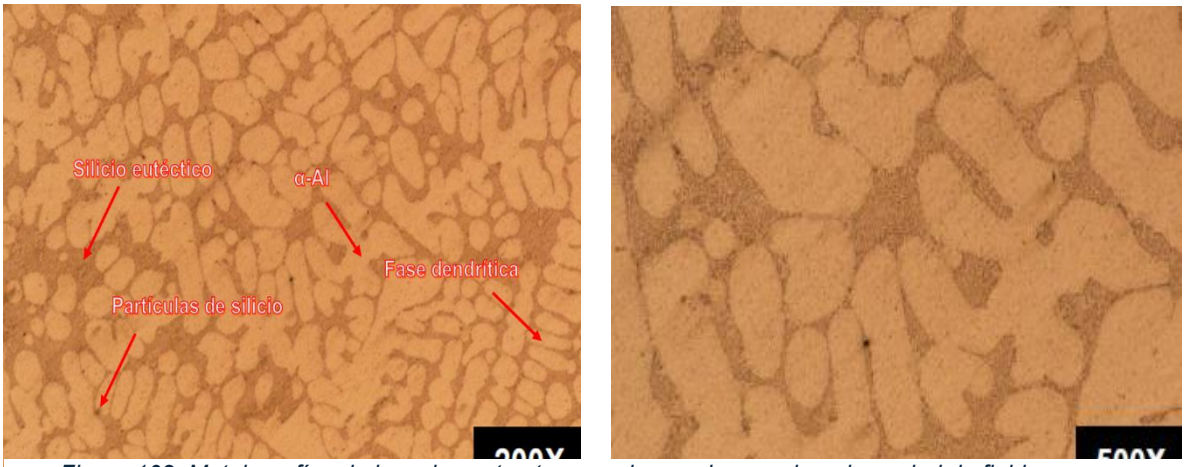


Figura 102: Metalografías de las microestructuras en base a las pruebas de espiral de fluidez con un acercamiento de 200x y 500x detallando sus fases y la representación del DAS

3.1.13 Nuevos parámetros de simulación, modificación del espiral y nuevo diseño de copa y contra copa.

Los cambios de parámetros en la simulación como la transferencia de calor permitieron replicar la prueba real (figura 103) y tener los parámetros establecidos del molde en espiral.

La alta temperatura de la aleación 710°C y la temperatura moderada del molde 350°C crean una diferencia térmica que favorece la transferencia de calor hacia el molde, pero sin enfriar el metal demasiado rápido.

El tiempo de llenado de 10.5 segundos indica un flujo rápido, lo que ayuda a controlar la solidificación y a mantener la fluidez durante el recorrido de 177 cm. Esto sugiere que la transferencia de calor está siendo eficaz para lograr un llenado adecuado sin bloquear el flujo del material. Este resultado permitirá realizar otras pruebas con la misma resistencia a la transferencia de calor e identificar como es el vaciado en este tipo de molde.

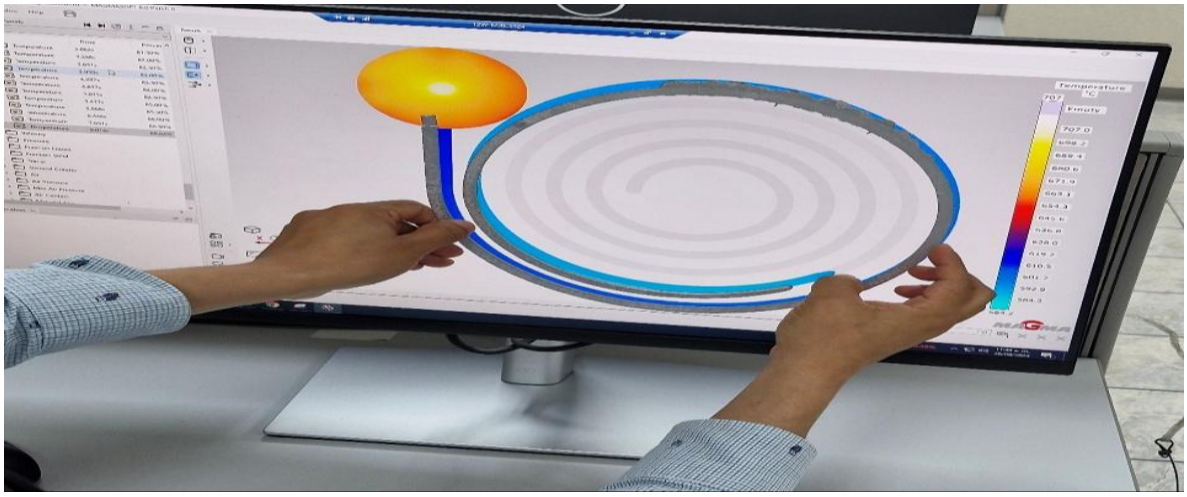


Figura 103: Simulación coincidente con las primeras pruebas presentadas, parámetros definidos para futuras pruebas en el software

Las nuevas medidas maquinadas del nuevo canal del molde en espiral fueron: 9.1 mm de ancho, 7.6mm de alto y 8.3mm de abertura del canal (figura 104).

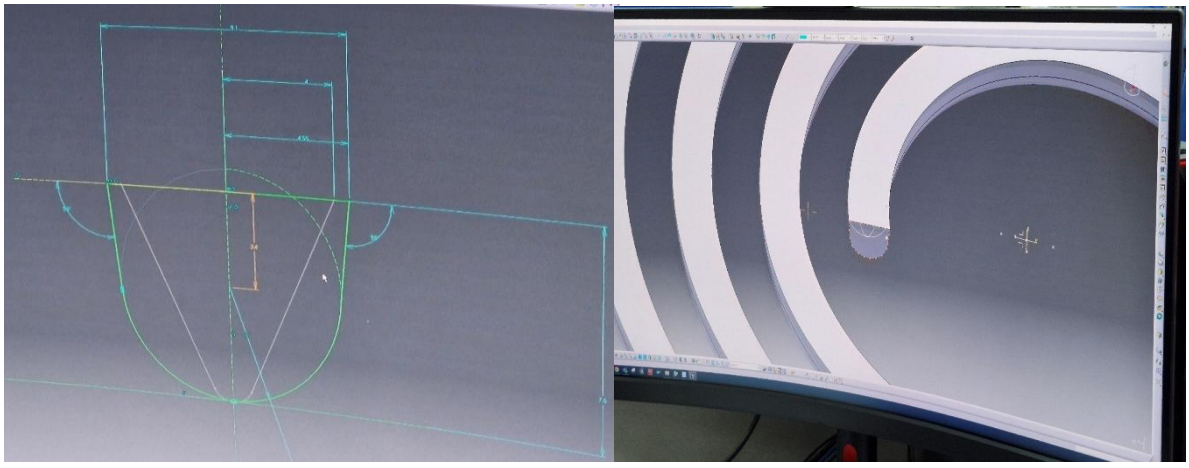


Figura 104: Presentación de las medidas del canal en el software de diseño y su geometría final

La tapa inferior del molde se trasladó a taller mecánico para la modificación de su canal, en color rojo tinto se visualizaba el área a desbastar (figura 105). Era importante percatarse de esto debido a que la broca tenía que calibrarse y posicionarse para realizar un corte preciso.

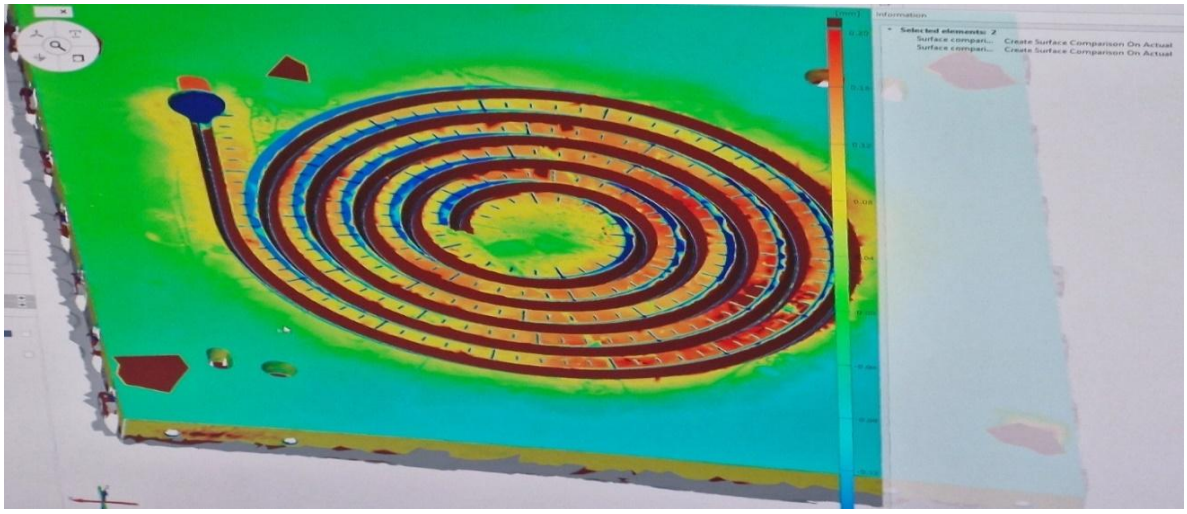


Figura 105: Modificación del canal del molde y el área de desbaste presentada antes de maquinar

Se desbasto el molde para generar la nueva geometría de la espiral en CNC con una broca de Ø5mm (figura 106 A) y barrenos con medida para tornillo de 10M para atornillar la placa a la base de la mesa (figura 106 B).

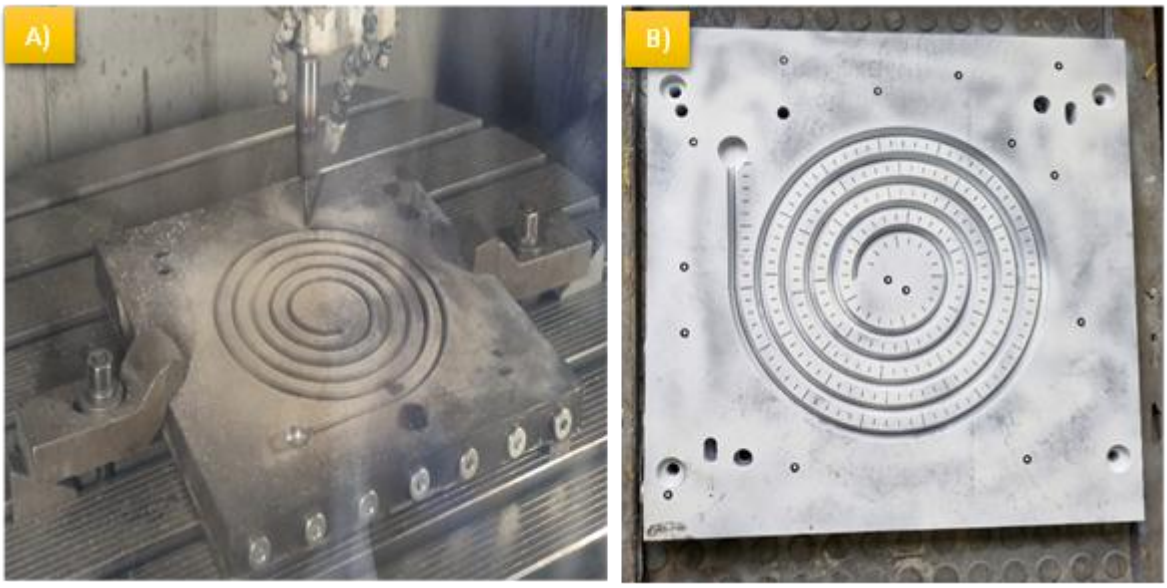


Figura 106: A) Proceso de maquinado en CNC de la tapa fija, B) Placa modificada con polvo de titanio encima debido a que lubricación de la herramienta de corte y la superficie

La copa y contra copa diseñadas en base a las copas de alimentación de los moldes usados en la planta de la empresa mexicana de componentes automotrices (figuras 107A), B) y C)), las cavidades que tienen por detrás son debidas a no tener un peso mayor en las tapas del molde para que la estructura nos permitiera levantarlo con mayor facilidad.

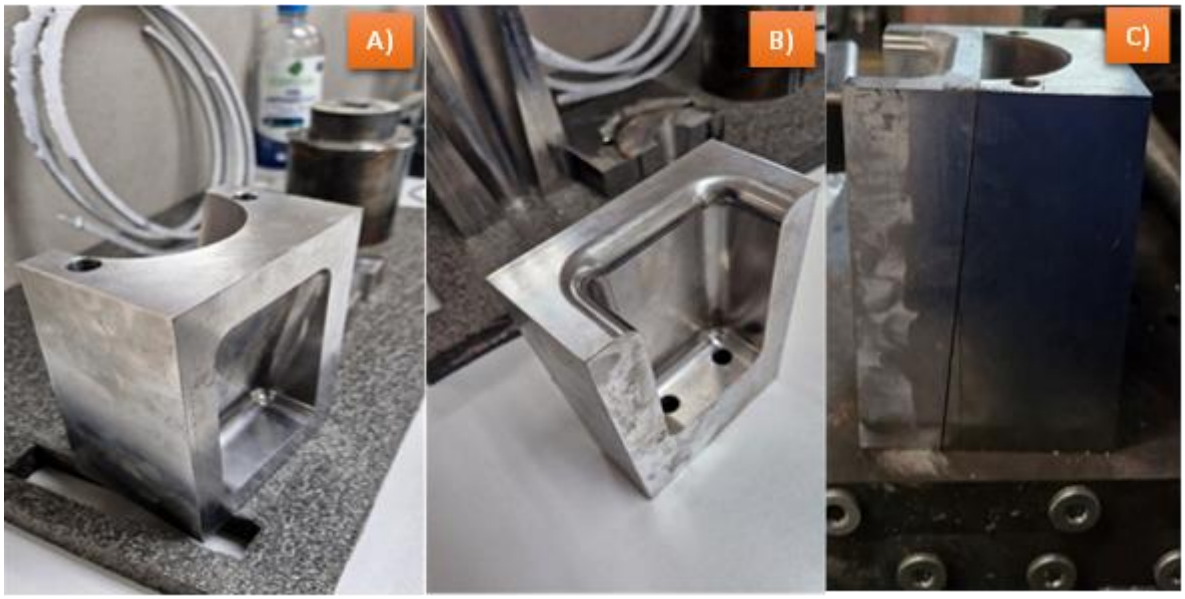


Figura 107: A) Tapa Fija, B) Tapa móvil y C) Tapas ensambladas en el molde de espiral

El recorrido presentado ante la simulación y los parámetros programados en base a la primera prueba presentada, fue de 177 cm (figura 108); la mitad del cono se llena con 0.53 kg de volumen de aluminio.

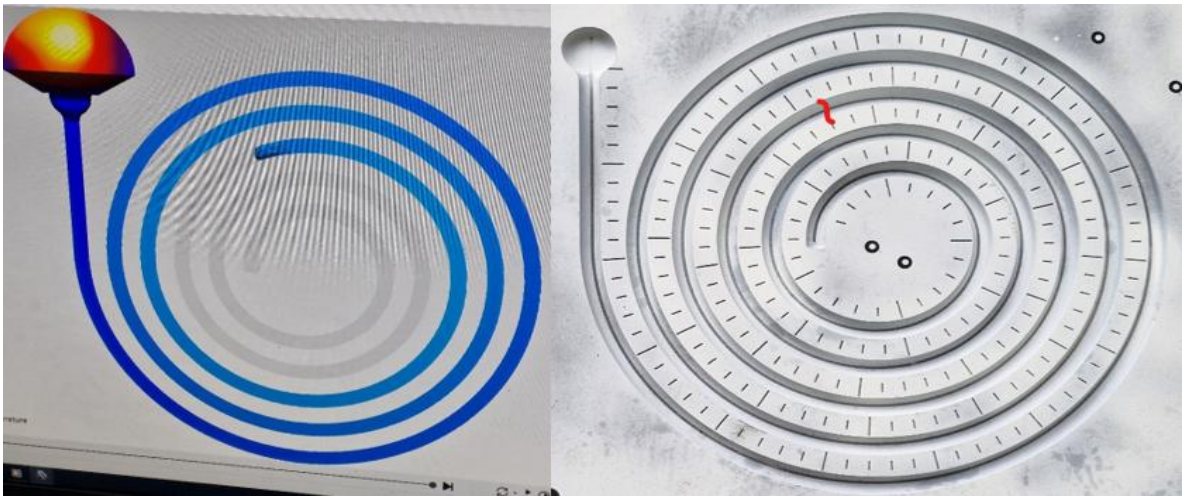


Figura 108: Simulación del fluido respecto al canal modificado y las tapas del molde diseñadas

3.1.14 Estructura de levantamiento y giro para el molde en espiral

Se Industrializó el molde para un proceso productivo, el primer boceto presentado permitió demostrar la facilidad para manipular el molde en el proceso de vaciado; Se fabrico un soporte para subir, bajar y darle el giro de la placa móvil del molde (figura 109); facilitando su pintado y recubrimiento en la placa fija donde se encuentra el espiral, esto optimiza el proceso y asegura un mejor control de las variables que influyen en el proceso de fundición.

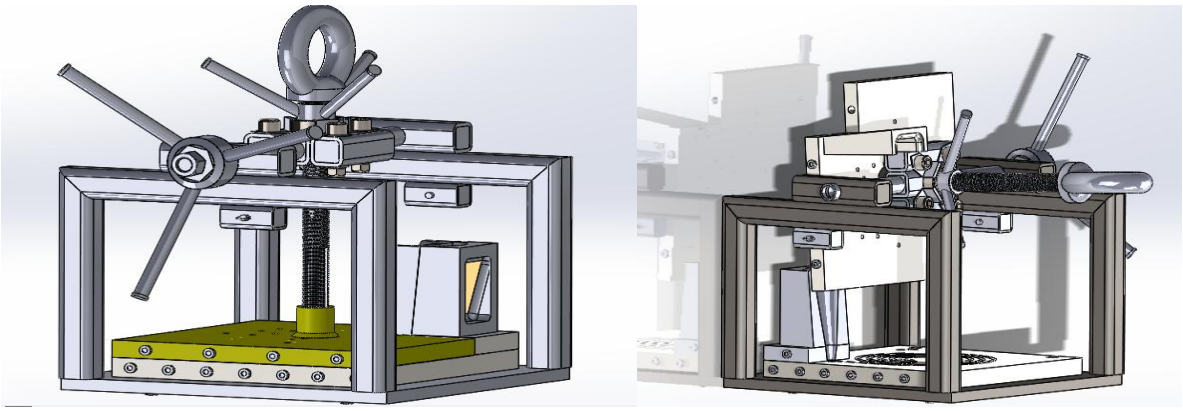


Figura 109: Modelo final de la estructura de levantamiento y giro para el molde en espiral

El levantamiento permitirá extraer la pieza fundida (figura 106 A), el giro a 45° permite la extracción de la placa fija del molde y con el giro a 90° su fácil pintado de ambas placas (figura 110 B y figura 110 C).

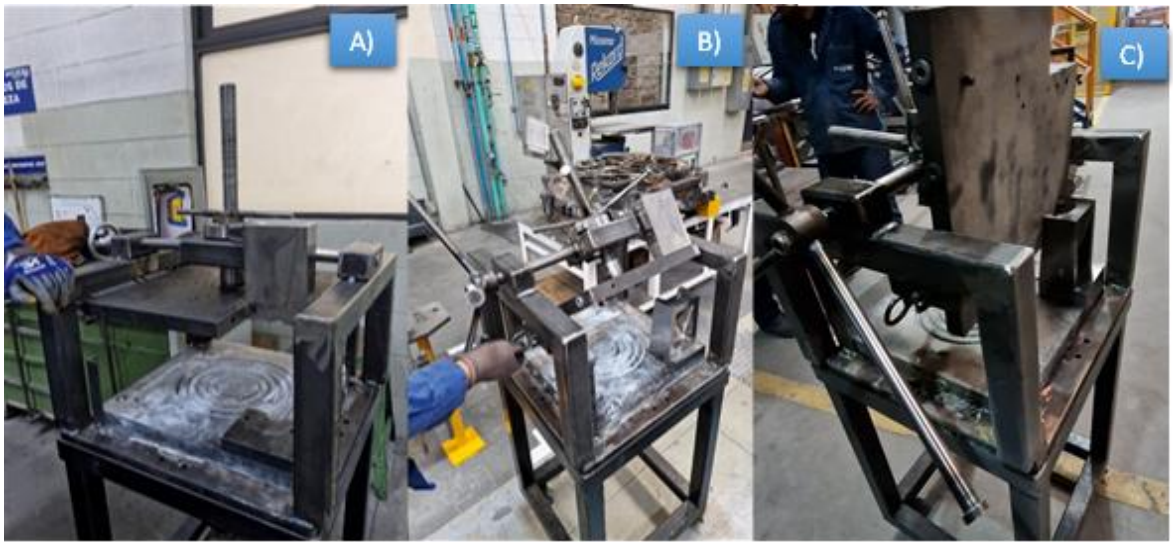


Figura 110: A) Fabricación de la estructura que permitirá el levantamiento, B) Y C) Giro a 45° y Giro a 90° de la tapa móvil del molde

3.1.15 Prueba del comportamiento a alta temperatura

Con la industrialización del molde para un proceso productivo y vaciado, al incrementar la dimensión del canal facilita el flujo de la aleación, teniendo en cuenta el volumen metalostático de la copa y la contra copa del molde; mantienen una presión adecuada para ingresar el aluminio asegurando un flujo continuo y constante, evitando zonas de enfriamiento.

Mantener una temperatura uniforme del molde en espiral no solo favorece a la fluidez del aluminio, sino que también reduce la solidificación temprana.

Con el pirómetro óptico se midió la temperatura superficial de las tapas (figura 111 A y figura 111 B), mientras que la termocámara permitió conocer la distribución térmica en el molde, detectando cualquier variación de temperatura (figura 111 C y figura 111 D).

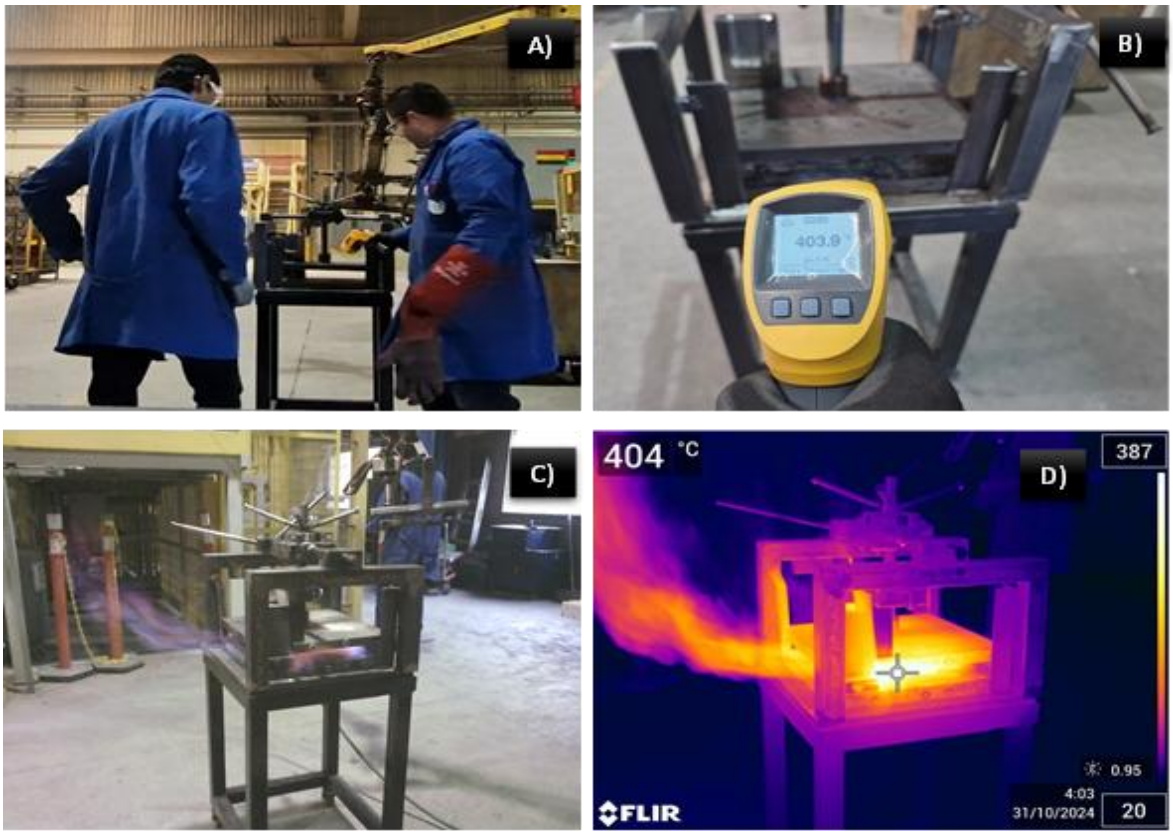


Figura 111: A) Medición de la temperatura del molde a una distancia de 50 cm, B) Nos indica a que temperatura se encuentra el molde después de calentarlo de los 60 min, C) Dirección que tiene que estar la llama para que caliente de forma completa el molde, D) Termo Cámara que permite saber las variaciones de temperatura en el proceso de calentamiento

El proceso empieza calentando un papel en los hornos que almacenan el aluminio (figura 108 A), se ingresa entre las tapas del molde levantándolo girando el vástago a una altura de 8 cm se ingresa el quemador y el papel en llamas; se abren las válvulas de gas junto con la de aire para un proceso de combustión y empiece a calentar (figura 112 B y figura 112 C).

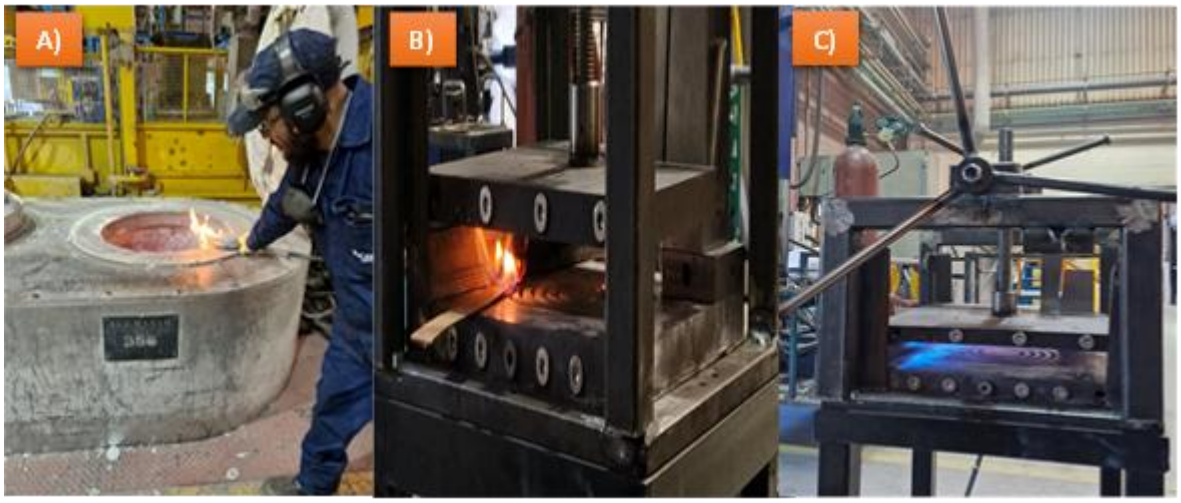


Figura 112: A), B) y C) Proceso de combustión con el nuevo proceso de industrialización del molde

La estructura permitió girar el molde a 90° (Figura 113 A) y así aplicar el proceso de granallado para eliminar cualquier residuo que tenga en la superficie.

La aplicación de sílice y grafito (Figura 113 B y Figura 113 C) para su protección y extracción de las piezas fundidas. Este proceso dura alrededor de 15-20 min por lo cual la temperatura del molde es aproximadamente de 110°C.

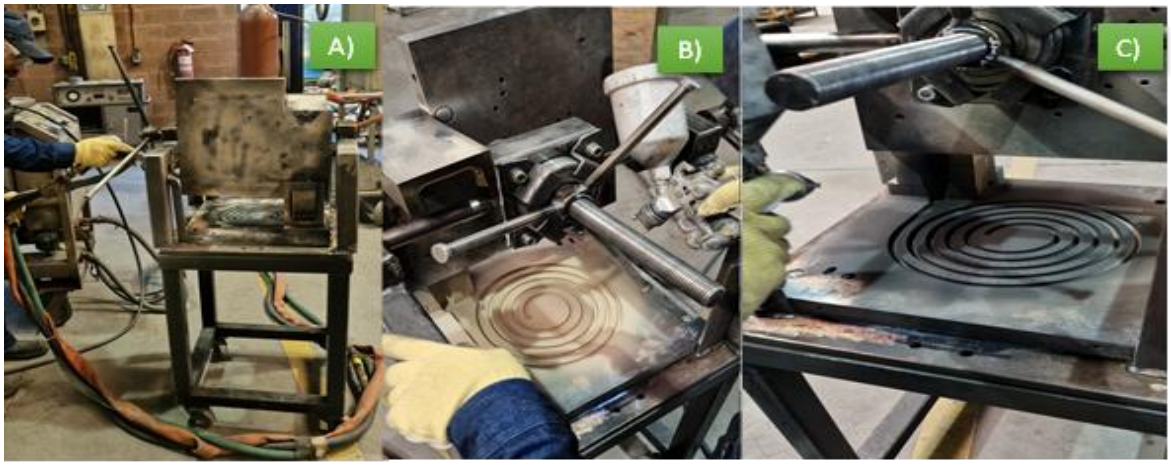


Figura 113: A) Giro de tapa móvil a 90°, B) y C) Fácil pintado con pintura de sílice y grafito a la tapa fija

Es necesario recalentar el molde después de granallarlo y pintarlo (figura 114), debido a que pierde temperatura en estas etapas. Esto se debe a que los procesos de granallado y aplicación de pinturas o recubrimientos pueden enfriar el molde



Figura 114: Recalentamiento del molde y calentamiento de la copa con su contra copa

El vaciado en el molde se realiza de 2 a 3 cm por encima de la copa de alimentación y contra copa (figura 115 A), se sube el molde hasta llegar al tope (26 cm) y se procede a sacar la prueba de fluidez (figura 115 B y figura 115 C).

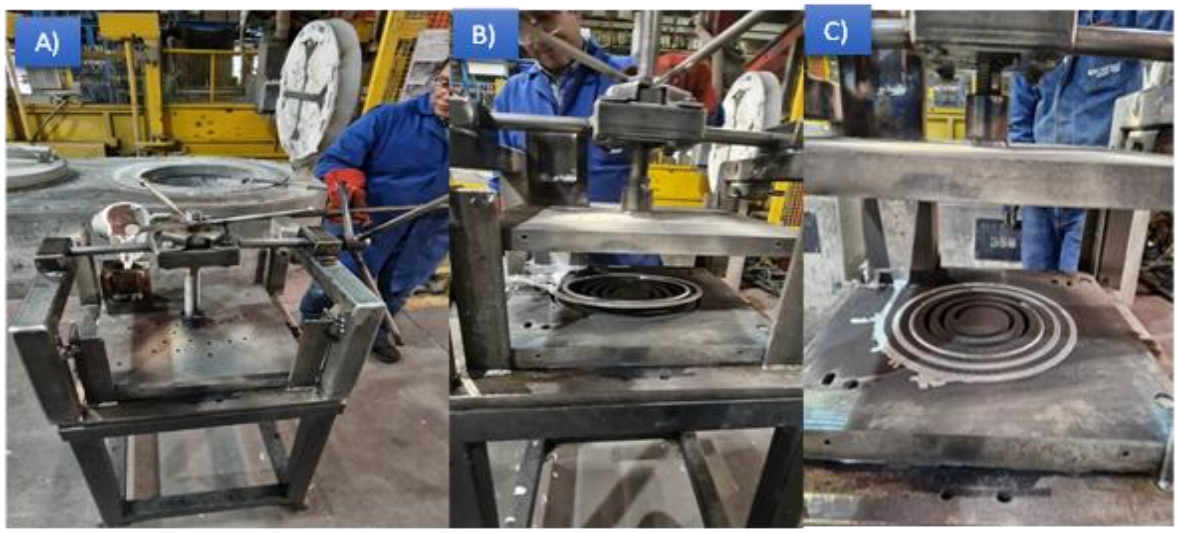


Figura 115: A) Vertido del aluminio en el molde, B) y C) Levantamiento de la tapa móvil para poder sacar la prueba de fluidez

3.1.15.1 Piezas obtenidas y sus análisis de recorrido

Las 3 primeras pruebas de vaciado con el proceso de industrialización implementado hacia el molde se presentan en la figura 116.

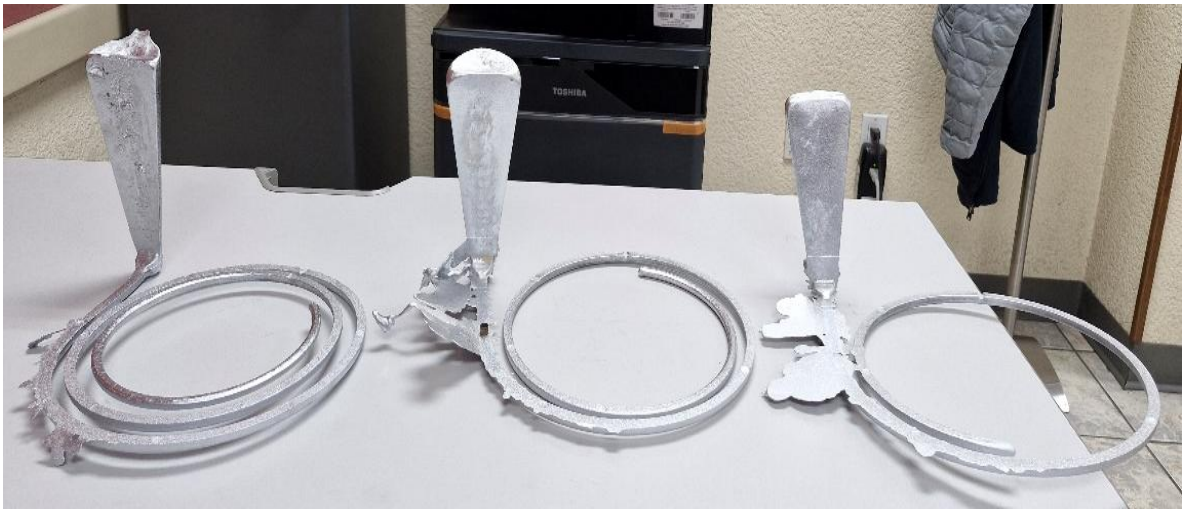


Figura 116: Primeras 3 pruebas de vaciado con el nuevo proceso

Primera prueba de vaciado en el molde fue de 170 cm (figura 117) de 234 cm que es el total de la geometría del espiral y a comparación de la simulación el líquido que se fugó en el molde fue del 3.95% del total que debía llenar.



Figura 117: Mejor primera prueba conseguida en el molde con un recorrido de 170 cm

El segundo vaciado tuvo un recorrido de 123 cm debido a que se siguen presentando fugas en la parte inicial del espiral (figura 118).



Figura 118:Prueba con presencia de fugas y separación de ventilas, el recorrido de esta segunda prueba fue de 123 cm

En la tercer prueba 93 cm las afectaciones de llenado se presentan en la entrada del molde debido a su comportamiento ante el calor del molde (se pandea) y algunos residuos de aluminio que quedan en la tapa fija del molde no permite su buen sellado (figura 119).

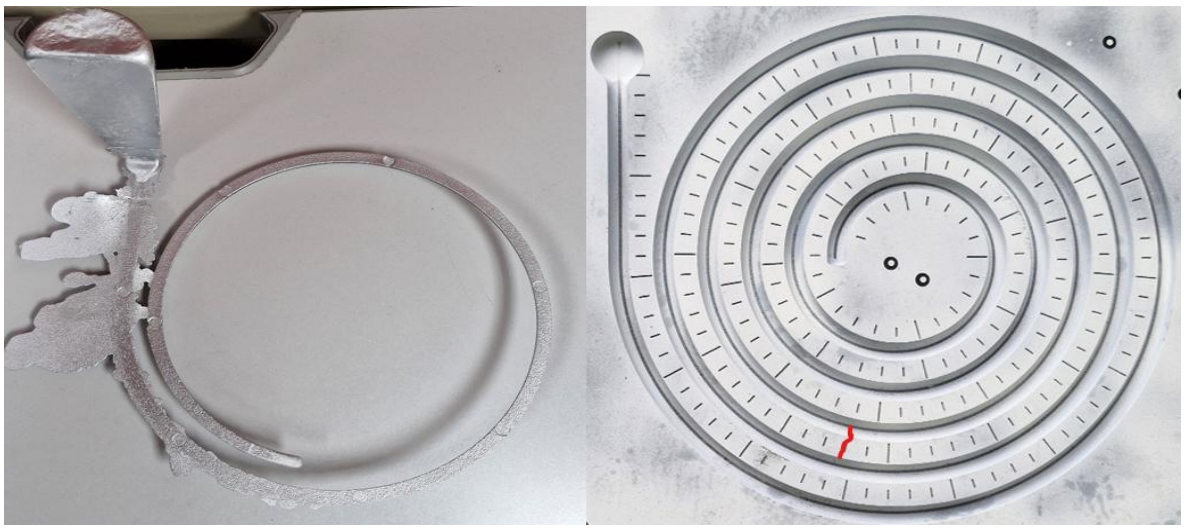


Figura 119: En la tercera prueba se presenta temperatura baja del molde, fugas y residuos que no permiten el buen sellado

La tabla 6 representa la primera prueba realizada en el molde (prueba presentada) con su antiguo proceso de abertura y cerrado; las siguientes del 1-9 son con el nuevo proceso de industrialización del molde demostrando su porcentaje de fluidez y algunas descripciones del porque está llegando a esa distancia conforme a su temperatura.

Tabla 6: Vaciadas/coladas con el nuevo sistema de industrialización en el molde y su longitud de flujo recorrido

Número de prueba de vaciado	**Longitud total del molde(cm)**	**Longitud de flujo alcanzada(cm)**	**Temperatura de vaciado(°C)**	**Porcentaje de fluidez (%)**	**Observaciones**
Prueba Presentada	238	109	400	46.58	Sin proceso de industrialización en el molde para un proceso productivo (cierre del molde con bisagras) y ligeras fugas
1	238	170	400	72.65	Flujo adecuado
2	234	123	380	52.56	Separación de ventila
3	234	93	320	39.74	Residuos en tapa fija y fuga
4	234	72	350	30.77	Fugas menores
5	234	78	280	33.33	Fugas menores y pandeo en la tapa móvil
6	234	107	350	45.73	Problemas de fuga
7	234	121	300	51.71	Problemas de fuga
8	234	102	280	43.59	Problemas de fuga
9	234	115	270	49.15	Problemas de fuga

La figura 120 muestra la variación en los recorridos obtenidos en cada experimento. Se observa que, a partir del primer experimento con un recorrido de 170 cm, los recorridos siguientes son menores. Esto puede deberse a diversos problemas identificados en las observaciones, como fugas en el molde, separación de ventilas y deformación del molde por la temperatura de calentamiento y enfriamiento ambiente.

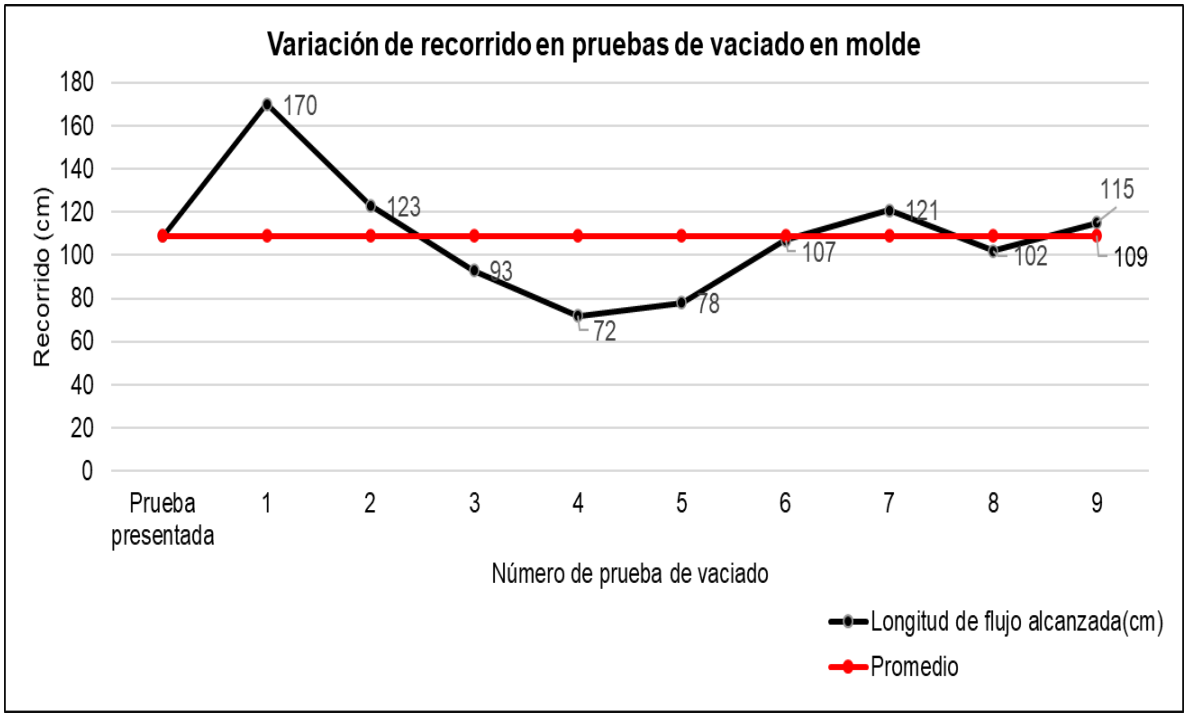


Figura 120: Pruebas con el proceso de industrialización del molde, incluido el mejor recorrido de 109 cm presentado con el antiguo proceso de vaciado

Para continuar con el proceso de pruebas de fluidez en el molde de espiral es necesario:

1) Examinar que no haya residuos de aluminio en la tapa fija del molde.
2) Aplicación de soldadura alrededor de la geometría de espiral y un grosor considerable de pintura para evitar fugas, que disminuyan el vaciado dentro del canal.
3) Realizar un diseño reforzado para soportar las limitaciones térmicas de calentamiento y vaciado de cada experimento.

3.1.15.2 Detección de problemas y soluciones posibles de llenado en la geometría de espiral

Las variaciones en la longitud de flujo alcanzada en el molde se deben a varios factores:

Las pruebas a mayor temperatura tienden a presentar mejor fluidez, ya que el metal está en estado líquido con una temperatura de 710°C y tiene una menor resistencia al flujo en el molde. A medida que la temperatura baja, el flujo disminuye, y las aleaciones muestran menor capacidad para llenar el molde por completo.

Las fugas, el pandeo del molde, y la separación de ventilas afectan considerablemente el llenado del espiral, se observó una deformación en el molde y problemas de sellado, la aleación no logra avanzar en el espiral esto se demuestra en la longitud de flujo (Figura 121 A, Figura 121 B, Figura 121 C y Figura 121 D).

La presencia de residuos de aluminio en la tapa fija del molde impide el buen sellado y causa problemas de flujo, como en la segunda y tercera prueba.

Las variaciones indican que para obtener un mayor porcentaje de fluidez se debe controlar la temperatura, es importante asegurar el buen estado del molde, evitando deformaciones, residuos y fugas.

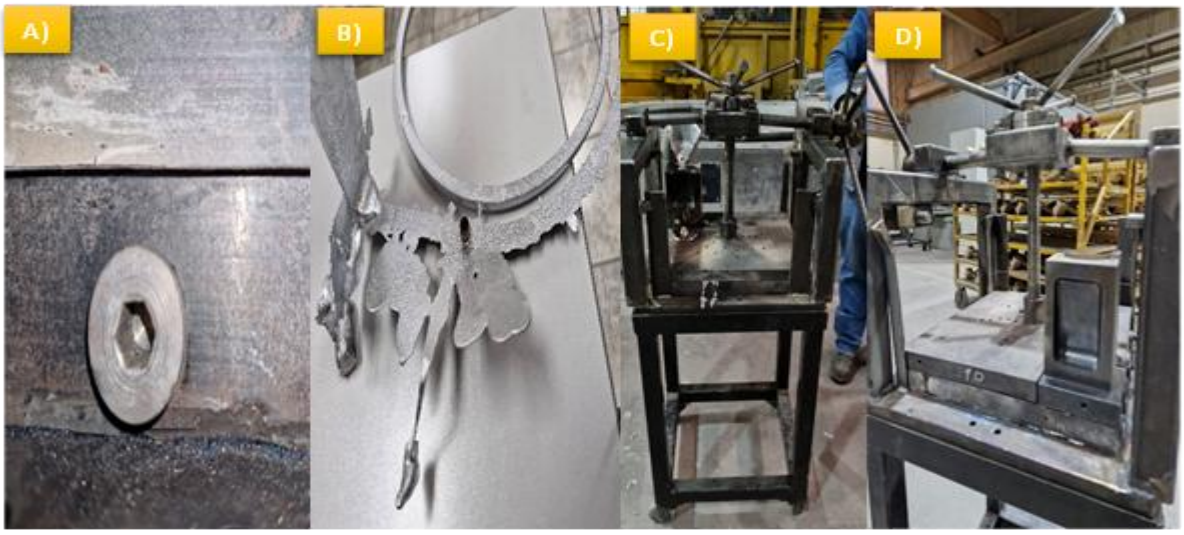


Figura 121: A) Sellado incompleto de las tapas del molde, B) Fugas del líquido, C) Desprendimiento de ventilas y residuos hacen que el líquido busque cualquier salida dentro del molde, D) Pandeo respecto a temperatura

Cuando se deja de calentar el molde a 350° C (figura 122 A), empieza a tener un proceso de enfriamiento continuo de 20°C por minuto (figura 122 B); se tenía que comprobar que las temperaturas de las copas para vaciar el fluido (aleación) y no haya diferencia térmica, por lo cual se notó que por la forma de calentamiento alcanzaban una temperatura de 375°C en la tapa fija y en la tapa móvil una temperatura de 345°C (figura 122 C y figura 122 D). Siendo temperaturas indicadas para su colado.

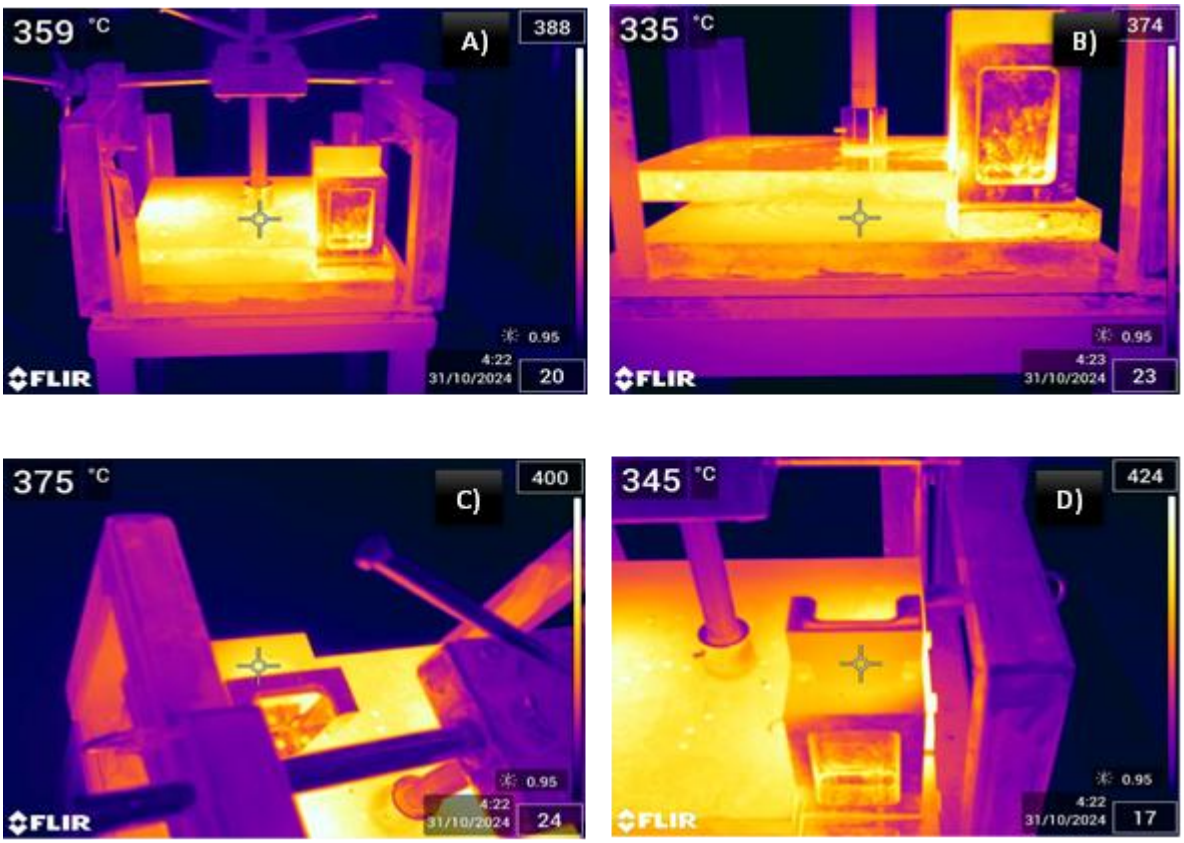


Figura 122: A), B): Punto central que señala la temperatura de las tapa móvil y fija del molde y C), D): Copa y contra copa se calientan a una temperatura óptima para poder vaciar

3.1.15.3 Análisis de composición química del molde

Se analizó una parte del molde (base de la copa) para analizar su composición química con un equipo Bruker (figura 123 A), se limpia la muestra y se coloca en una cámara de análisis vacía, se irradia con rayos x que interactúan con los átomos y genera automáticamente una lista los elementos de los cuales está compuesto el molde (figura 123 B).

El molde de acero aleado de cromo-manganeso proporcionan una buena resistencia a la corrosión, lo que evita la degradación del molde debido a la reacción química con la aleación. El acero se obtiene a partir del hierro mediante la adición de carbono. El carbono transforma el hierro en acero porque modifica la estructura cristalina y las propiedades del hierro.

El acero puede soportar temperaturas elevadas (hasta 700°C) sin sufrir deformaciones o pérdida de propiedades.

Las aleaciones de acero están compuestas principalmente de hierro, con adiciones de otros elementos como carbono, cromo, manganeso, silicio, entre otros, para modificar y mejorar sus propiedades. La presencia de hierro en una aleación es fundamental porque le da la estructura básica y la mayor parte de las características mecánicas del acero (resistencia, tenacidad, etc.).

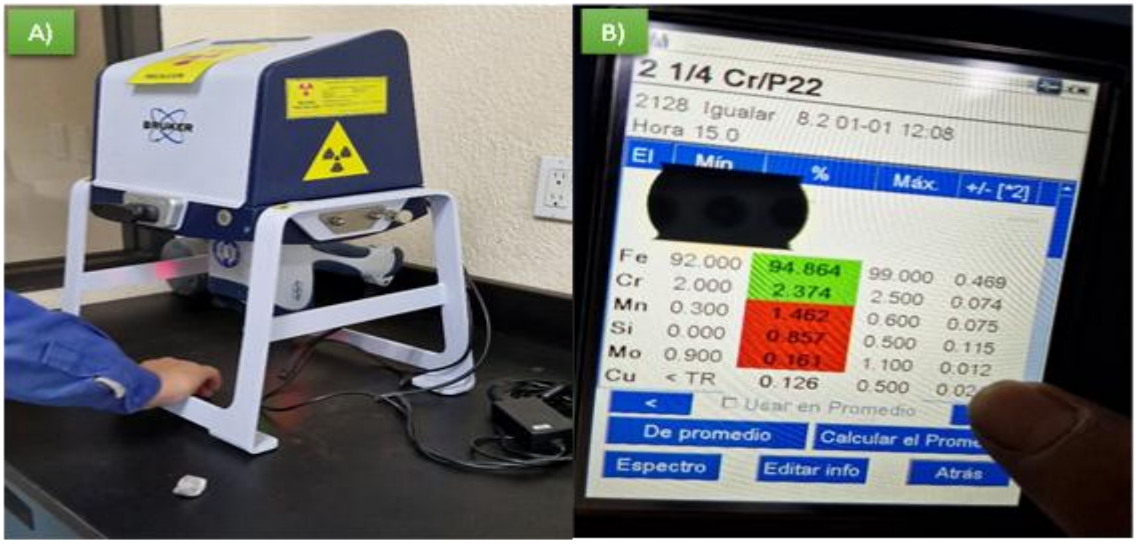


Figura 123: A) Equipo de rayos x bruker y B) Elementos contenidos en el molde

3.1.15.4 Soldadura para evitar fugas en el molde

La geometría de la espiral requiere una soldadura que siga su curvatura, debe de ser fuerte para resistir la presión y la temperatura del proceso de fundición, las 5 décimas (figura 124 A), B) y C)) es un espesor que garantiza la soldadura en la orilla que requiere el molde para evitar fugas presentes.

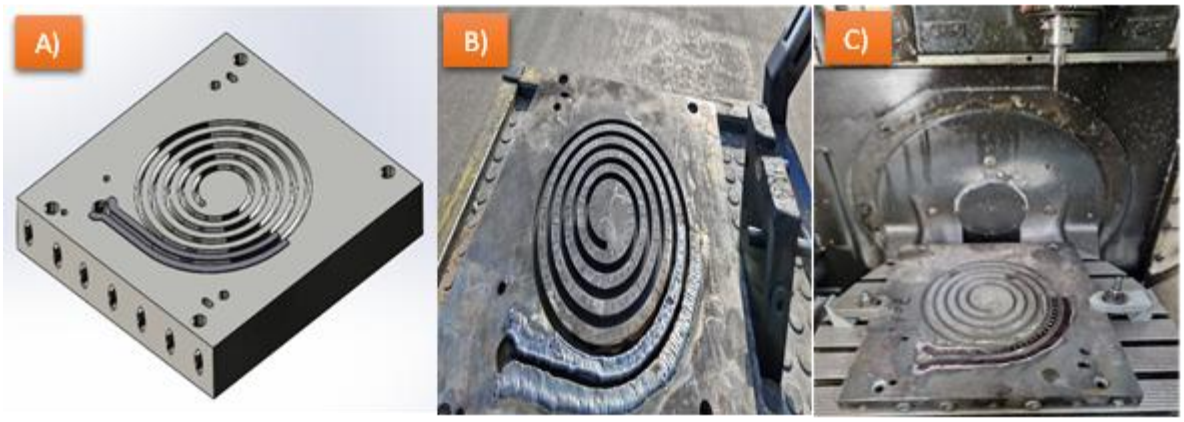


Figura 124: A) Demostración de donde se tenía que aplicar la soldadura en base a las pruebas de vaciado hechas en el molde, B) y C): Aplicación de soldadura y maquinado

La primera prueba con soldadura (figura 125) presentó fugas en la primera vuelta donde acaba la adición de material y en la parte interna del molde; se solucionaron las fugas que se detectaron al inicio debido a falta de sello en el molde (hueco que presenta entre las tapas por pandeo) y el corte chueco en la tapa de la copa debido a su maquinado, su recorrido fue de 175 cm.

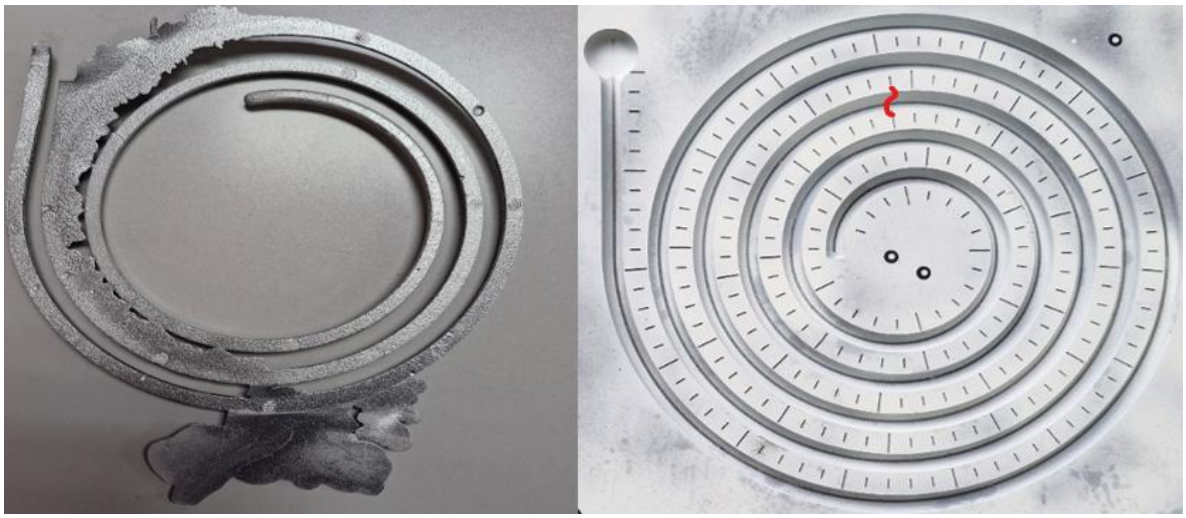


Figura 125: Recorrido de la aleación en prueba de fluidez con la adición de soldadura para evitar fugas, obteniendo un recorrido de 175 cm

Se hizo otra prueba agregando pintura de sílice en las partes donde fugaba, pero cuando se vaciaba esta se deterioraba, quemaba y desmoronaba; esto también tiene relación con el pandeo del molde ya que esta característica ayuda a expulsar el material. La prueba que se hizo tuvo un recorrido de 165 cm (figura 126).

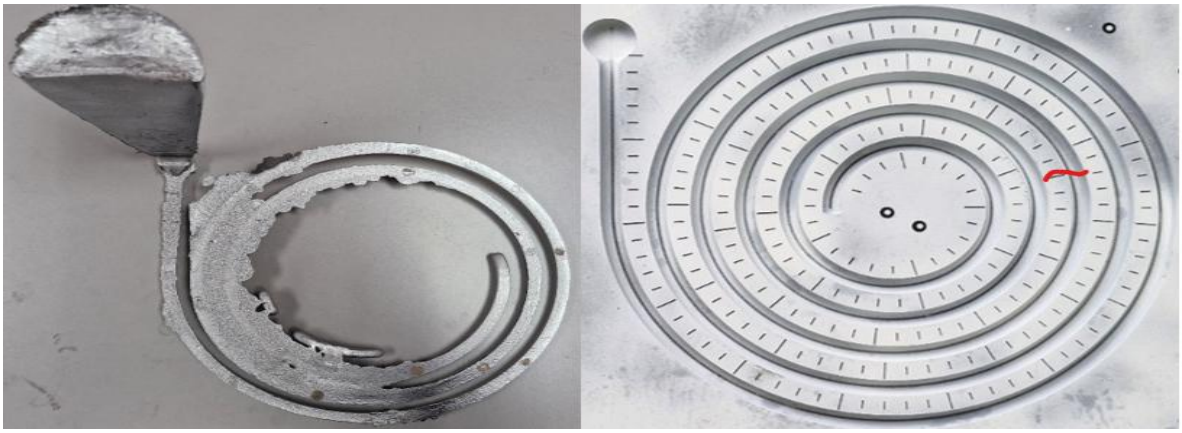


Figura 126: Aplicación de soldadura y sílice la prueba tuvo un recorrido de 165cm

La tabla 7 muestra las pruebas de fluidez que se hicieron con soldadura y aplicación de pintura.

Tabla 7: Comprobación y detección para evitar posibles fugas en el molde con soldadura y pintura

Número de prueba de vaciado	Longitud total del molde(cm)	Longitud de flujo alcanzada(cm)	Temperatura de vaciado(°C)	Porcentaje de fluidez (%)	Observaciones
10	238	175	400	74.78	Aplicación de 5 décimas de soldadura, fugas y separación de ventilas.
11	238	145	350	61.96	
12	238	165	400	70.51	Aplicación de 5 décimas de soldadura y pintura de sílice en donde se presenta fugas y separación de ventilas.
13	238	125	345	53.41	

Se actualiza la gráfica de pruebas demostrando que las últimas pruebas 10 y 12 mejoraron al tratar de solucionar las fugas con la soldadura y el pintado (figura 127), pero también muestra puntos que requieren atención, como el sellado y las temperaturas más bajas pueden estar relacionados con el comportamiento del material.

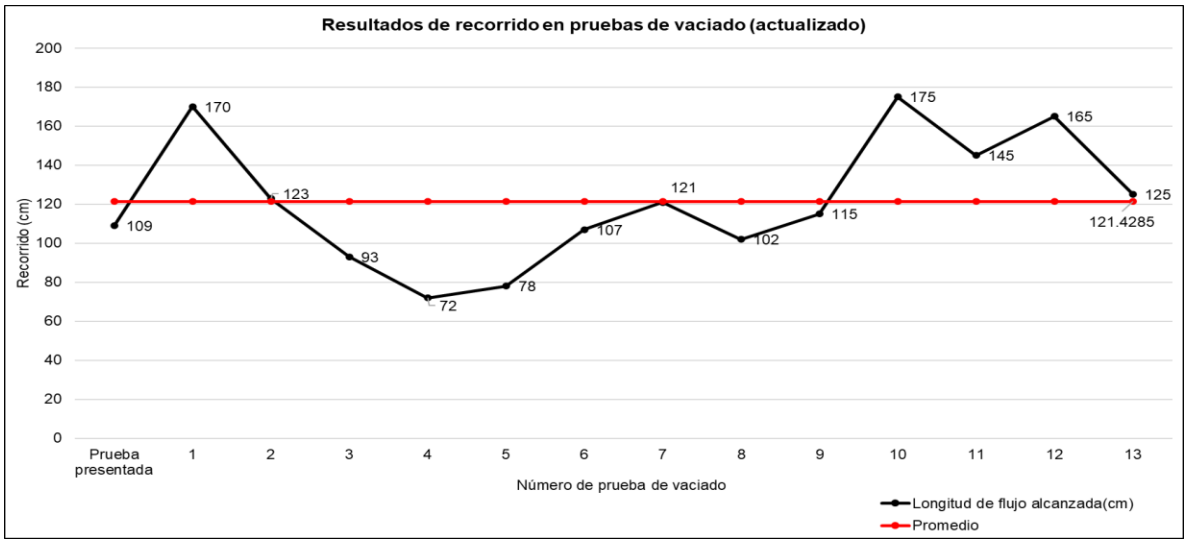


Figura 127: Gráfico actualizado de las mejoras de recorrido de fluidez en el molde al solucionar problemas de llenado

Para revisar el estado del molde se escaneo en el laboratorio GOM y conforme a la base de datos, existen diferencias de tolerancias, esto depende al color que marque (figura 128 A), B) y figura 129), si es rojo significa que el molde se encuentra con exceso de material o el amarillo señala anomalías en la superficie; por el contrario, si presenta color azul significa ausencia de material o desgaste.

El escaneo muestra que el detalle del molde no concuerda con la base de datos, es decir, el molde presenta irregularidades en la tapa fija y en la móvil.

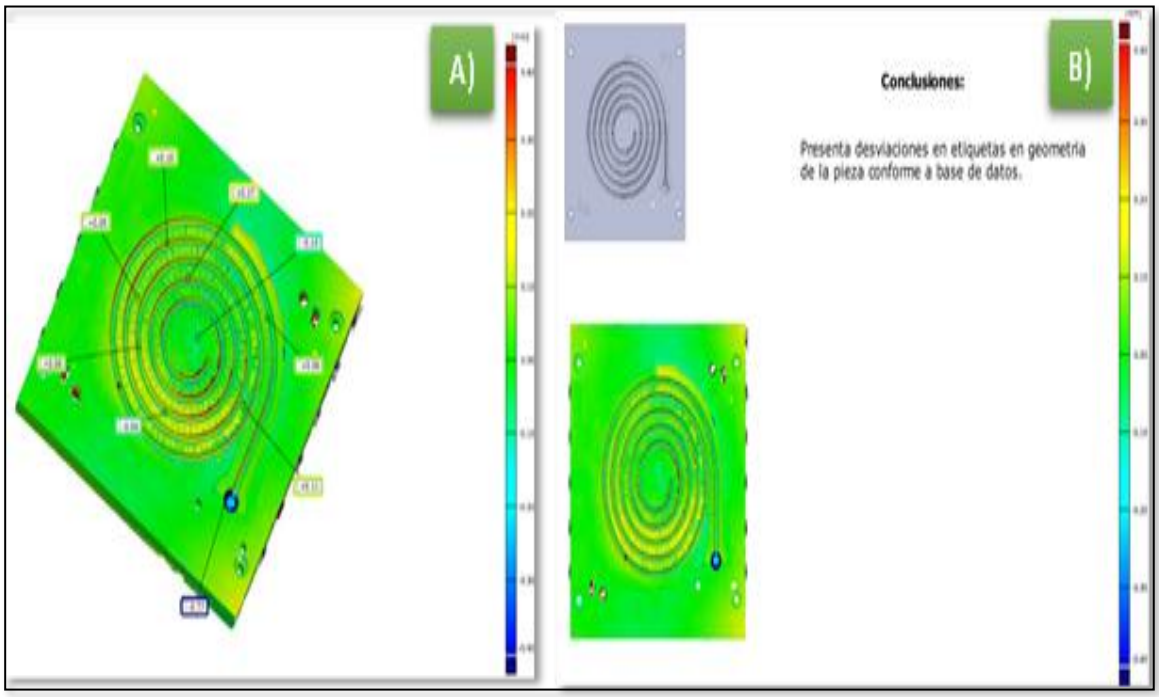


Figura 128: A) Tolerancias del molde después de su escaneo y B) Desviaciones en la geometría del molde

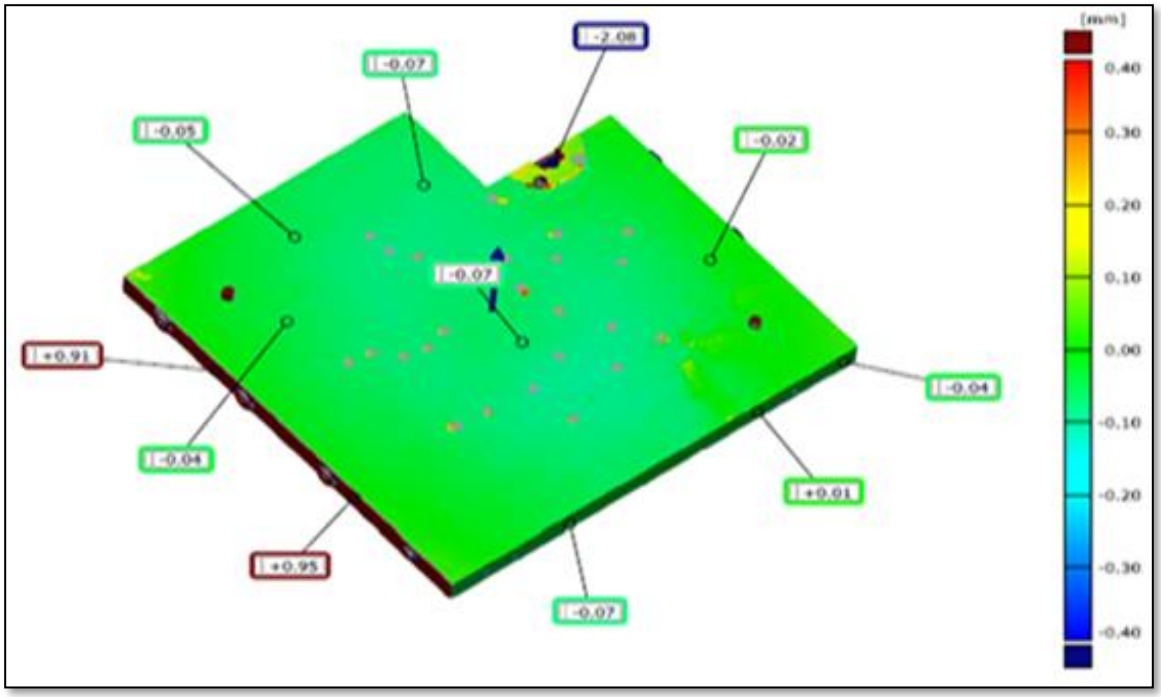


Figura 129: Las tolerancias en frío no son un factor crítico en el vaciado del molde. Deformaciones térmicas a altas temperaturas afecta al sellado y al vaciado.

3.1.15.5 Composición química del vaciado de las pruebas

La tabla 8 indica que la combinación de todos los elementos químicos realizada en un espectro de emisión óptica por chispa mostrando un resultado correspondiente a una aleación 356 (Al-Si), estas aleaciones son utilizadas en autopartes debido a su resistencia a la corrosión, buena ductilidad, fluidez y resistencia a la fatiga.

Tabla 8: Composición química de la aleación 356 de las pruebas de fluidez

Elemento	Porcentaje	Min. & Max.
Aluminio	91.97	----------
Silicio	7	± 0.50
Hierro	0.269	0.5
Cobre	0.171	0.2
Manganeso	0.194	0.6
Magnesio	0.206	0.4
Cromo	0.0239	-------
Níquel	0.0275	0.05
Zinc	0.0593	0.3
Titanio	0.0842	0.2
Plomo	0.0051	0.05
Estaño	0.0012	0.05
Estroncio	<0.00005	<0.00008 a <0.00120

Los porcentajes de la aleación y sus tolerancias de adición son importantes debido a que se establecen propiedades deseables y que cumplan con ciertos requerimientos mecánicos, los elementos modificadores como el silicio y el estroncio son los que se variarían en futuras pruebas.

Cada elemento agregado se indica en la tabla 9 y tiene una función clave para compensar las impurezas que se lleguen a presentar dentro del fluido:

Tabla 9: Descripción de elementos más importantes en la aleación 356

Elemento	Función dentro de la aleación
Aluminio	Proporciona densidad baja, buen conductor térmico y resistencia a la corrosión.
Silicio	Con su alto contenido mejora el llenado de las cavidades de un molde.
Magnesio	Reducción a las inclusiones de corrosión y su ductilidad.
Estroncio	Modifica la microestructura reduciendo la formación de partículas de silicio y su distribución
Cobre	Mejora la resistencia en dureza, pero en altas cantidades reduce la resistencia a la corrosión y reduce formación de óxidos.
Hierro	Aumenta la dureza y resistencia a la fatiga
Manganeso	Contrarresta los efectos dañinos del hierro (partículas de hierro que contrarrestan la ductilidad y la resistencia a la corrosión)
Titanio	Refina el grano haciendo una microestructura más compacta y resistente mecánica (ante las fuerzas aplicadas), mejor acabado superficial (lisa con granos más pequeños).
Níquel	Resistencia a altas temperaturas.

Este estudio está enfocado a analizar diferentes tipos de aleaciones 356 y 332 para las pruebas de fluidez; conforme a su recorrido dentro de la cavidad y su llenado, y se busca establecer los parámetros de temperatura, vaciado y la modificación de su composición química óptima para su vaciado y llenado del molde. Con lo anterior se espera obtener diferentes pruebas en serie con su proceso de industrialización.

3.1.16 Solución a los problemas de llenado e implementaciones

La solución más viable a las fugas de aluminio que presentaba el molde era cambiar el material del que estaba constituida la tapa móvil por una de acero H13 (figura 130A) y B)) y que fuera de utilidad ejerciendo una presión uniforme contra la tapa fija debido al mismo grosor de la placa.

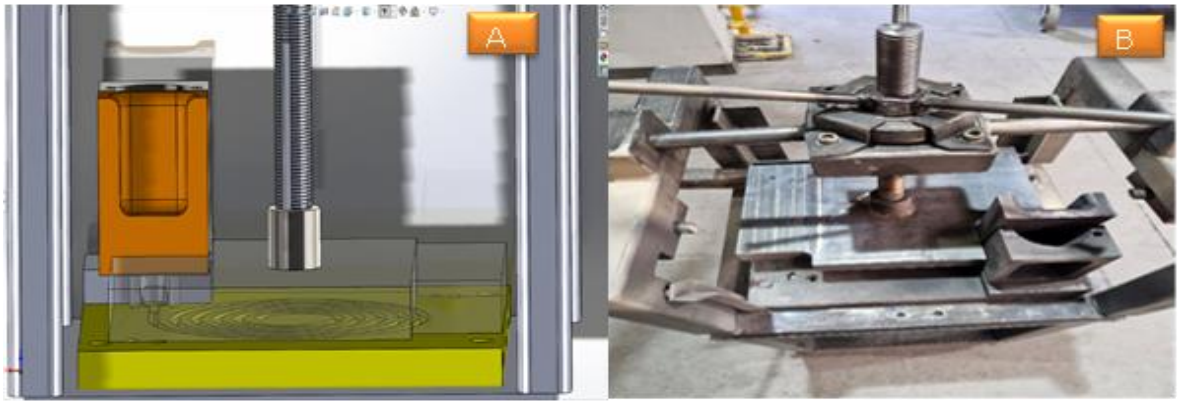


Figura 130: A) y B) Las dimensiones de la nueva placa móvil que permitió un correcto sellado fueron: 37 cm de ancho con la parte extra agregada por un ancho de 31 con un corte en L que coincidió con la parte fija y un espesor de 4.5 cm

La correcta adherencia de la pintura en el molde de fluidez es mantener la temperatura a 250°C con una aplicación de presión: 2-3 bares, a una distancia de rociado: 20-30 cm;

La pintura de sílice otorgó un grosor medido en promedio de 400 micras y la de grafito de 500 micras según se observa en las figuras 131A) y B), estas fueron tomadas con un espesómetro en diferentes puntos del molde.

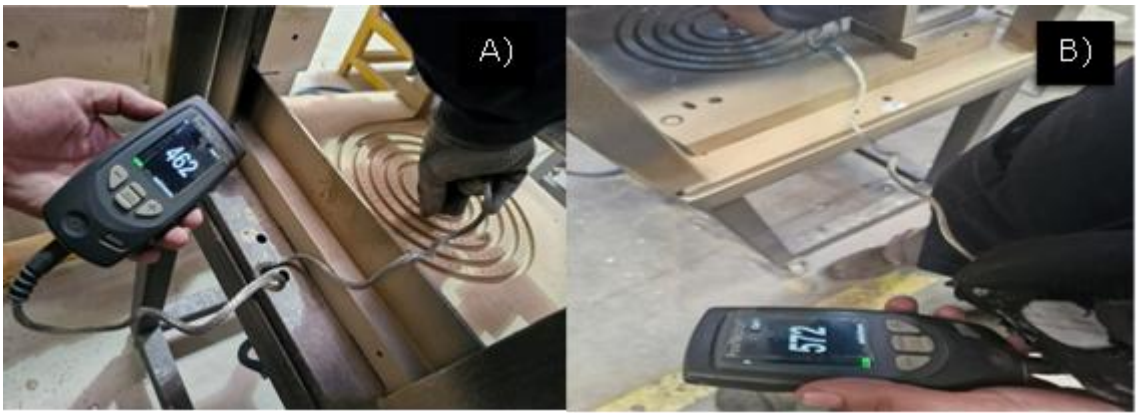


Figura 131: Medidas digitales a través de un espeso metro A) Pintura de sílice y B) Pintura de grafito pulverizado con una pistola de presión de aire a una temperatura de molde de 250°C

La verdadera importancia de extraer el metal fundido de la cavidad de este tipo de moldes permanentes cuando se realizan pruebas de fluidez, es la fabricación de una contra copa que contenga agujeros de forma cónica como se muestra en las figuras 132 A) y B). Su función es hacer que el aluminio vertido adopte la forma de los agujeros y así la prueba se extraiga del molde sin dificultades, actuando como anclaje (Figura 132 C).

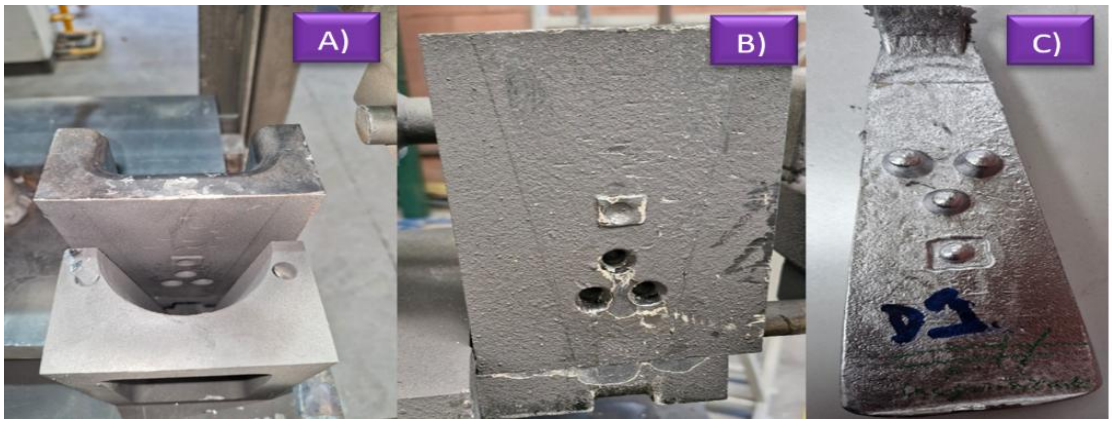


Figura 132: Figura 132: A) y B) posición del contra copa y de los orificios cónicos por donde entra el material, C) pieza de fundición con la forma de ancla para extraer completamente la prueba

En cada ciclo de colada, la prueba se estanca dentro de la cavidad del molde, para extraerla se debe ejercer una fuerza en sentido ascendente, en este caso con un vástago de 2 pulgadas que levanta la tapa móvil del molde junto con la contra copa, obligando a levantar el metal fundido. Como se muestra en las figuras 133A), B) y C), en diferentes pruebas realizadas.

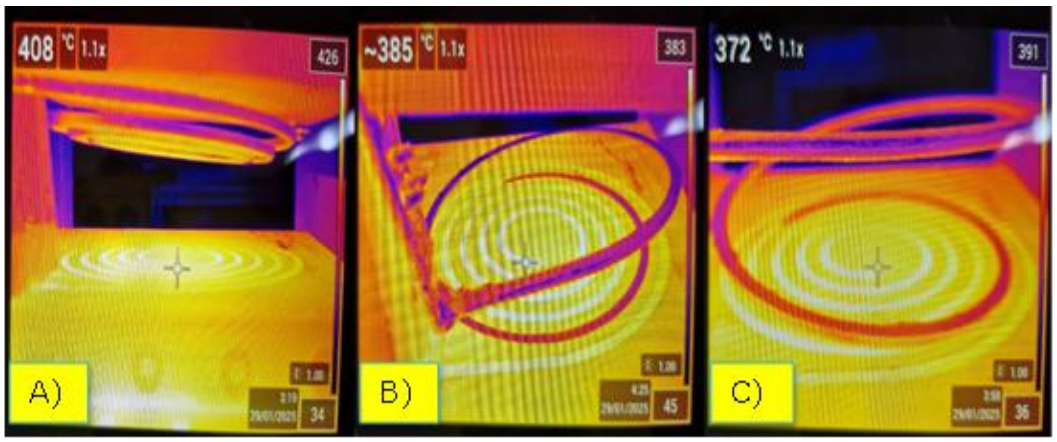


Figura 133: A) Extracción de una prueba en espiral con el sistema de anclaje creado, a diferentes temperaturas 408°C, B) 385°C y C) 372°C.

Fue necesario implementar un quemador extra, debajo de la mesa móvil donde se atornillo el molde (Figura 134 A), se mantuvo una temperatura constante y se presentó una transferencia de calor de 400°C hasta 500°C como se muestra en la figura 134 B) y C).



Figura 134: A) Quemador de estrella industrial, B) y C) Calentamiento por debajo y transferencia de calor en las superficies del molde.

3.1.17 Influencia de la temperatura respecto a la fluidez de la aleación 356

La tabla 10 indica las diferentes pruebas realizadas en el molde de espiral, sus recorridos de fluidez en base a las diferentes temperaturas del molde, metal y a una temperatura de 688-690°C desgasificada. En los ciclos de vaciado del 1 al 12 es notorio que el recorrido disminuye por el grado térmico del molde; cuando se mantiene un rango de temperatura la fluidez ronda a una distancia mayor de 70 cm.

Tabla 10: Recorridos de fluidez de la aleación 356 desgasificado a una temperatura de 688-690°C.

Aleación 356 D (temperatura 688-690 °C)							
Numeración	Temperatura de molde (°C)	Temperatura de metal (°C)	Recorrido (cm)	Promedio de recorrido (°C)	Valor mínimo (cm)	Valor máximo (cm)	Desviación estándar
1	385	688	133	79.2	44	133	± 20.9784
2	342	688	97	79.2	44	133	± 20.9784
3	299	688	86	79.2	44	133	± 20.9784
4	269	688	87	79.2	44	133	± 20.9784
5	240	688	52	79.2	44	133	± 20.9784
6	225	688	53	79.2	44	133	± 20.9784
7	414	688	107	79.2	44	133	± 20.9784
8	336	688	103	79.2	44	133	± 20.9784
9	307	688	71	79.2	44	133	± 20.9784
10	277	688	81	79.2	44	133	± 20.9784
11	246	688	50	79.2	44	133	± 20.9784
12	225	688	44	79.2	44	133	± 20.9784
13	316	690	117	79.2	44	133	± 20.9784
14	330	690	62	79.2	44	133	± 20.9784
15	353	690	58	79.2	44	133	± 20.9784
16	368	690	77	79.2	44	133	± 20.9784
17	387	690	86	79.2	44	133	± 20.9784
18	396	690	88	79.2	44	133	± 20.9784
19	398	690	76	79.2	44	133	± 20.9784
20	390	690	68	79.2	44	133	± 20.9784
21	386	690	67	79.2	44	133	± 20.9784
22	401	690	53	79.2	44	133	± 20.9784
23	390	690	110	79.2	44	133	± 20.9784
24	388	690	75	79.2	44	133	± 20.9784
25	392	690	69	79.2	44	133	± 20.9784
26	394	690	81	79.2	44	133	± 20.9784
27	388	690	71	79.2	44	133	± 20.9784
28	383	690	87	79.2	44	133	± 20.9784
29	390	690	82	79.2	44	133	± 20.9784
30	394	690	85	79.2	44	133	± 20.9784

La figura 135 es un gráfico 3D de superficie o también llamados “sábanas” que permiten visualizar al mismo tiempo tres parámetros analizados: recorrido del fluido, temperatura del molde y temperatura del metal en un proceso de industrialización de moldes para pruebas de fluidez.

La parte frontal muestra el comportamiento del metal a diferentes vaciados en el molde (color azul marino), no muestra la temperatura, por eso se marca con ese color a 0°C, al mismo tiempo se vincula con la temperatura del molde (color amarillo y gris) porque abarca temperaturas de 200°C a 400°C y en la parte inferior está la temperatura del metal (color azul oscuro) que parece permanecer constante, pero en este caso también se manejan temperaturas de 680°C a 690°C.

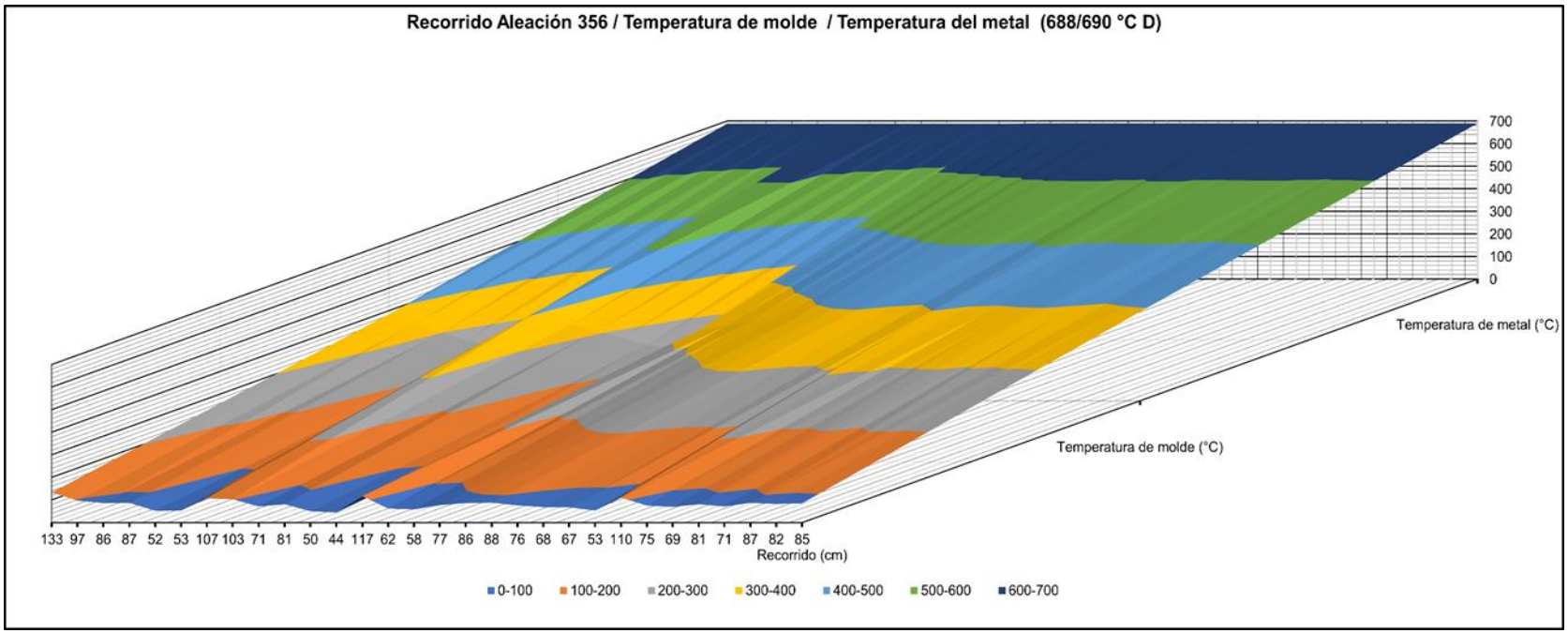


Figura 135: Gráfico de superficie 3D de la trayectoria del flujo a una temperatura desgasificada de 688-690°C

Los gráficos de líneas con marcadores ayudan a correlacionar el paso de flujo y la temperatura específica a la que se tomó el número de colada, esto da más información para identificar los valores máximos y mínimos, su desviación estándar y la fluidez promedio.

La figura 136 muestra que existe una línea morada, esto nos indica que anteriormente el molde estaba siendo utilizado sin quemador lo cual detalla la pérdida de recorrido de fluidez conforme disminuye la temperatura, a partir del número de prueba trece los valores se mantienen constantes (línea negra), los picos irregulares que se notan se deben al granallado y aplicación de pintura de grafito al molde; ya que el promedio total de fluidez para baja temperatura con desgasificación es de 79.2 cm.

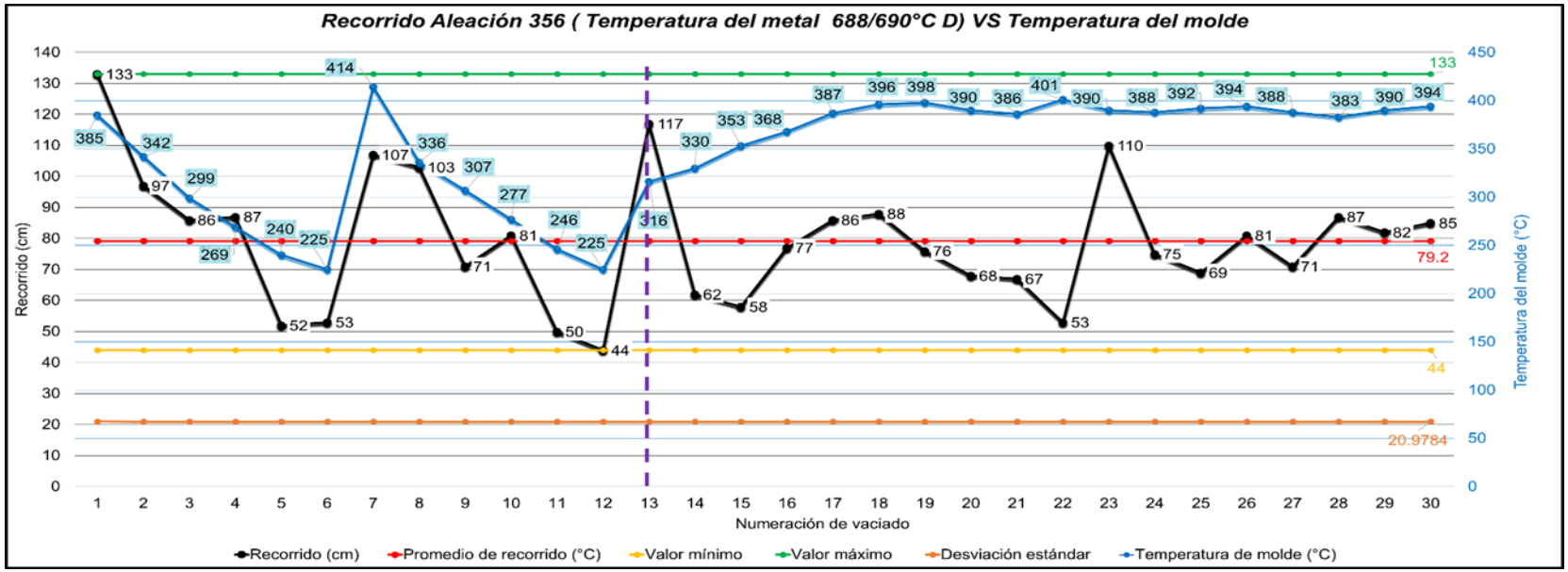


Figura 136:Gráfico lineal con marcadores de la trayectoria del flujo a una temperatura de 690°C con desgasificación

La siguiente tabla 11 muestra las diferentes pruebas realizadas en el molde de espiral, sus recorridos de fluidez en base a las diferentes temperaturas del molde y metal, a una temperatura de 690°C sin desgasificar.

El valor máximo de 117cm es debido a que la superficie del molde no tiene nada de impurezas, estas son eliminadas por el granallado y la aplicación de pintura sin desgaste entonces cuando se vierte el líquido fluye libremente sin obstrucciones.

Tabla 11: Recorridos de fluidez de la aleación 356 sin desgasificar a una temperatura de 690°C.

Aleación 356 SD (temperatura 690°C)							
Numeración	Temperatura de molde (°C)	Temperatura de metal (°C)	Recorrido (cm)	Promedio de recorrido (°C)	Valor mínimo (cm)	Valor máximo (cm)	Desviación estándar
1	343	690	117	71.5833	54	117	± 17.2861
2	350	690	68	71.5833	54	117	± 17.2861
3	352	690	75	71.5833	54	117	± 17.2861
4	349	690	65	71.5833	54	117	± 17.2861
5	351	690	84	71.5833	54	117	± 17.2861
6	353	690	54	71.5833	54	117	± 17.2861
7	363	690	60	71.5833	54	117	± 17.2861
8	366	690	54	71.5833	54	117	± 17.2861
9	364	690	75	71.5833	54	117	± 17.2861
10	370	690	76	71.5833	54	117	± 17.2861
11	372	690	57	71.5833	54	117	± 17.2861
12	374	690	74	71.5833	54	117	± 17.2861

Se realizaron 12 pruebas extras según lo ilustrado en la figura 137 para diferenciar lo que sucede cuando el metal se desgasifica, el comportamiento del metal a diferentes coladas en el molde (color azul claro) hacen que la gráfica no tenga tanta ondulación, esto quiere decir que los valores están agrupados; también están ligados a la temperatura del molde (color amarillo) abarcando temperaturas de 300°C a 400°C y al fondo del gráfico se tiene la temperatura del metal (color azul marino), se mantiene constante la temperatura del metal 690°C.

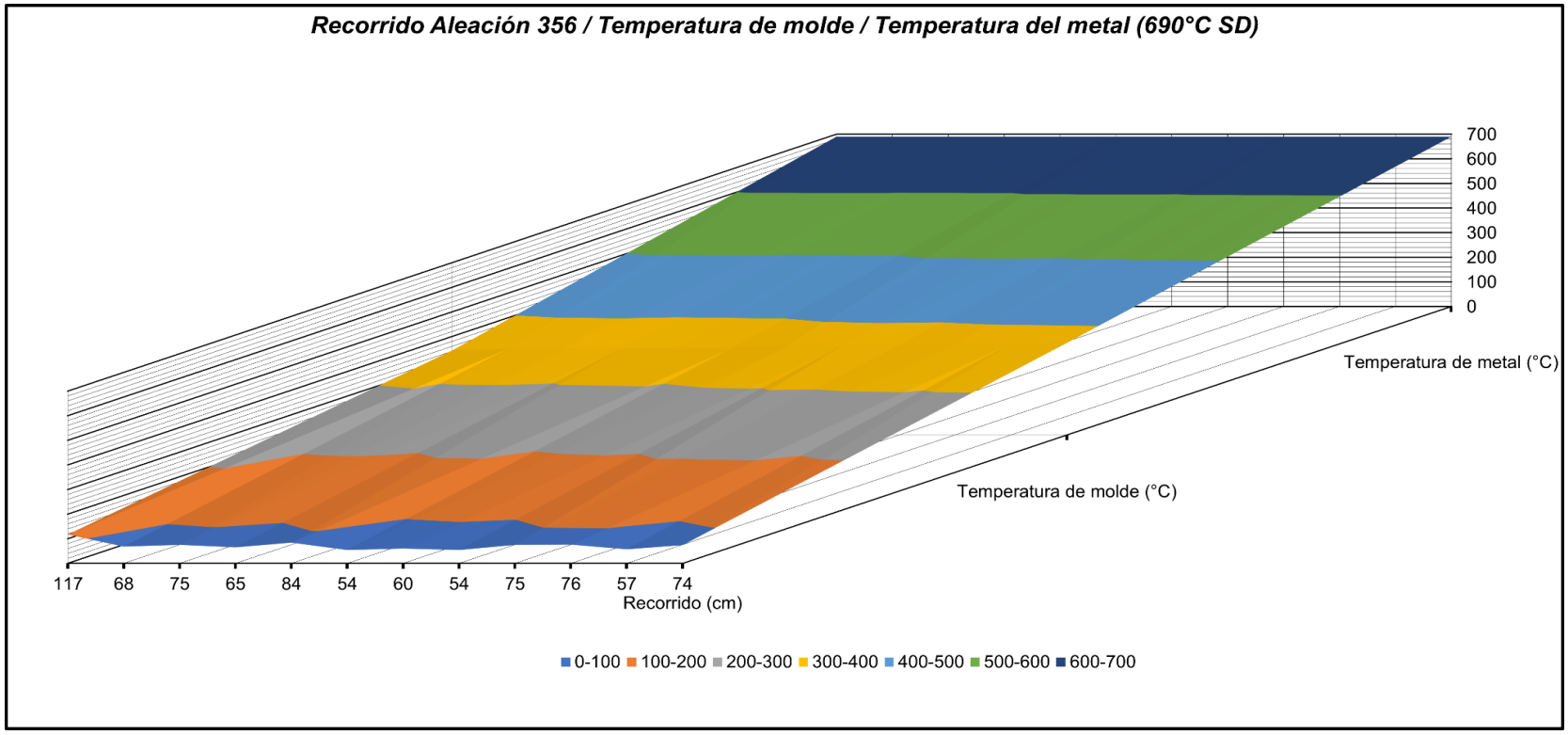


Figura 137: Gráfico de superficie 3D de la trayectoria del flujo a una temperatura sin desgasificación a 690°C

Sin desgasificar la aleación y a baja temperatura con el uso del quemador, los datos de registro de flujo son más consistentes ya que la temperatura es constante alrededor de 359 °C, el promedio registrado fue de 71.5833 cm; cuando el molde es granallado, la primera lectura es más alta (Figura 138) que las anteriores porque no hay desgaste en la pintura o residuos de aluminio en la cavidad.

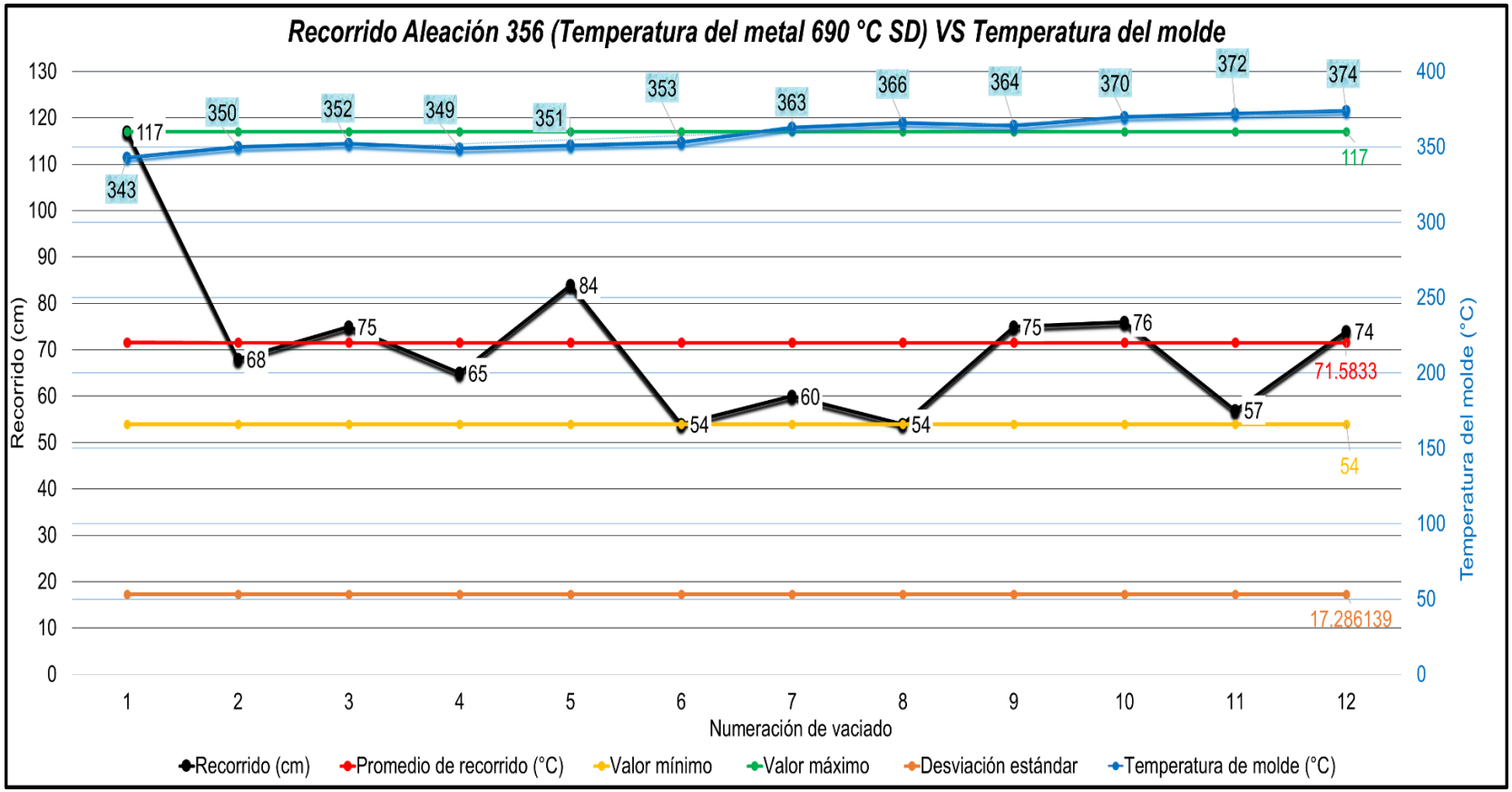


Figura 138: Gráfico lineal con marcadores de la trayectoria del flujo a una temperatura de 690°C sin desgasificación

Los resultados de los recorridos presentados en la tabla 12 muestra que, al disminuir la temperatura del molde, dichos recorridos en esta temperatura de metal también disminuían, fue importante mantener o incrementar la temperatura del molde para mantener un comportamiento similar en el fluido.

Tabla 12: Recorridos de fluidez de la aleación 356 desgasificado a una temperatura de 710°C.

Aleación 356 D (temperatura 710°C).							
Numeración	**Temperatura de molde (°C)**	**Temperatura de metal (°C)**	**Recorrido (cm)**	**Promedio de recorrido (°C)**	**Valor mínimo (cm)**	**Valor Máximo (cm)**	**Desviación estándar**
1	346	710	147	114.9259	65	190	± 31.6530
2	308	710	116	114.9259	65	190	± 31.6530
3	298	710	76	114.9259	65	190	± 31.6530
4	274	710	72	114.9259	65	190	± 31.6530
5	264	710	90	114.9259	65	190	± 31.6530
6	253	710	65	114.9259	65	190	± 31.6530
7	338	710	190	114.9259	65	190	± 31.6530
8	292	710	128	114.9259	65	190	± 31.6530
9	267	710	83	114.9259	65	190	± 31.6530
10	226	710	81	114.9259	65	190	± 31.6530
11	220	710	104	114.9259	65	190	± 31.6530
12	191	710	90	114.9259	65	190	± 31.6530
13	365	710	104	114.9259	65	190	± 31.6530
14	364	710	98	114.9259	65	190	± 31.6530
15	375	710	108	114.9259	65	190	± 31.6530
16	397	710	111	114.9259	65	190	± 31.6530
17	408	710	180	114.9259	65	190	± 31.6530
18	396	710	135	114.9259	65	190	± 31.6530
19	377	710	138	114.9259	65	190	± 31.6530
20	372	710	151	114.9259	65	190	± 31.6530
21	368	710	152	114.9259	65	190	± 31.6530
22	361	710	118	114.9259	65	190	± 31.6530
23	394	710	130	114.9259	65	190	± 31.6530
24	396	710	126	114.9259	65	190	± 31.6530
25	398	710	113	114.9259	65	190	± 31.6530
26	400	710	81	114.9259	65	190	± 31.6530
27	397	710	116	114.9259	65	190	± 31.6530

La figura 139 representa una trayectoria de flujo de colada continua para la aleación desgasificada presentada en la parte frontal del gráfico, las líneas en el centro indican las temperaturas que se están produciendo en el molde indicando un rango de 200°C a 400°C (color amarillo y gris), en la parte inferior de la hoja se tiene la línea recta que es la temperatura del metal estando a 710 °C (color vino).

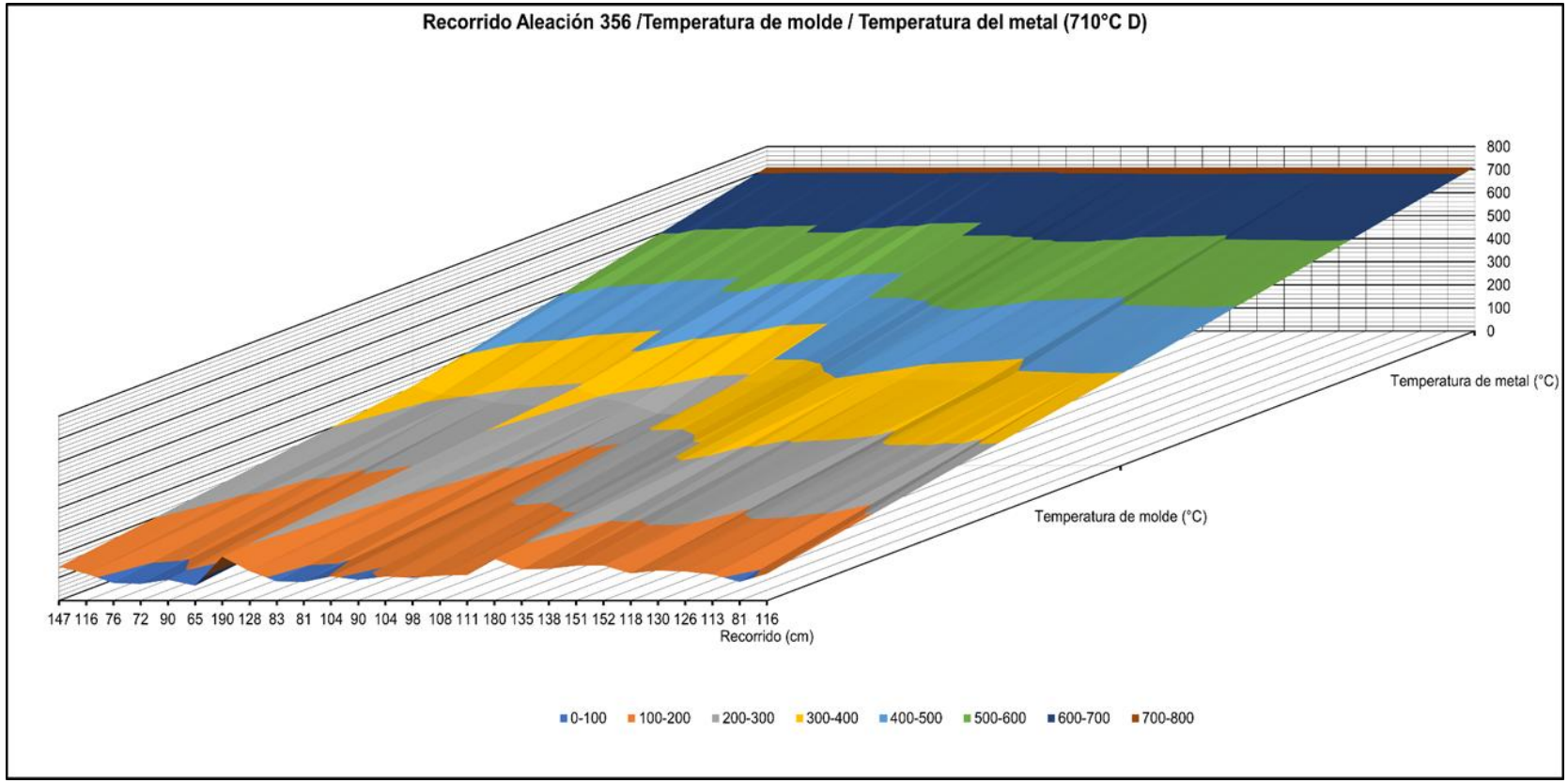


Figura 139: Gráfico de superficie 3D de la trayectoria del flujo a una temperatura desgasificada de 710°C.

El comportamiento del fluido es ascendente desde antes del quemador debido a la influencia de la limpieza del molde y al tener altas temperaturas aumenta el recorrido (Figura 140). La media del recorrido de tener el metal a 710°C es de 114.9259 cm con un valor máximo de 190 y un valor mínimo debido a la calidad de la pintura y el enfriamiento.

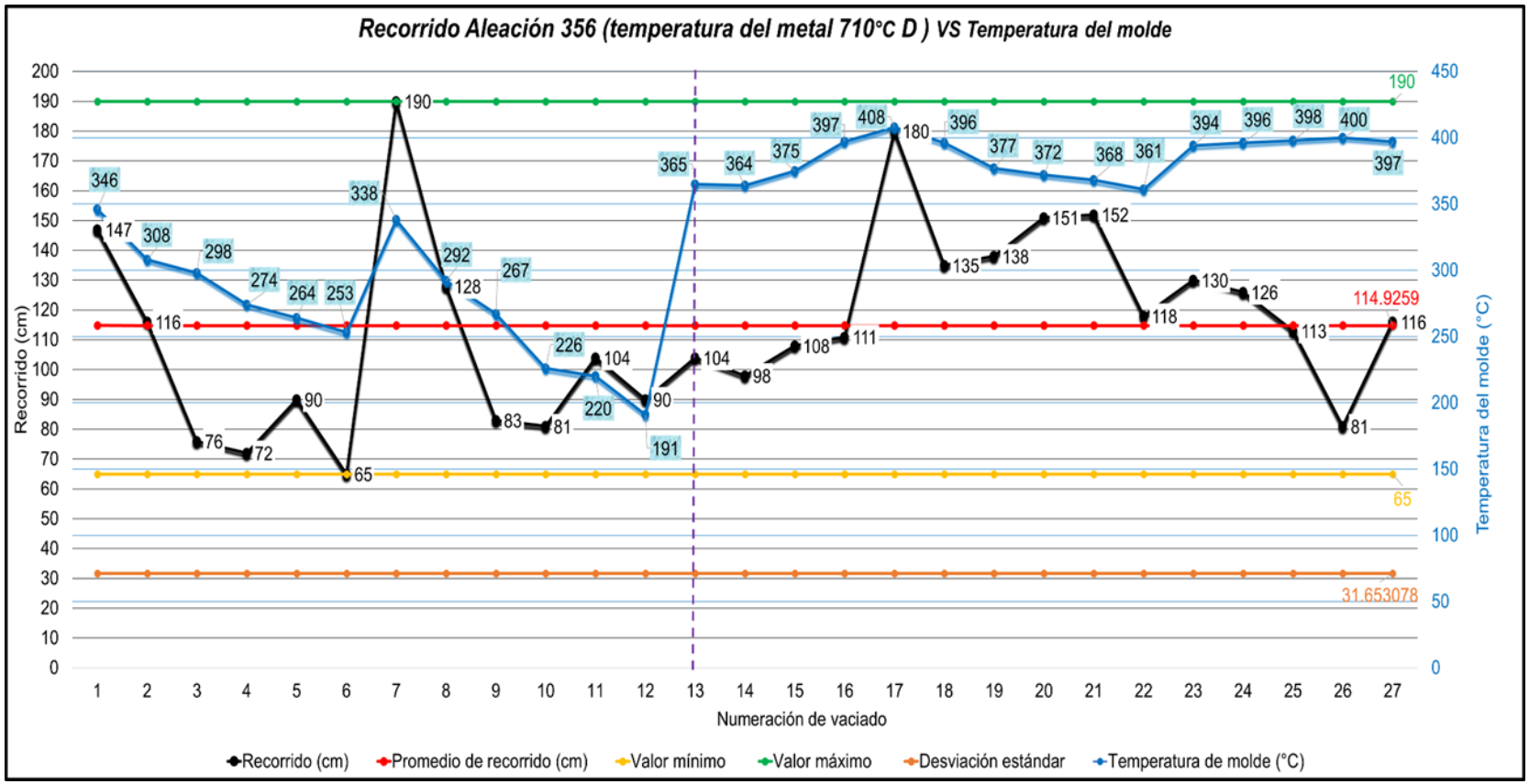


Figura 140: Gráfico lineal con marcadores de la trayectoria del flujo a una temperatura de 710°C con desgasificación

En las diferentes pruebas realizadas en el molde de espiral (tabla 13), se nota la varianza en los recorridos de fluidez en base a las diferentes temperaturas del molde y metal, a una temperatura de 690°C sin desgasificar. La temperatura del molde incrementaba, sin embargo, la fluidez se mantenía en un rango de 67.45 cm de vaciado por prueba.

Tabla 13: Recorridos de fluidez de la aleación 356 sin desgasificar a una temperatura de 710°C.

Aleación 356 SD (Temperatura 710°C)							
Numeración	**Temperatura de molde (°C)**	**Temperatura de metal (°C)**	**Recorrido (cm)**	**Promedio de recorrido (°C)**	**Valor mínimo (cm)**	**Valor máximo (cm)**	**Desviación estándar**
1	350	710	132	95.8148	68	132	± 13.4993
2	319	710	111	95.8148	68	132	± 13.4993
3	287	710	103	95.8148	68	132	± 13.4993
4	220	710	81	95.8148	68	132	± 13.4993
5	211	710	102	95.8148	68	132	± 13.4993
6	179	710	68	95.8148	68	132	± 13.4993
7	369	710	111	95.8148	68	132	± 13.4993
8	323	710	103	95.8148	68	132	± 13.4993
9	298	710	99	95.8148	68	132	± 13.4993
10	262	710	79	95.8148	68	132	± 13.4993
11	230	710	93	95.8148	68	132	± 13.4993
12	190	710	71	95.8148	68	132	± 13.4993
13	378	710	115	95.8148	68	132	± 13.4993
14	364	710	93	95.8148	68	132	± 13.4993
15	357	710	106	95.8148	68	132	± 13.4993
16	372	710	91	95.8148	68	132	± 13.4993
17	374	710	88	95.8148	68	132	± 13.4993
18	382	710	85	95.8148	68	132	± 13.4993
19	388	710	103	95.8148	68	132	± 13.4993
20	397	710	99	95.8148	68	132	± 13.4993
21	396	710	97	95.8148	68	132	± 13.4993
22	399	710	92	95.8148	68	132	± 13.4993
23	402	710	100	95.8148	68	132	± 13.4993
24	402	710	95	95.8148	68	132	± 13.4993
25	409	710	88	95.8148	68	132	± 13.4993
26	408	710	87	95.8148	68	132	± 13.4993
27	404	710	95	95.8148	68	132	± 13.4993

La temperatura que corresponde al molde se indica desde los 100°C a los 400°C (de naranja a azul claro), pero en la parte inferior la temperatura del metal sigue siendo la misma 710°C, las ondulaciones son pronunciadas por los recorridos desiguales lo que implica que la fluidez altera los promedios de vaciado.

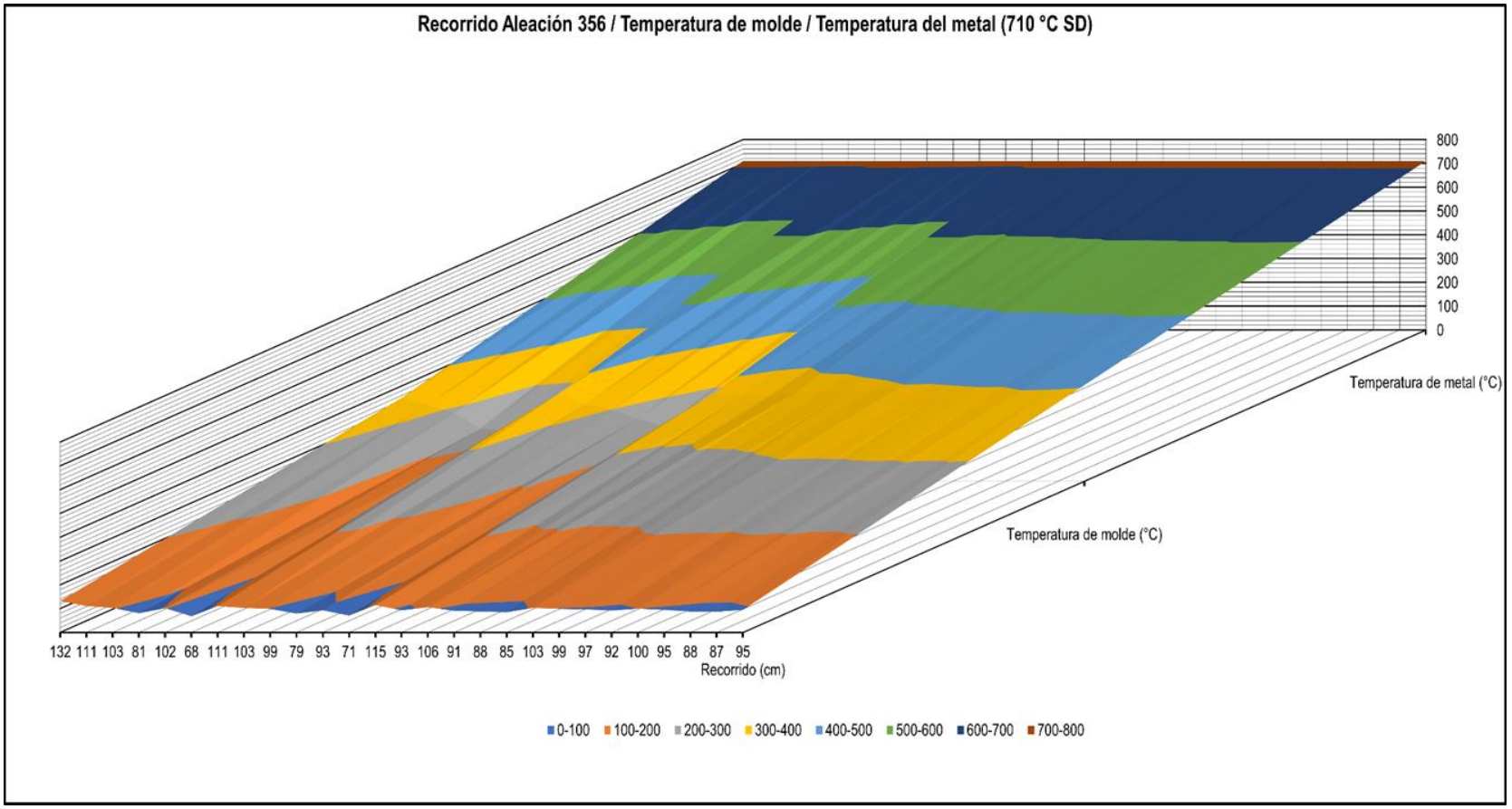


Figura 141: Trazado en 3D de la superficie de la trayectoria del flujo a una temperatura de 710°C sin desgasificación

El recorrido máximo registrado al principio marca la diferencia en el rendimiento del quemador y el recorrido de fluidez que se encuentra en condiciones “ideales” para el vaciado, al no haber impurezas incrustadas en el líquido. El caudal medio es de 95.8148 cm sin desgasificación a una temperatura de 710°C según la figura 142.

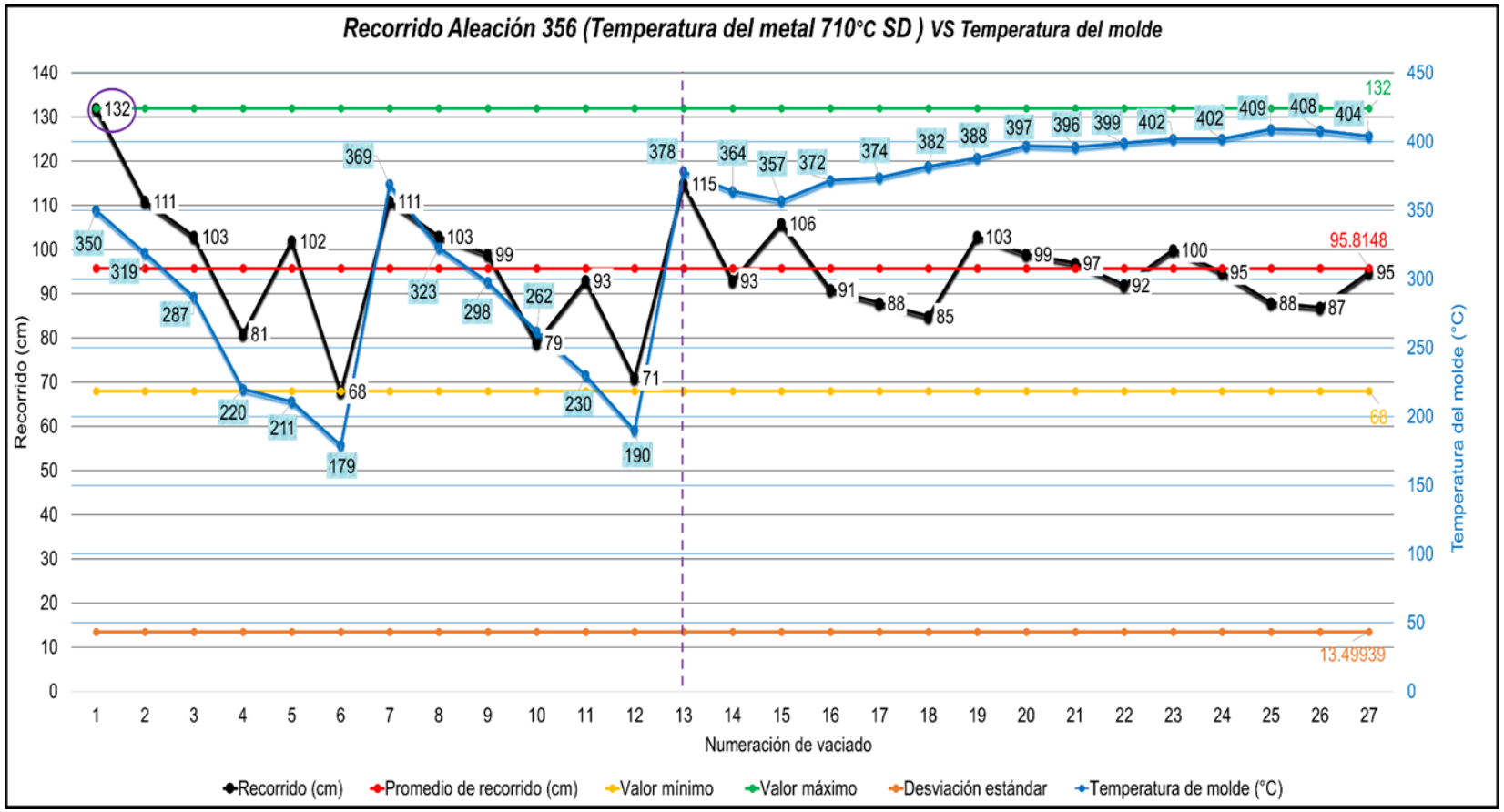


Figura 142: Gráfico lineal con marcadores de la trayectoria del flujo a una temperatura de 710°C sin desgasificación

La temperatura alta del quemador, el desgasificado y la temperatura alta del metal incrementa el recorrido por arriba de los 120 cm de longitud, esto indica que la temperatura alta beneficia a la aleación en términos de fluidez Según lo expuesto en la tabla 14.

Tabla 14: Recorridos de fluidez de la aleación 356 desgasificado a una temperatura de 730°C.

Aleación 356 D (temperatura 730°C)							
Numeración	**Temperatura de molde (°C)**	**Temperatura de metal (°C)**	**Recorrido (cm)**	**Promedio de recorrido (°C)**	**Valor mínimo (cm)**	**Valor máximo (cm)**	**Desviación estándar**
1	411	730	130	121.9666	92	150	± 13.2234
2	388	730	140	121.9666	92	150	± 13.2234
3	397	730	130	121.9666	92	150	± 13.2234
4	427	730	122	121.9666	92	150	± 13.2234
5	417	730	150	121.9666	92	150	± 13.2234
6	416	730	137	121.9666	92	150	± 13.2234
7	437	730	132	121.9666	92	150	± 13.2234
8	496	730	129	121.9666	92	150	± 13.2234
9	478	730	130	121.9666	92	150	± 13.2234
10	503	730	134	121.9666	92	150	± 13.2234
11	345	730	133	121.9666	92	150	± 13.2234
12	368	730	106	121.9666	92	150	± 13.2234
13	382	730	110	121.9666	92	150	± 13.2234
14	356	730	113	121.9666	92	150	± 13.2234
15	344	730	106	121.9666	92	150	± 13.2234
16	363	730	115	121.9666	92	150	± 13.2234
17	375	730	111	121.9666	92	150	± 13.2234
18	388	730	107	121.9666	92	150	± 13.2234
19	403	730	113	121.9666	92	150	± 13.2234
20	378	730	113	121.9666	92	150	± 13.2234
21	373	730	92	121.9666	92	150	± 13.2234
22	387	730	106	121.9666	92	150	± 13.2234
23	396	730	139	121.9666	92	150	± 13.2234
24	411	730	129	121.9666	92	150	± 13.2234
25	440	730	132	121.9666	92	150	± 13.2234
26	450	730	127	121.9666	92	150	± 13.2234
27	457	730	129	121.9666	92	150	± 13.2234
28	442	730	117	121.9666	92	150	± 13.2234
29	458	730	113	121.9666	92	150	± 13.2234
30	457	730	114	121.9666	92	150	± 13.2234

Las temperaturas del molde de 300°C a 500°C (de amarillo a azul claro) son óptimas para la fluidez, la pendiente del gráfico es más pronunciada a medida que aumenta hasta 730°C como se ilustra en la figura 143; con trayectorias de flujo por encima de 100 cm hasta un rango de 150 cm.

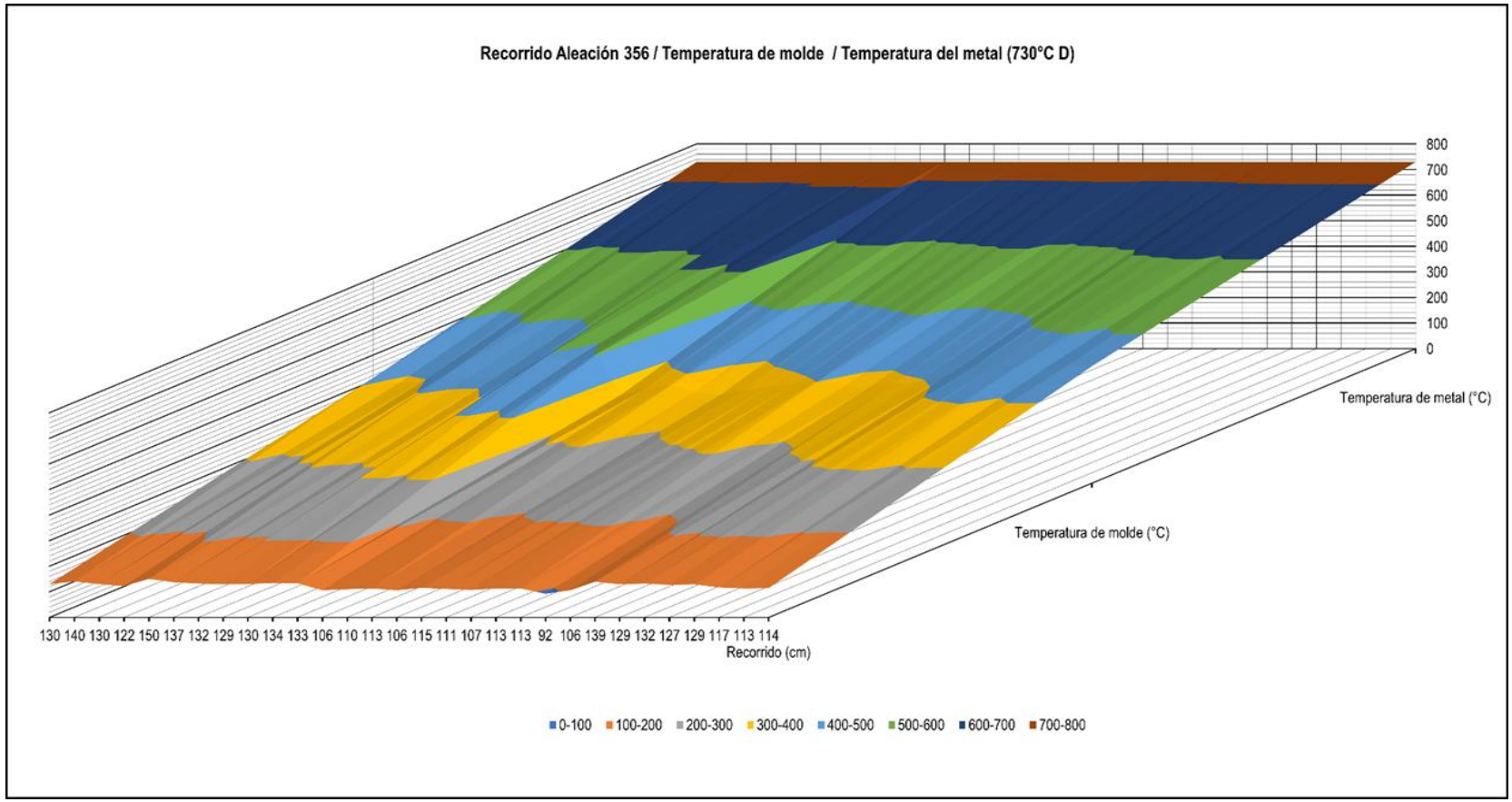


Figura 143: Gráfico de superficie en 3D de la trayectoria del flujo a una temperatura desgasificada de 730°C

Por encima de 440°C, las trayectorias de flujo se mantienen por encima de 113 cm, los picos de retoque de pintura vuelven a estar presentes y también es muy notable que cada 10 ciclos se produce una pérdida considerable en la trayectoria de flujo (figura 144). La media con una temperatura de desgasificación de 730°C es de 121.966 cm con valores máximos en el recorrido de 150 cm y mínimos de 92 cm.

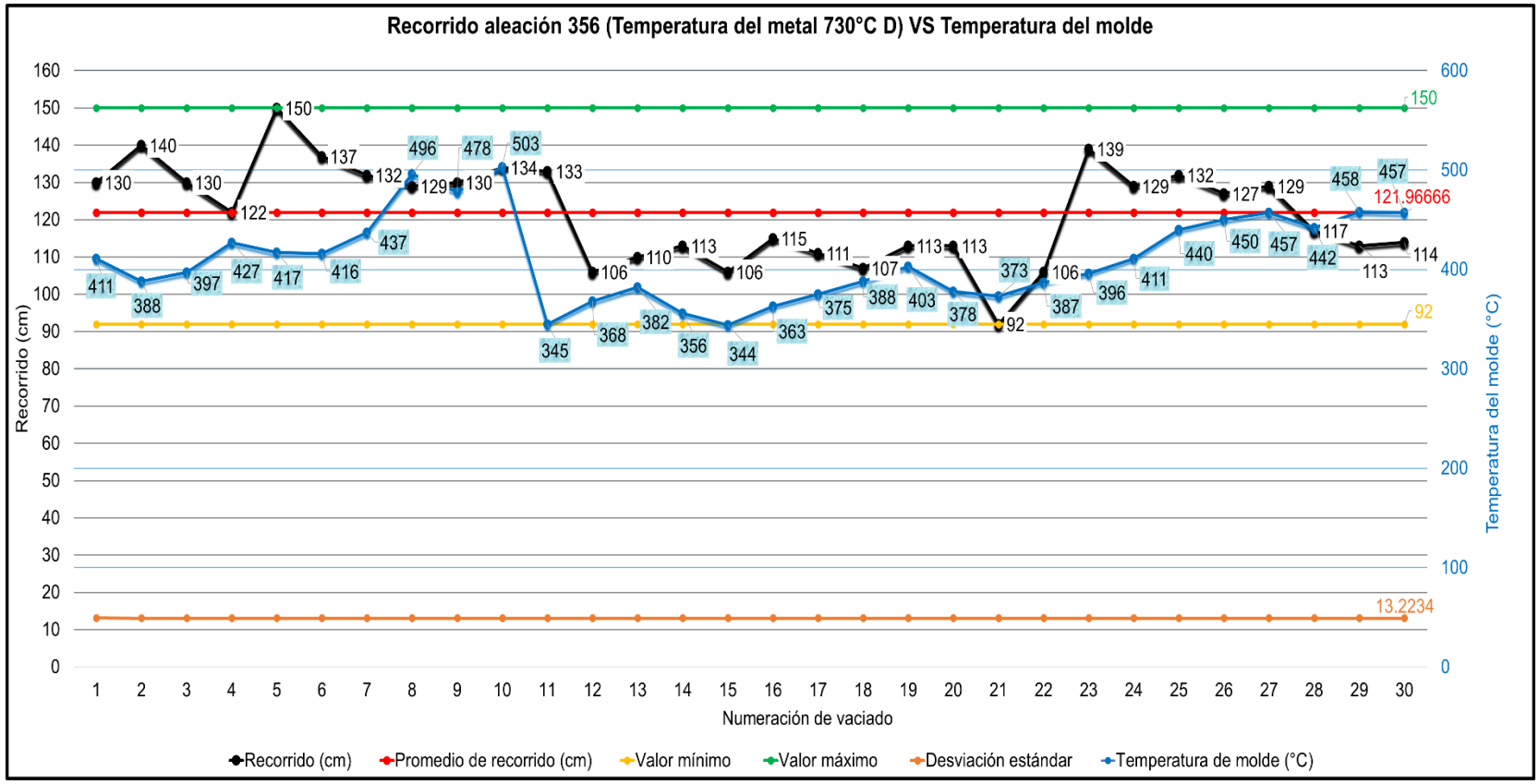


Figura 144: Gráfico lineal con marcadores de la trayectoria del flujo a una temperatura de 730°C con desgasificación

Es notorio que cuando el metal contiene impurezas, la mayoría de óxidos evita el flujo dentro de la cavidad con temperatura alta y el molde calentado arriba de los 300°C no tienen gran relevancia de recorrido de acuerdo con la tabla 15.

Tabla 15: Recorridos de fluidez de la aleación 356 sin desgasificar una temperatura de 730°C

Aleación 356 SD (temperatura 730)							
Numeración	**Temperatura de molde (°C)**	**Temperatura de metal (°C)**	**Recorrido (cm)**	**Promedio de recorrido (°C)**	**Valor mínimo (cm)**	**Valor máximo (cm)**	**Desviación estándar**
1	337	730	165	93.3333	74	165	± 23.8997
2	340	730	102	93.3333	74	165	± 23.8997
3	342	730	99	93.3333	74	165	± 23.8997
4	344	730	82	93.3333	74	165	± 23.8997
5	345	730	85	93.3333	74	165	± 23.8997
6	345	730	91	93.3333	74	165	± 23.8997
7	340	730	91	93.3333	74	165	± 23.8997
8	341	730	74	93.3333	74	165	± 23.8997
9	344	730	85	93.3333	74	165	± 23.8997
10	345	730	83	93.3333	74	165	± 23.8997
11	347	730	82	93.3333	74	165	± 23.8997
12	349	730	81	93.3333	74	165	± 23.8997

Las trayectorias de fluidez del metal no presentan una ondulación tan desequilibrada en la “sabana” tal como se observa en la figura 145, se mantiene en la misma trayectoria a temperaturas de molde de 200°C a 400°C y del metal de 730°C.

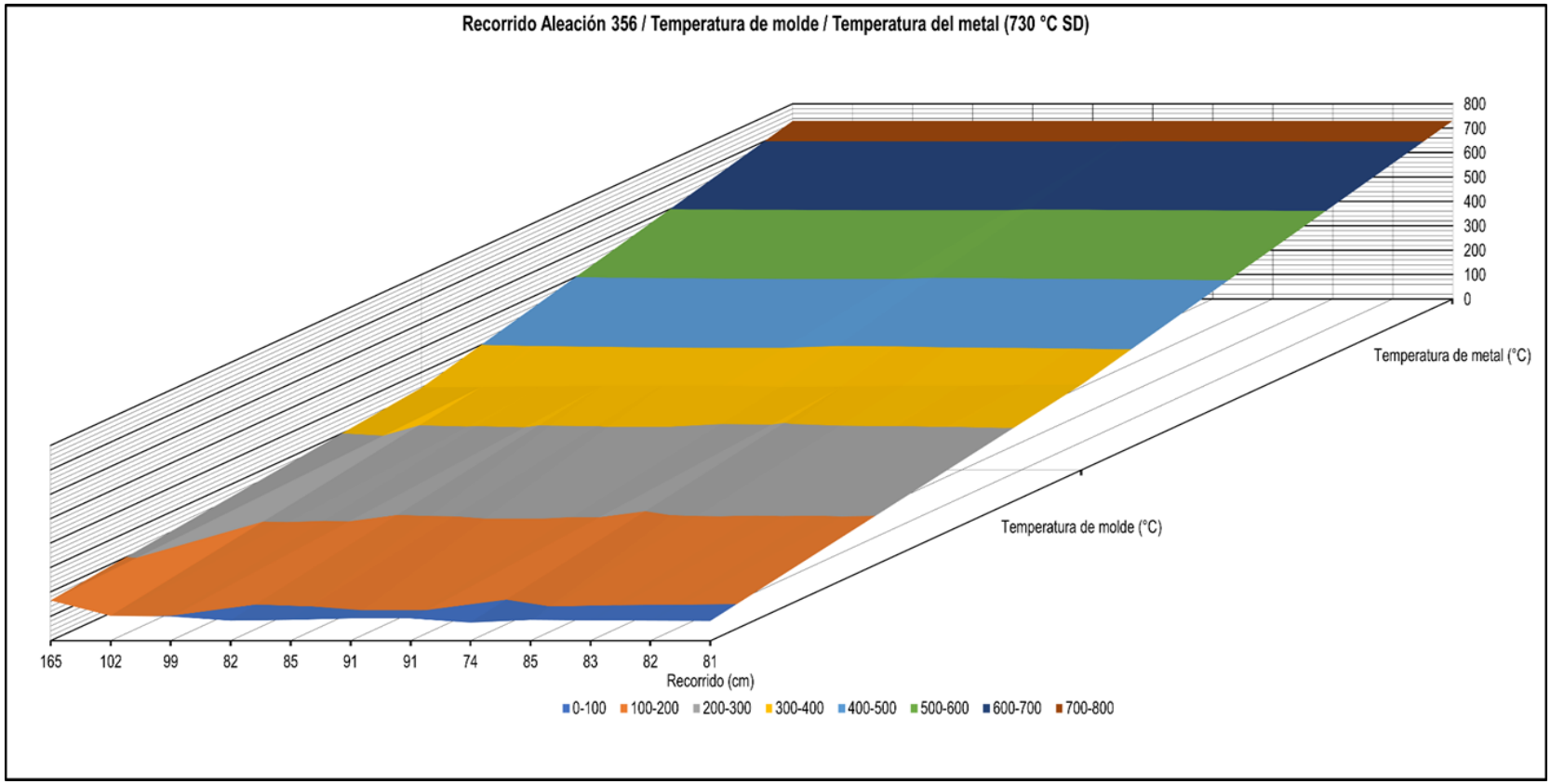


Figura 145: Gráfico lineal con marcadores de la trayectoria del flujo a una temperatura de 730°C sin desgasificación

El recorrido medio de fluidez sin desgasificación a una temperatura del metal de 730°C es de 93.3333 cm, los valores sobrepasan la distancia de 100 cm en las dos primeras coladas (figura 146), luego se mantiene por debajo de esa medida a una temperatura del molde superior a 300°C.

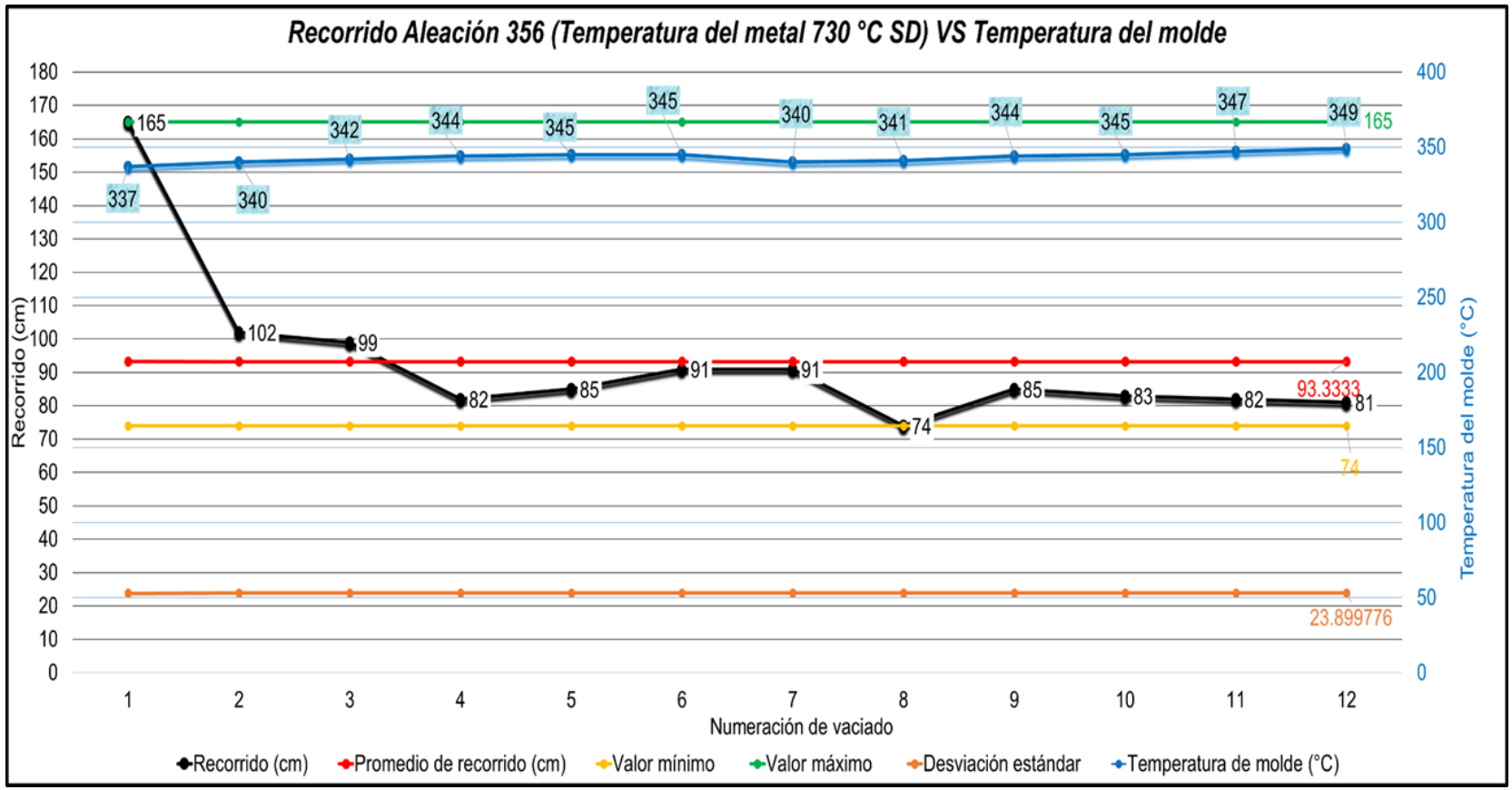


Figura 146: Gráfico lineal con marcadores de la trayectoria del flujo a una temperatura de 730°C sin desgasificación

La fluidez basada en las diferentes muestras tomadas del molde en espiral indica que, a mayor temperatura en un proceso de colada continua, el fluido tiene una eficiencia del 51% frente a la longitud total de la geometría del molde con un recorrido medio de 121.9 cm. Del mismo modo, una diferencia de 2%-21% a otros parámetros de la aleación, esto significa que la desgasificación y la temperatura hacen un cambio importante en el flujo del metal de acuerdo con los datos presentados en la tabla 16.

Tabla 16: Promedio conforme a los parámetros de desgasificado y desempeño de fluidez en el molde de espiral.

Parámetros Aleación 356 (°C / D ó SD)	Recorrido Promedio (cm)	Porcentaje de efectividad en pruebas de Fluidez (%)
690 D	79.2	33.27
690 SD	71.5	30.04
710 D	114.9	48.27
710 SD	92.6	38.9
730 D	121.9	51.21
730 SD	93.3	39.2

La figura 147 muestra la importancia de la desgasificación aplicada a la aleación, los recorridos de fluidez aumentan en relación a las diferentes temperaturas del metal desde los 690°C hasta los 730°C.

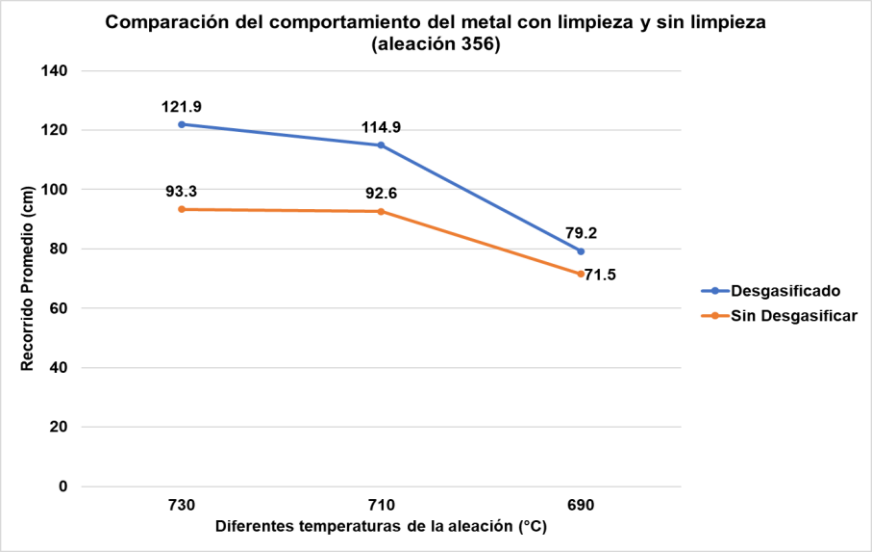


Figura 147: Comportamiento del metal con limpieza y sin limpieza a diferentes temperaturas 690 – 730°C (aleación 356)

3.1.18 Influencia de la temperatura respecto a la fluidez de la aleación 332

A una temperatura baja, la aleación marca una trayectoria menor como se detalla en la tabla 17, aun cuando la temperatura del molde se incrementa; el líquido desgasificado será mejor respecto al que no está desgasificado a la misma temperatura del metal.

Tabla 17: Recorridos de fluidez de la aleación 332 desgasificado a una temperatura de 690°C.

Aleación 332 D (Temperatura 690 °C)							
Numeración	**Temperatura de molde (°C)**	**Temperatura de metal (°C)**	**Recorrido (cm)**	**Promedio de recorrido (°C)**	**Valor mínimo**	**Valor máximo**	**Desviación estándar**
1	372	690	227	106.3	66	227	30.1022
2	370	690	179	106.3	66	227	30.1022
3	376	690	103	106.3	66	227	30.1022
4	380	690	94	106.3	66	227	30.1022
5	387	690	92	106.3	66	227	30.1022
6	377	690	100	106.3	66	227	30.1022
7	387	690	88	106.3	66	227	30.1022
8	391	690	105	106.3	66	227	30.1022
9	390	690	101	106.3	66	227	30.1022
10	391	690	103	106.3	66	227	30.1022
11	401	690	96	106.3	66	227	30.1022
12	336	690	97	106.3	66	227	30.1022
13	352	690	119	106.3	66	227	30.1022
14	358	690	88	106.3	66	227	30.1022
15	363	690	78	106.3	66	227	30.1022
16	369	690	96	106.3	66	227	30.1022
17	373	690	86	106.3	66	227	30.1022
18	322	690	91	106.3	66	227	30.1022
19	333	690	103	106.3	66	227	30.1022
20	334	690	99	106.3	66	227	30.1022
21	333	690	66	106.3	66	227	30.1022
22	337	690	145	106.3	66	227	30.1022
23	337	690	105	106.3	66	227	30.1022
24	338	690	99	106.3	66	227	30.1022
25	344	690	113	106.3	66	227	30.1022
26	345	690	98	106.3	66	227	30.1022
27	347	690	109	106.3	66	227	30.1022
28	348	690	105	106.3	66	227	30.1022
29	349	690	102	106.3	66	227	30.1022
30	349	690	102	106.3	66	227	30.1022

Las gráficas con superficie o también llamadas «láminas». como se muestra en la figura 148, indican el comportamiento del metal dentro de la cavidad del molde ligado a su temperatura y a la de la propia aleación, la trayectoria se encuentra en la parte frontal de la gráfica mostrando ondulaciones (color azul marino); para detectar aproximadamente las temperaturas utilizadas en el molde se indica en la línea media en este caso se muestra que el rango va de 200°C a 400°C (color gris a amarillo) y finalmente en la parte inferior se encuentra una línea azul oscuro, mostrando que la temperatura del metal es constante en este caso a 690°C.

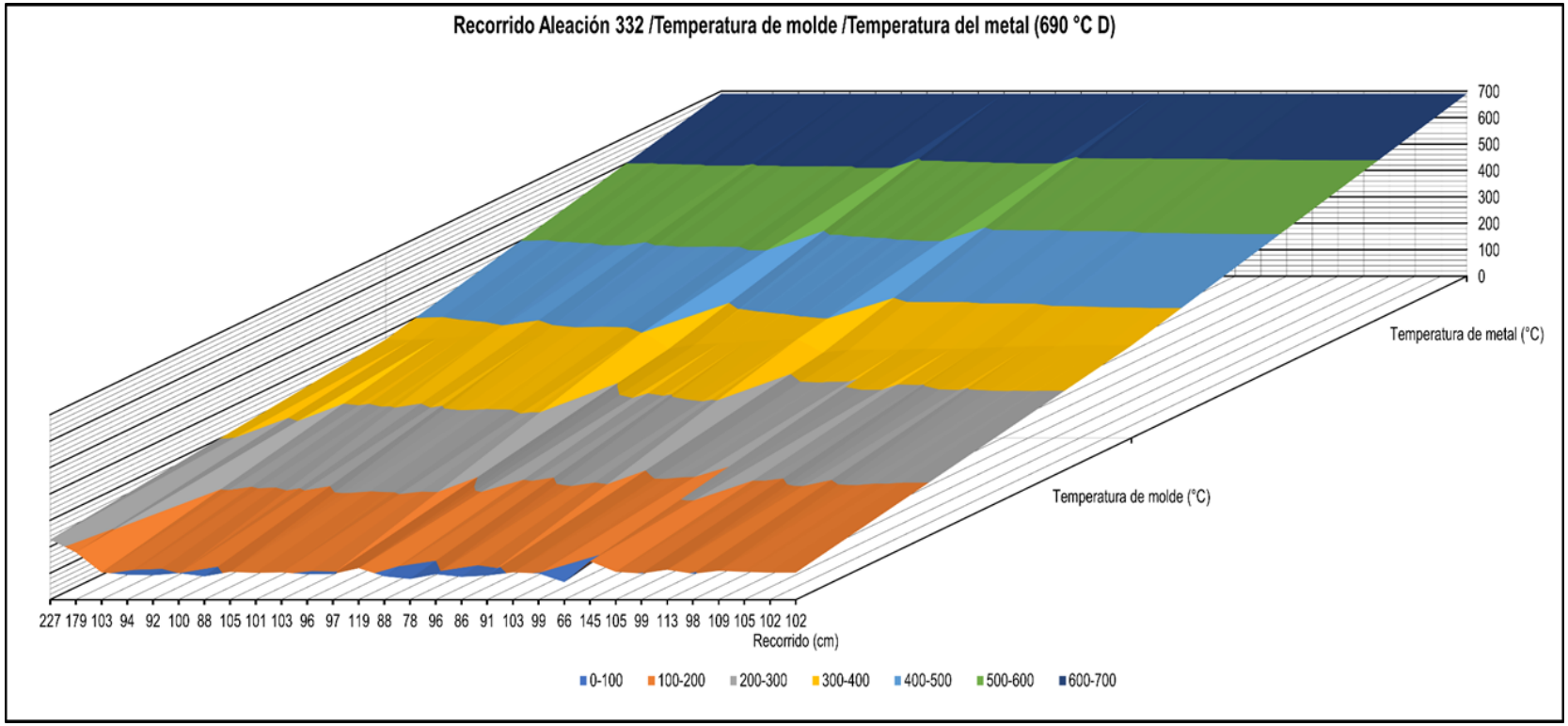


Figura 148: Gráfico de superficie 3D de la trayectoria del flujo a una temperatura desgasificada de 690°C

El gráfico lineal con marcadores ayuda a correlacionar el recorrido del fluido y la temperatura específica a la que se tomó el número de colada como se ilustra en la figura 149.

El primer valor que se tomó y tan diferente de los demás se debe al granallado y al hecho de que el molde no contiene ningún tipo de impureza o residuo en su cavidad, la fluidez va disminuyendo debido al desprendimiento de pintura y metal que queda en el momento de retirar la colada. Los picos posteriores se deben a la aplicación de grafito, manteniendo de nuevo el rango de 90 cm a 100 cm de longitud; la fluidez media en un proceso de colada continua es de 106,3 cm a una temperatura del molde de 359°C y el metal desgasificado es de 690°C.

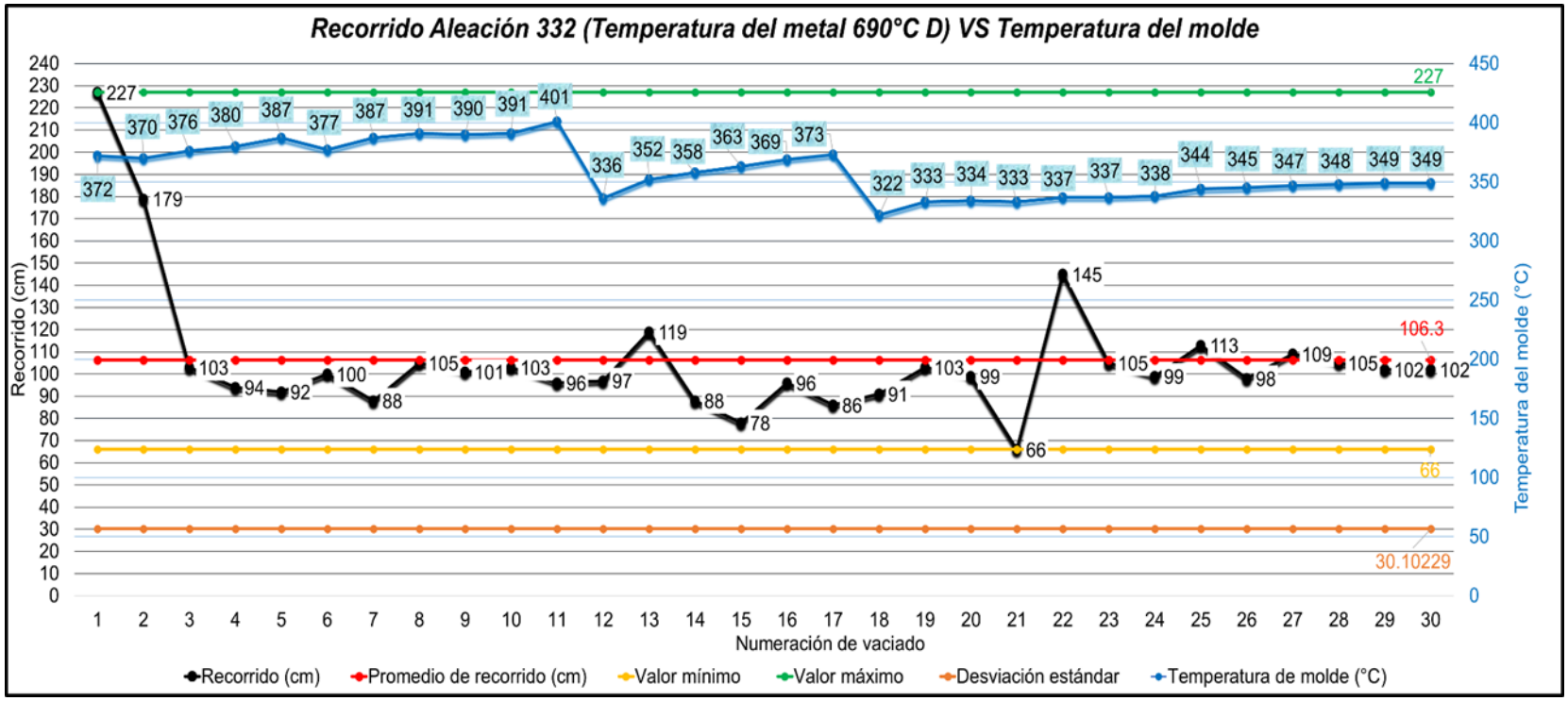


Figura 149: Gráfico lineal con marcadores de la trayectoria del flujo a una temperatura de 690°C con desgasificación

En estas trayectorias, sigue influyendo el quemador al mantener los recorridos cómo se puede observar en la tabla 18, sin embargo, la capacidad de llenado será tan eficaz como la limpieza del metal, además la temperatura influye en el vaciado porque se solidifica tempranamente por la transferencia de calor y diferencias térmicas.

Tabla 18:Recorridos de fluidez de la aleación 332 sin desgasificar a una temperatura de 690°C.

Aleación 332 SD (temperatura 690°C)							
Numeración	**Temperatura de molde (°C)**	**Temperatura de metal (°C)**	**Recorrido (cm)**	**Promedio de recorrido (°C)**	**Valor mínimo (cm)**	**Valor máximo (cm)**	**Desviación estándar**
1	338	690	96	78.1666	57	96	± 11.5588
2	339	690	73	78.1666	57	96	± 11.5588
3	339	690	75	78.1666	57	96	± 11.5588
4	341	690	68	78.1666	57	96	± 11.5588
5	339	690	57	78.1666	57	96	± 11.5588
6	341	690	94	78.1666	57	96	± 11.5588
7	342	690	70	78.1666	57	96	± 11.5588
8	341	690	91	78.1666	57	96	± 11.5588
9	335	690	85	78.1666	57	96	± 11.5588
10	331	690	76	78.1666	57	96	± 11.5588
11	345	690	73	78.1666	57	96	± 11.5588
12	346	690	80	78.1666	57	96	± 11.5588

En la gráfica de sábana, se observa que el recorrido no tiene tanta ondulación en la superficie del gráfico (Figura 150), esto significa que los valores no están tan dispersos, el recorrido registrado va desde una distancia de 57 cm hasta 96 cm. La línea intermedia nos da una perspectiva de que la temperatura en el molde utilizado fue igualmente de 200°C a 400°C. El color azul marino está todavía por debajo de 700°C

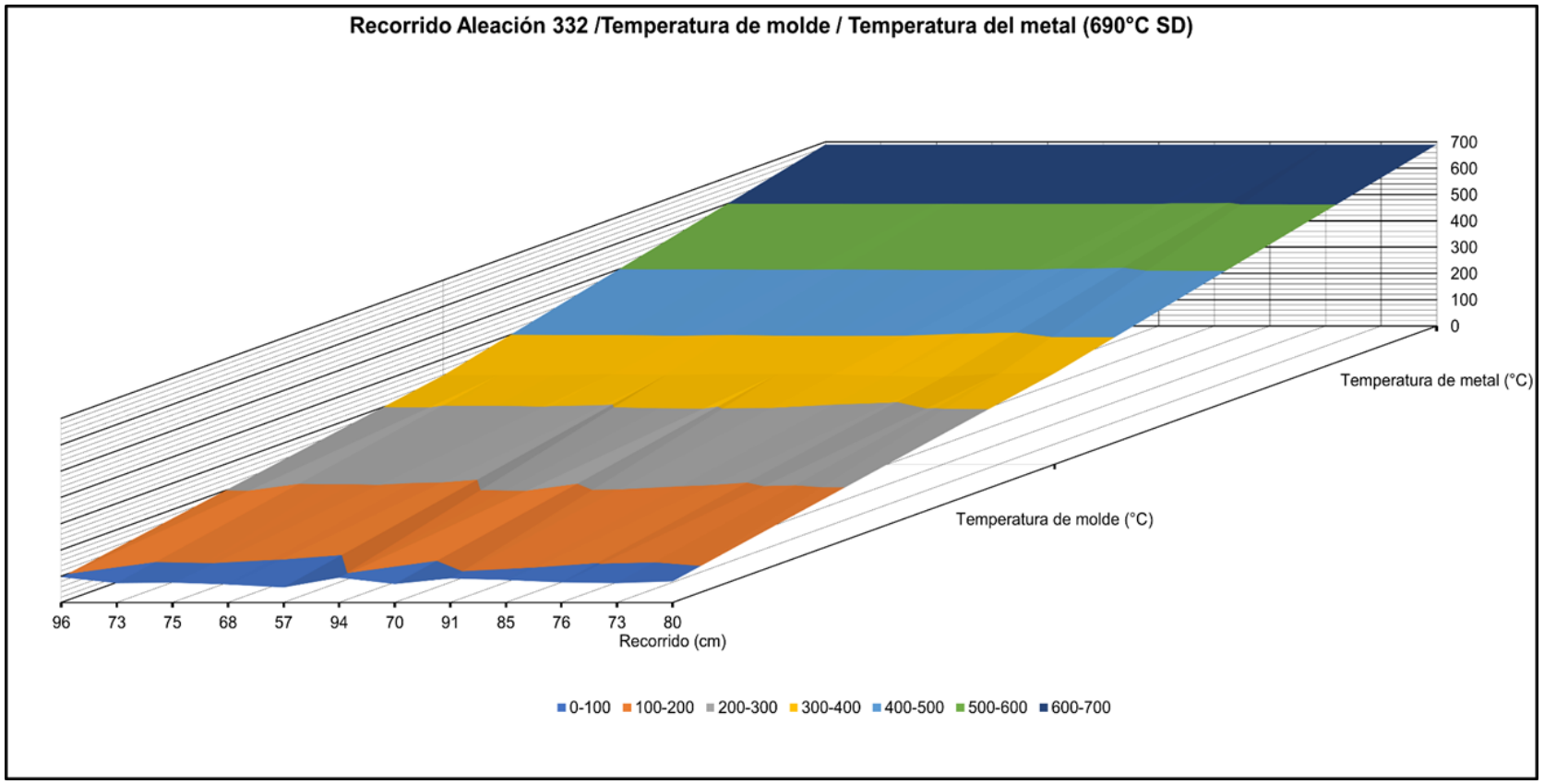


Figura 150: Trazado en 3D de la superficie de la trayectoria del flujo a una temperatura de 690°C sin desgasificación

Se realizaron doce pruebas más para comprobar el comportamiento del metal cuando no está desgasificado; la figura 151 muestra que el molde se encuentra a diferentes temperaturas por encima de 340°C y entonces el recorrido promedio será de 78.16 cm, teniendo un rango de valores entre 57cm y 96 cm.

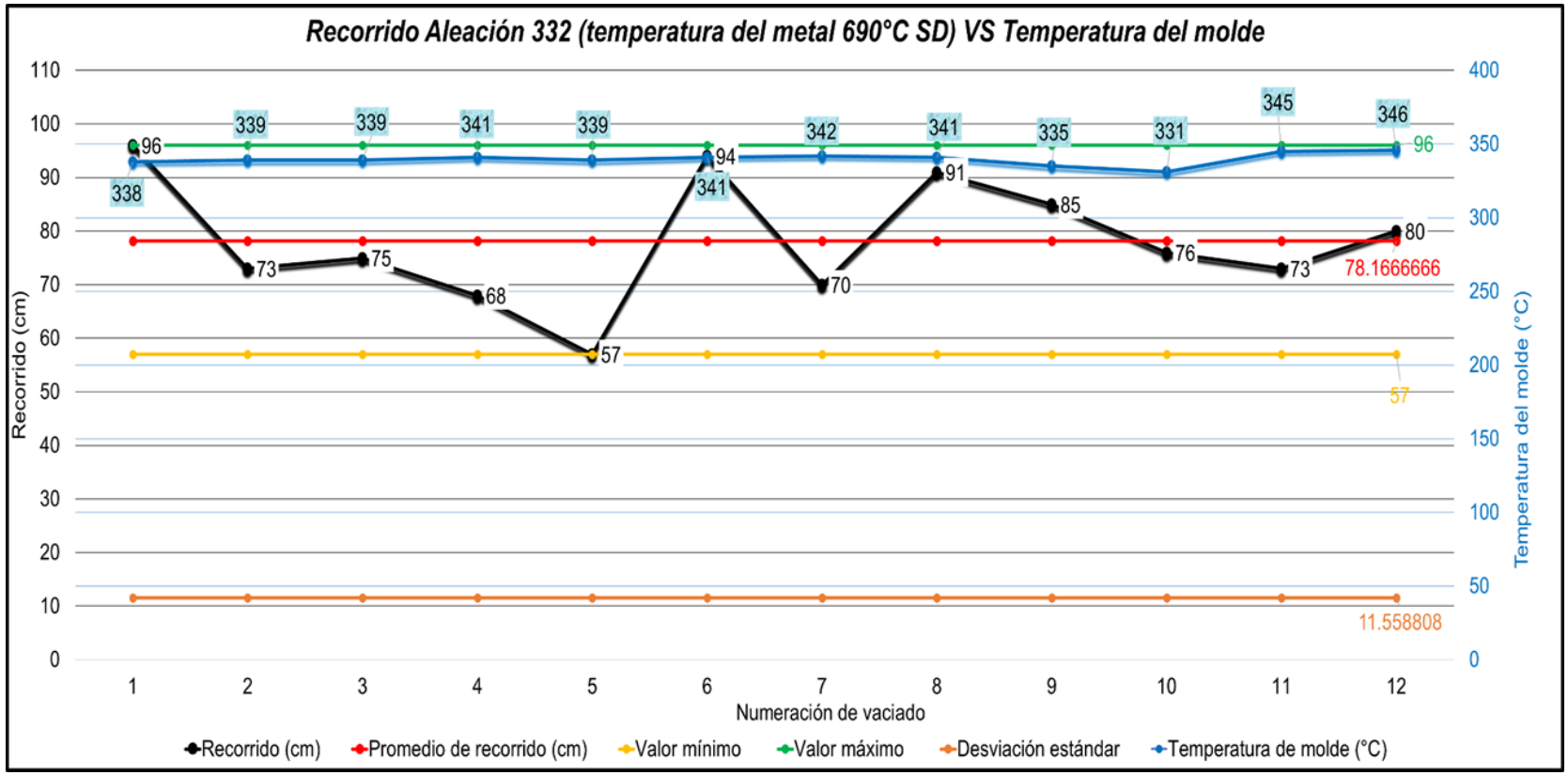


Figura 151: Gráfico lineal con marcadores de la trayectoria del flujo a una temperatura de 690°C sin desgasificación

Las cantidades que sobresalen se deben a la aplicación y retoque de pintura, al tener un metal con temperatura por arriba de los 700°C los resultados tendrán una mejor eficacia alrededor del 53.75% a un llenado completo, respecto a lo presentado en la tabla 19.

Tabla 19: Recorridos de fluidez de la aleación 332 desgasificado a una temperatura de 710°C.

Aleación 332 D (temperatura 710 °C)							
Numeración	**Temperatura de molde (°C)**	**Temperatura de metal (°C)**	**Recorrido (cm)**	**Promedio de recorrido (°C)**	**Valor mínimo (cm)**	**Valor máximo (cm)**	**Desviación estándar**
1	339	710	188	127.9333	100	228	± 28.4398
2	343	710	171	127.9333	100	228	± 28.4398
3	357	710	139	127.9333	100	228	± 28.4398
4	375	710	129	127.9333	100	228	± 28.4398
5	385	710	154	127.9333	100	228	± 28.4398
6	425	710	128	127.9333	100	228	± 28.4398
7	316	710	146	127.9333	100	228	± 28.4398
8	411	710	228	127.9333	100	228	± 28.4398
9	401	710	137	127.9333	100	228	± 28.4398
10	402	710	114	127.9333	100	228	± 28.4398
11	417	710	122	127.9333	100	228	± 28.4398
12	419	710	136	127.9333	100	228	± 28.4398
13	392	710	115	127.9333	100	228	± 28.4398
14	417	710	116	127.9333	100	228	± 28.4398
15	453	710	111	127.9333	100	228	± 28.4398
16	451	710	123	127.9333	100	228	± 28.4398
17	436	710	107	127.9333	100	228	± 28.4398
18	450	710	104	127.9333	100	228	± 28.4398
19	447	710	116	127.9333	100	228	± 28.4398
20	446	710	112	127.9333	100	228	± 28.4398
21	449	710	105	127.9333	100	228	± 28.4398
22	460	710	100	127.9333	100	228	± 28.4398
23	460	710	109	127.9333	100	228	± 28.4398
24	466	710	102	127.9333	100	228	± 28.4398
25	470	710	106	127.9333	100	228	± 28.4398
26	475	710	154	127.9333	100	228	± 28.4398
27	463	710	115	127.9333	100	228	± 28.4398
28	467	710	118	127.9333	100	228	± 28.4398
29	473	710	131	127.9333	100	228	± 28.4398
30	460	710	102	127.9333	100	228	± 28.4398

Para esta gráfica, la temperatura utilizada fue de 300°C a 400°C (color amarillo) para un metal desgasificado a una temperatura de 710°C (color vino), las pronunciadas ondulaciones del gráfico se deben a un retoque de pintura en el molde o a su proceso inicial de granallado (Figura 152).

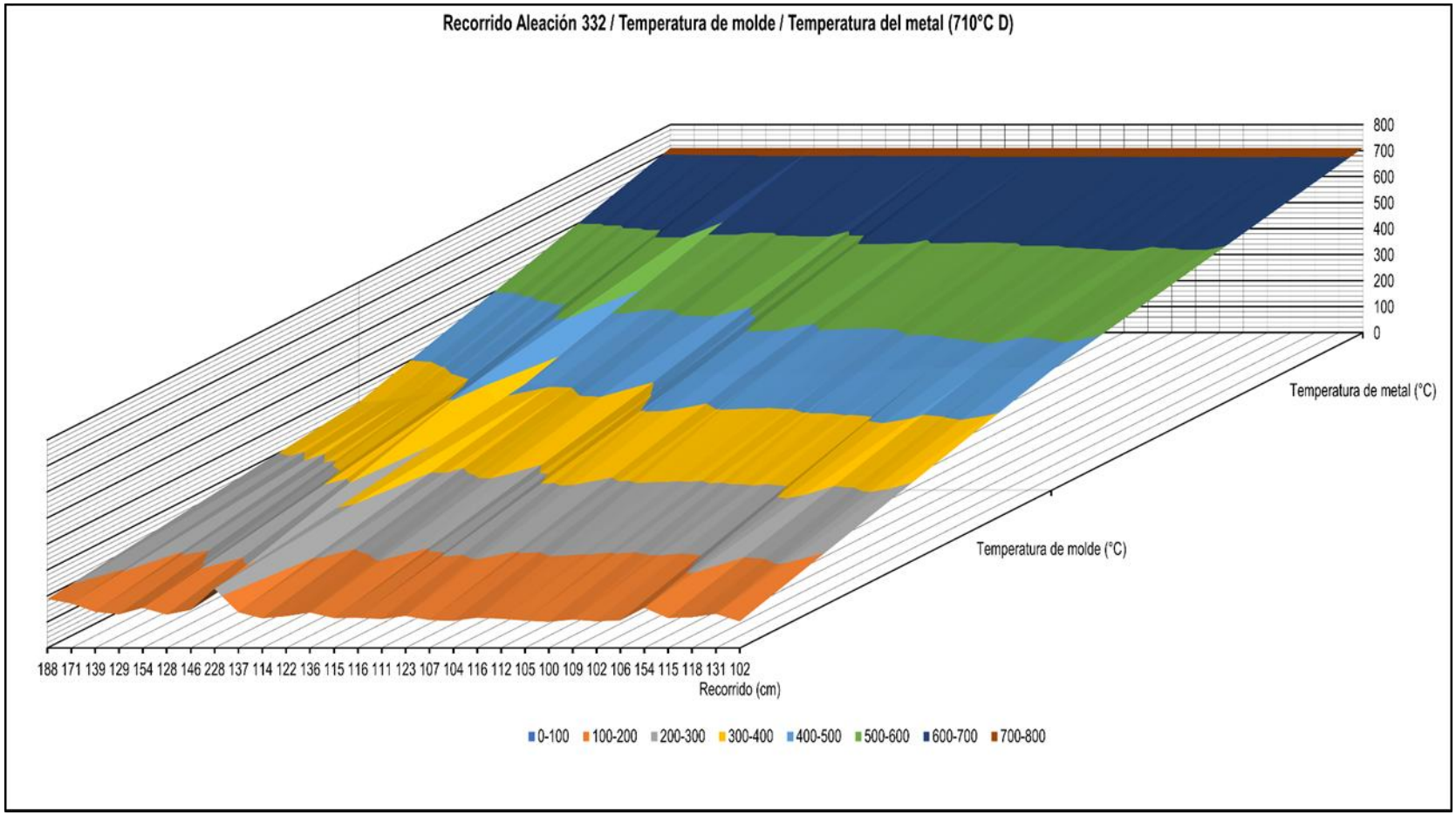


Figura 152: Gráfico de superficie en 3D de la trayectoria del flujo a una temperatura desgasificada de 710°C

Al principio la fluidez es significativa ya que cada vez que se vacían diferentes parámetros de la aleación se hace una limpieza profunda de las superficies y la pintura se adhiere sin ningún problema; el recorrido del fluido (color negro) desciende en la segunda aplicación de grafito ya que se trabajó de manera constante con el molde, llegamos a tener un recorrido similar esto se nota en la prueba 13 a 25 según lo que se observa en la figura 153.

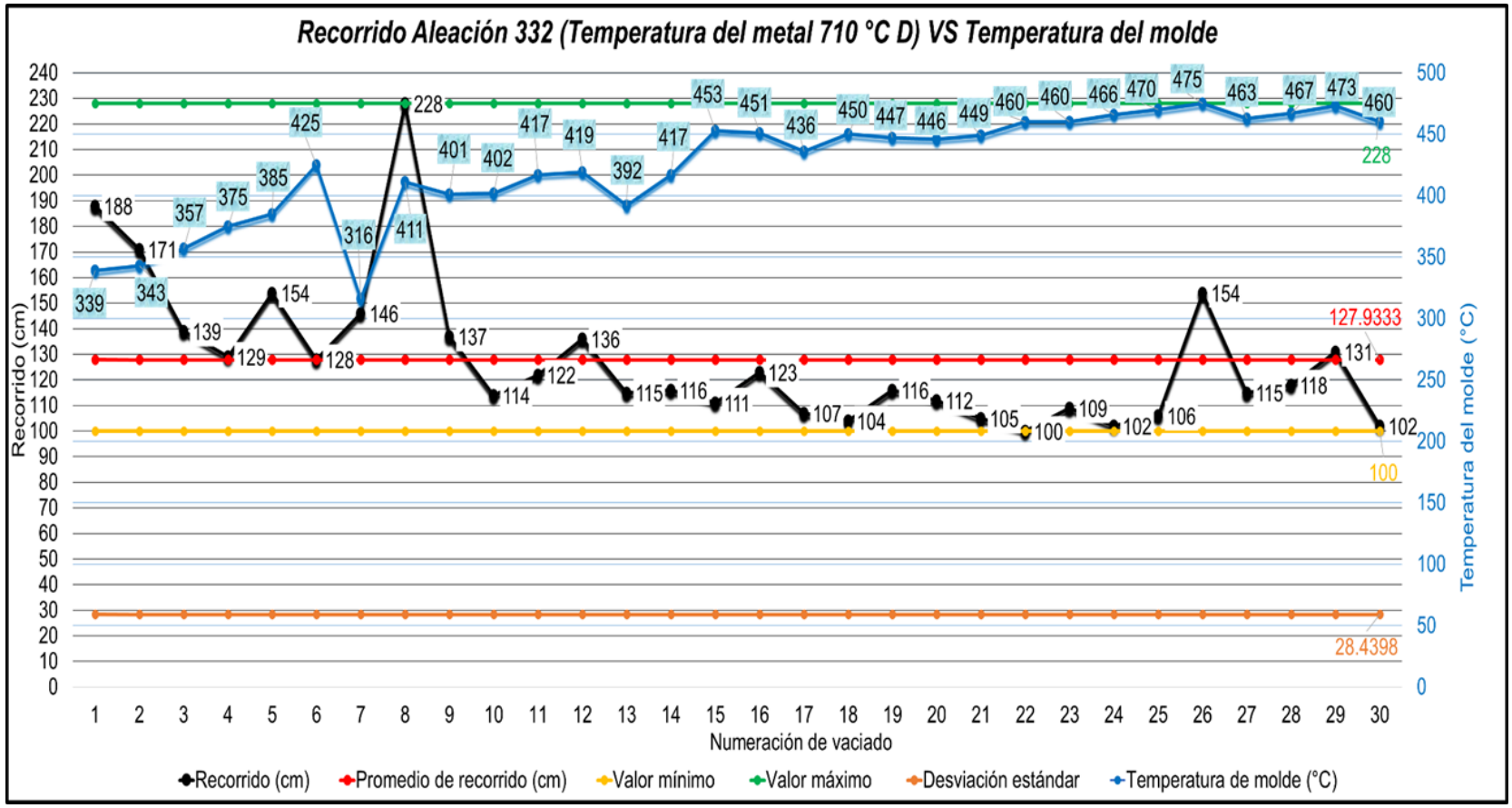


Figura 153: Gráfico lineal con marcadores de la trayectoria del flujo a una temperatura de 710°C con desgasificación

Como se aprecia en la tabla 20 se presentan vaciados como el número 23 y 24 que, a pesar de tener temperaturas elevadas, la fluidez es mínima. La resistencia a la pintura define como se va comportar el fluido y aproximar que tanto necesita el molde de recubrimiento.

Tabla 20: Recorridos de fluidez de la aleación 332 sin desgasificar a una temperatura de 710°C.

Aleación 332 SD (Temperatura 710 °C)							
Numeración	**Temperatura de molde (°C)**	**Temperatura de metal (°C)**	**Recorrido (cm)**	**Promedio de recorrido(°C)**	**Valor mínimo (cm)**	**Valor máximo (cm)**	**Desviación estándar**
1	280	710	119	107.4	76	154	± 17.3753
2	295	710	115	107.4	76	154	± 17.3753
3	287	710	107	107.4	76	154	± 17.3753
4	367	710	121	107.4	76	154	± 17.3753
5	391	710	108	107.4	76	154	± 17.3753
6	412	710	117	107.4	76	154	± 17.3753
7	406	710	92	107.4	76	154	± 17.3753
8	380	710	94	107.4	76	154	± 17.3753
9	349	710	102	107.4	76	154	± 17.3753
10	311	710	98	107.4	76	154	± 17.3753
11	328	710	88	107.4	76	154	± 17.3753
12	351	710	104	107.4	76	154	± 17.3753
13	373	710	102	107.4	76	154	± 17.3753
14	398	710	103	107.4	76	154	± 17.3753
15	394	710	95	107.4	76	154	± 17.3753
16	420	710	90	107.4	76	154	± 17.3753
17	433	710	106	107.4	76	154	± 17.3753
18	431	710	105	107.4	76	154	± 17.3753
19	403	710	105	107.4	76	154	± 17.3753
20	357	710	153	107.4	76	154	± 17.3753
21	416	710	108	107.4	76	154	± 17.3753
22	454	710	76	107.4	76	154	± 17.3753
23	427	710	86	107.4	76	154	± 17.3753
24	437	710	85	107.4	76	154	± 17.3753
25	461	710	154	107.4	76	154	± 17.3753
26	450	710	119	107.4	76	154	± 17.3753
27	455	710	121	107.4	76	154	± 17.3753
28	457	710	124	107.4	76	154	± 17.3753
29	448	710	113	107.4	76	154	± 17.3753
30	450	710	112	107.4	76	154	± 17.3753

Las temperaturas utilizadas en el molde fueron de 200°C a 400°C, de acuerdo a la figura 154, se puede observar que al inicio de la gráfica el color gris sube un poco más de lo normal hacia el color amarillo debido a que el quemador alcanzó temperaturas superiores del rango operativo. La temperatura del metal es constante (color vino) y se observa una variación debido a la ondulación que se produce en el gráfico.

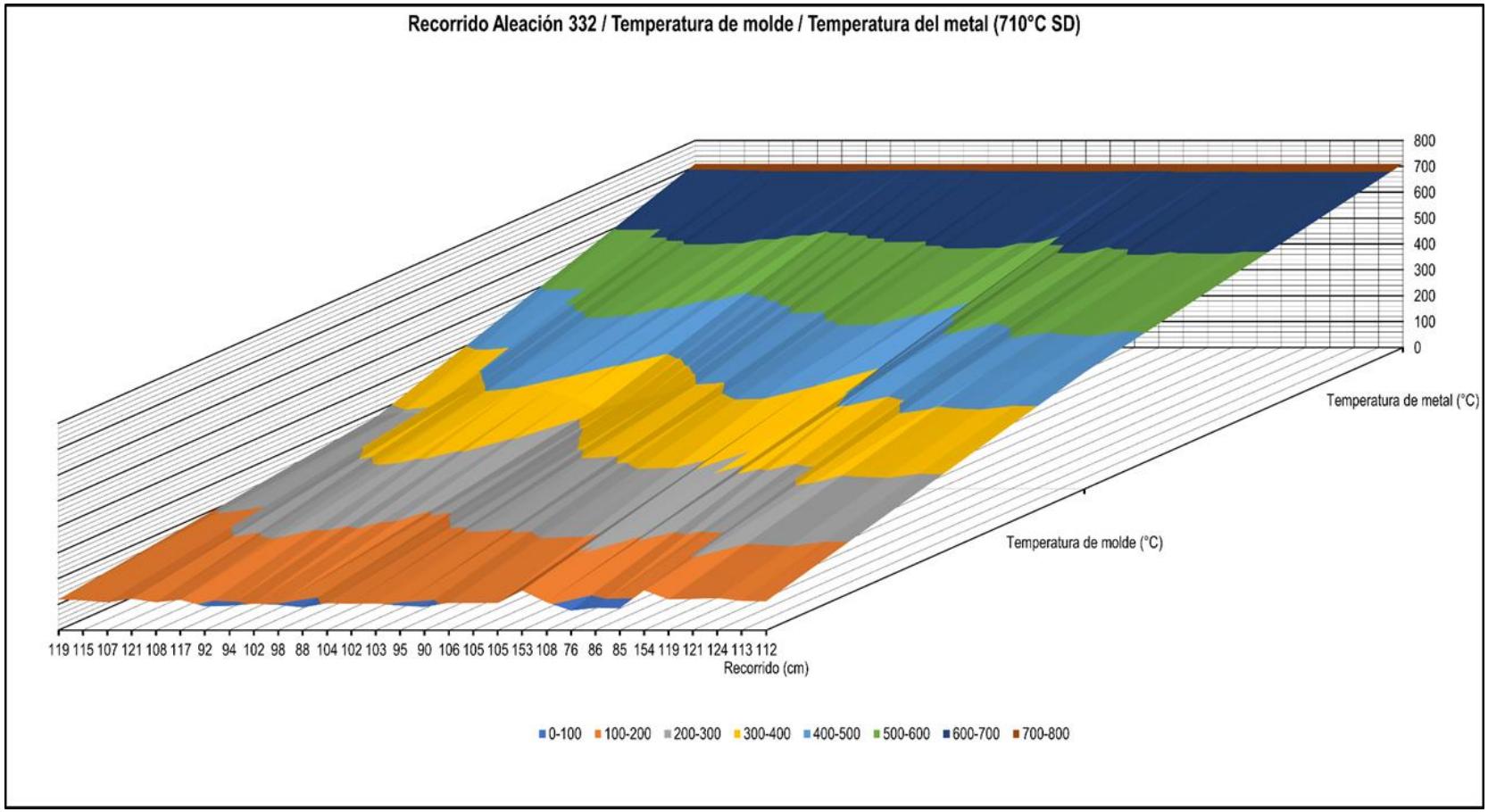


Figura 154: Trazado en 3D de la superficie de la trayectoria del flujo a una temperatura de 710°C sin desgasificación

La temperatura del molde influye en el proceso de colada, en las 3 primeras pruebas se tienen recorridos de fluidos altos (como se muestra en la figura 155), pero es porque la pintura no se ha deteriorado, en la prueba 20 también se nota cuando la pintura contiene buenos estándares de calidad para su aplicación porque nos da como resultados recorridos de fluidos bajos, es independiente en este caso el aumento de temperatura en el molde.

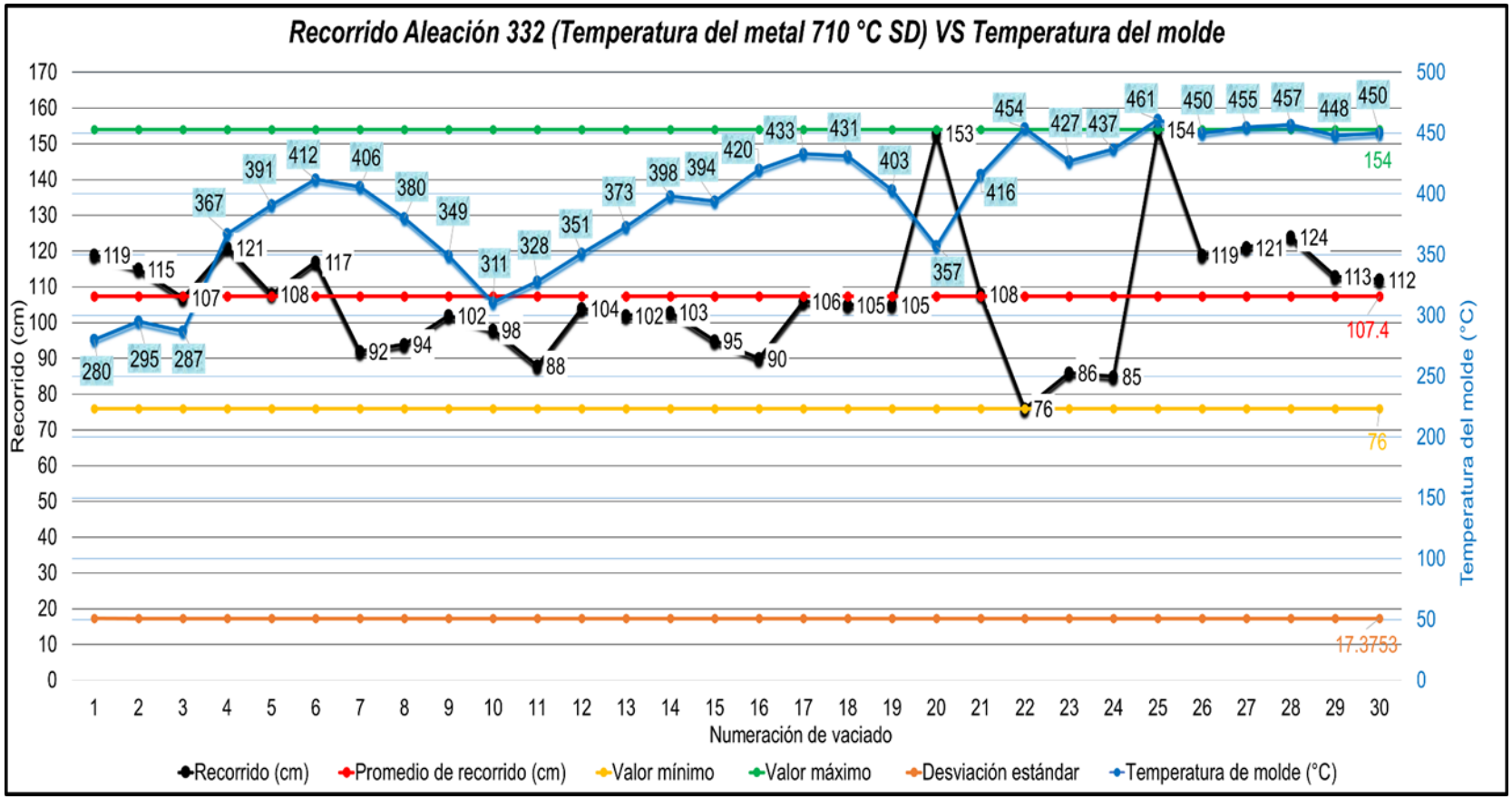


Figura 155: Gráfico lineal con marcadores de la trayectoria del flujo a una temperatura de 710 °C sin desgasificación

El enfoque en este tipo de aleación fue la prueba número 1 indicando que, a esta temperatura y a parámetros iniciales ideales, se logra obtener el 100% de llenado de la geometría del espiral (como se muestra en la prueba 1 de la tabla 21); posteriormente el flujo tendrá un comportamiento equivalente a los demás.

Tabla 21: Recorridos de fluidez de la aleación 332 desgasificado a una temperatura de 730°C.

Aleación 332 D (Temperatura 730 °C)							
Numeración	**Temperatura de molde(°C)**	**Temperatura de metal(°C)**	**Recorrido (cm)**	**Promedio de recorrido(°C)**	**Valor mínimo (cm)**	**Valor máximo (cm)**	**Desviación estándar**
1	407	730	238	126.8666	84	238	± 39.8866
2	409	730	211	126.8666	84	238	± 39.8866
3	380	730	184	126.8666	84	238	± 39.8866
4	378	730	174	126.8666	84	238	± 39.8866
5	360	730	159	126.8666	84	238	± 39.8866
6	343	730	157	126.8666	84	238	± 39.8866
7	340	730	152	126.8666	84	238	± 39.8866
8	347	730	201	126.8666	84	238	± 39.8866
9	351	730	138	126.8666	84	238	± 39.8866
10	364	730	114	126.8666	84	238	± 39.8866
11	364	730	108	126.8666	84	238	± 39.8866
12	384	730	109	126.8666	84	238	± 39.8866
13	398	730	103	126.8666	84	238	± 39.8866
14	401	730	98	126.8666	84	238	± 39.8866
15	402	730	97	126.8666	84	238	± 39.8866
16	409	730	97	126.8666	84	238	± 39.8866
17	409	730	105	126.8666	84	238	± 39.8866
18	400	730	127	126.8666	84	238	± 39.8866
19	401	730	107	126.8666	84	238	± 39.8866
20	388	730	101	126.8666	84	238	± 39.8866
21	397	730	102	126.8666	84	238	± 39.8866
22	404	730	116	126.8666	84	238	± 39.8866
23	397	730	113	126.8666	84	238	± 39.8866
24	399	730	108	126.8666	84	238	± 39.8866
25	360	730	124	126.8666	84	238	± 39.8866
26	365	730	93	126.8666	84	238	± 39.8866
27	372	730	84	126.8666	84	238	± 39.8866
28	378	730	85	126.8666	84	238	± 39.8866
29	380	730	105	126.8666	84	238	± 39.8866
30	387	730	96	126.8666	84	238	± 39.8866

Las temperaturas del molde tienen un rango de 300°C-500°C (color amarillo y azul), la ondulación de la sábana significa que hay variación en los registros de los datos en base al recorrido de fluidez (Figura 156), la temperatura del metal es de 730°C (color vino).

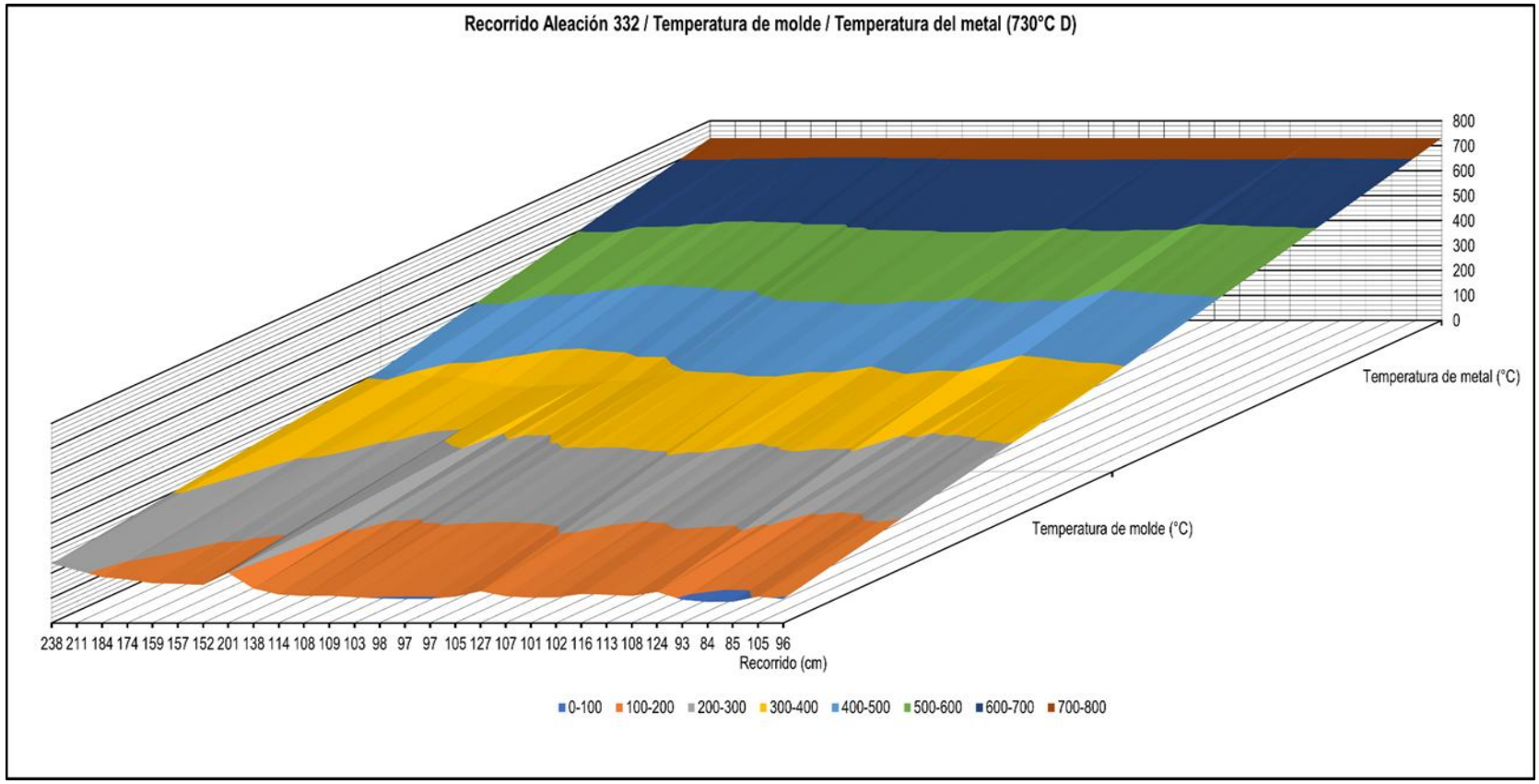


Figura 156: Trazado en 3D de la superficie de la trayectoria del flujo a una temperatura de 730°C con desgasificación

La figura 157 muestra 4 ciclos de trabajo, en cada uno se observan los diferentes comportamientos del fluido, cada vez que hay un retoque de pintura, el recorrido aumenta o disminuye dependiendo de la calidad de la pintura, las temperaturas siguen siendo la variable que influye en la fluidez para mantenerla estable.

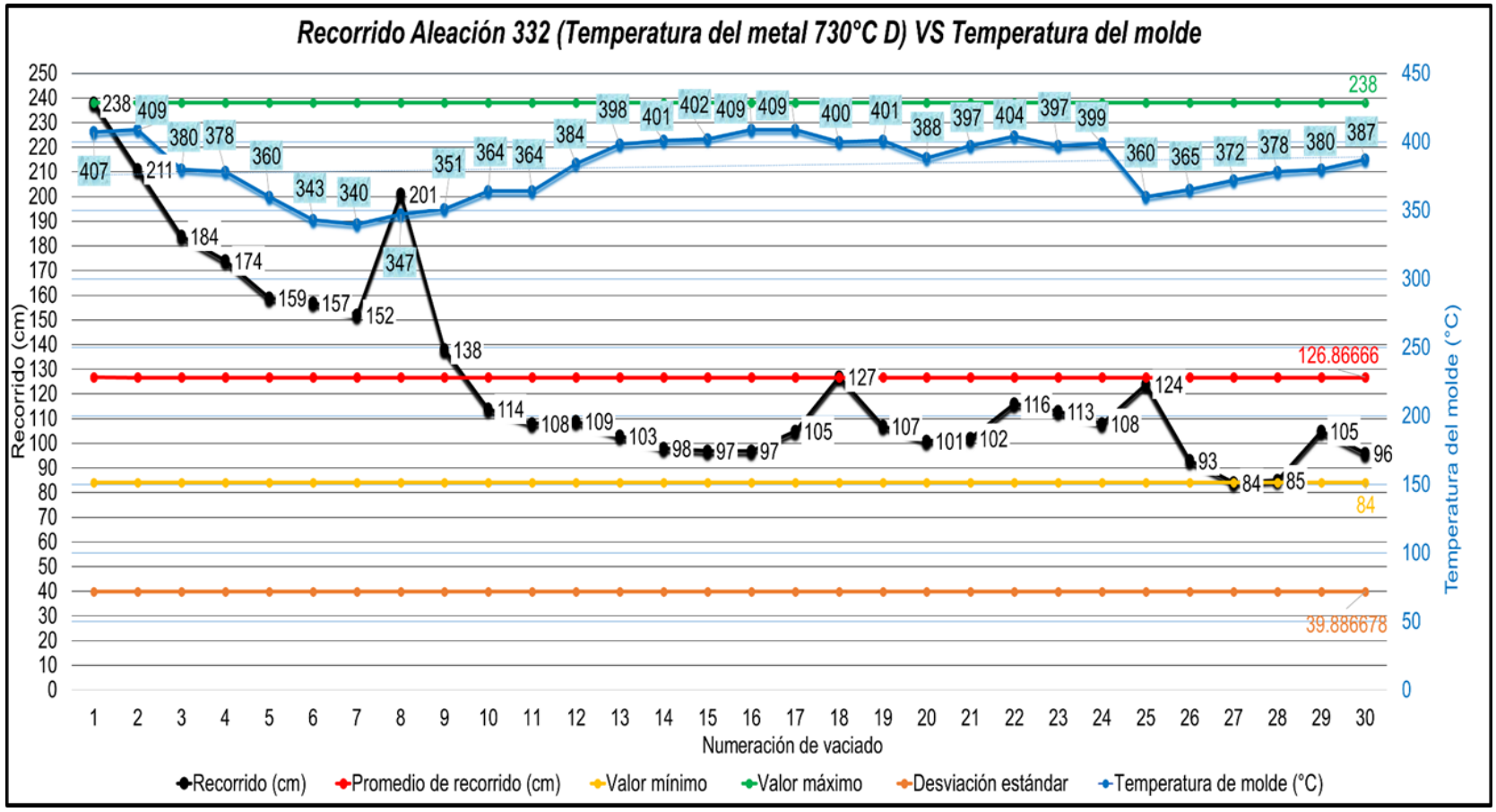


Figura 157: Gráfico lineal con marcadores de la trayectoria del flujo a una temperatura de 730 °C con desgasificación

La tabla 22 señala la eficacia que se tiene con respecto a las impurezas a altas temperaturas es de 46.32%, las inclusiones afectan para un proceso de vertido en el molde, aunque los recorridos den un promedio casi de la mitad del total del espiral.

Tabla 22: Recorridos de fluidez de la aleación 332 sin desgasificar a una temperatura de 730°C.

Aleación 332 SD (temperatura 730°C)							
Numeración	**Temperatura de molde (°C)**	**Temperatura de metal (°C)**	**Recorrido (cm)**	**Promedio de recorrido (°C)**	**Valor mínimo (cm)**	**Valor máximo (cm)**	**Desviación estándar**
1	350	730	142	110.25	96	142	± 11.9554
2	360	730	121	110.25	96	142	± 11.9554
3	359	730	107	110.25	96	142	± 11.9554
4	360	730	112	110.25	96	142	± 11.9554
5	356	730	103	110.25	96	142	± 11.9554
6	352	730	110	110.25	96	142	± 11.9554
7	351	730	107	110.25	96	142	± 11.9554
8	352	730	96	110.25	96	142	± 11.9554
9	355	730	108	110.25	96	142	± 11.9554
10	354	730	98	110.25	96	142	± 11.9554
11	352	730	107	110.25	96	142	± 11.9554
12	351	730	112	110.25	96	142	± 11.9554

La superficie del gráfico tiene casi una forma lisa porque las trayectorias no son tan variables según la figura 158 van desde 96 cm hasta los 142 cm, las temperaturas utilizadas son de 300°C-400°C (color amarillo) y la temperatura del metal es constante (color vino).

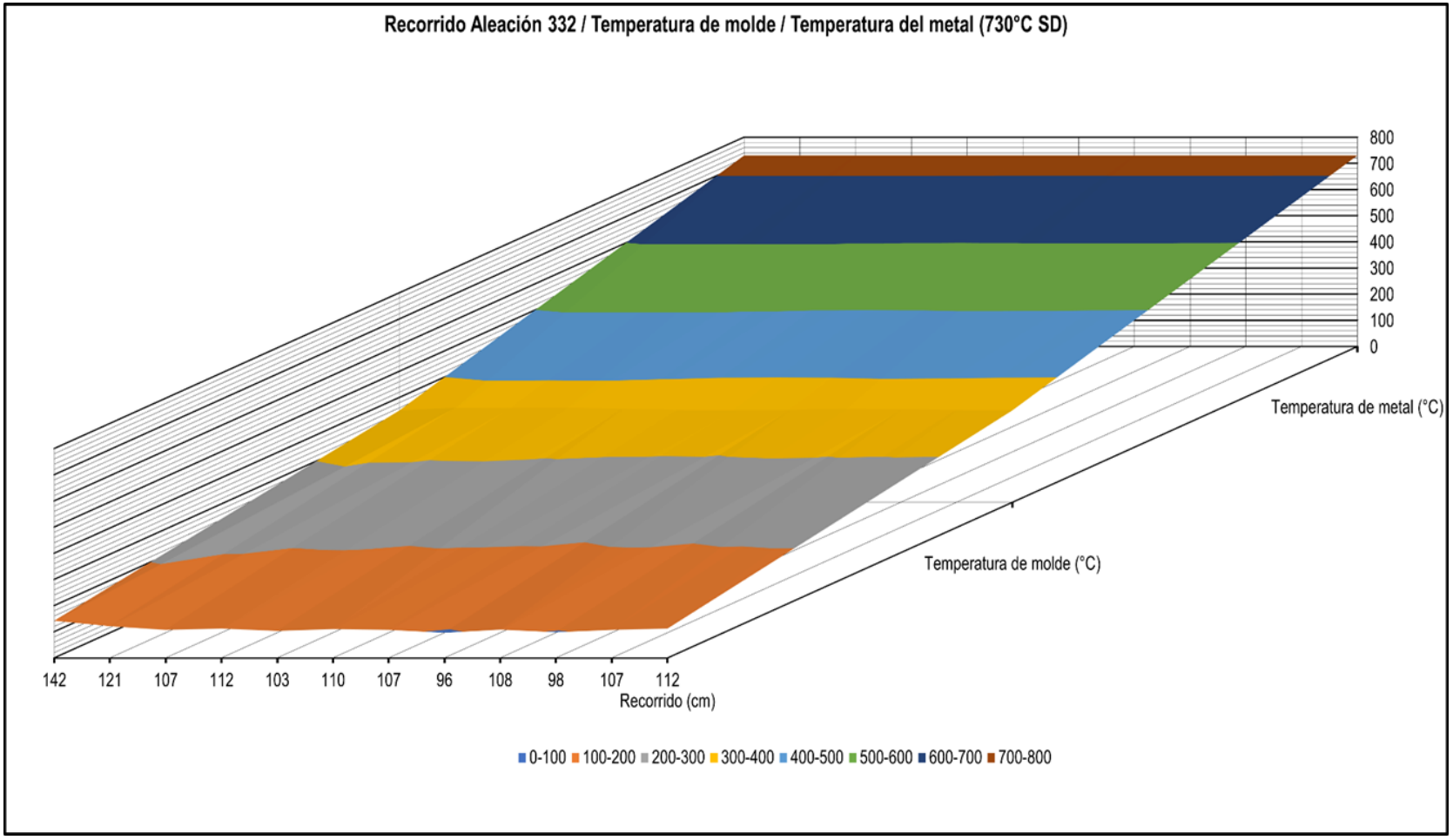


Figura 158: Trazado en 3D de la superficie de la trayectoria del flujo a una temperatura de 730°C sin desgasificación

El recorrido promedio para un metal no desgasificado a una temperatura de 730°C es de 110.25 cm, la trayectoria del flujo se mantiene en el intervalo de 96 a 142 cm a una temperatura media de 354°C. La desviación típica tiene un valor muy pequeño, lo que significa que los datos están agrupados y dentro de la media (figura 159).

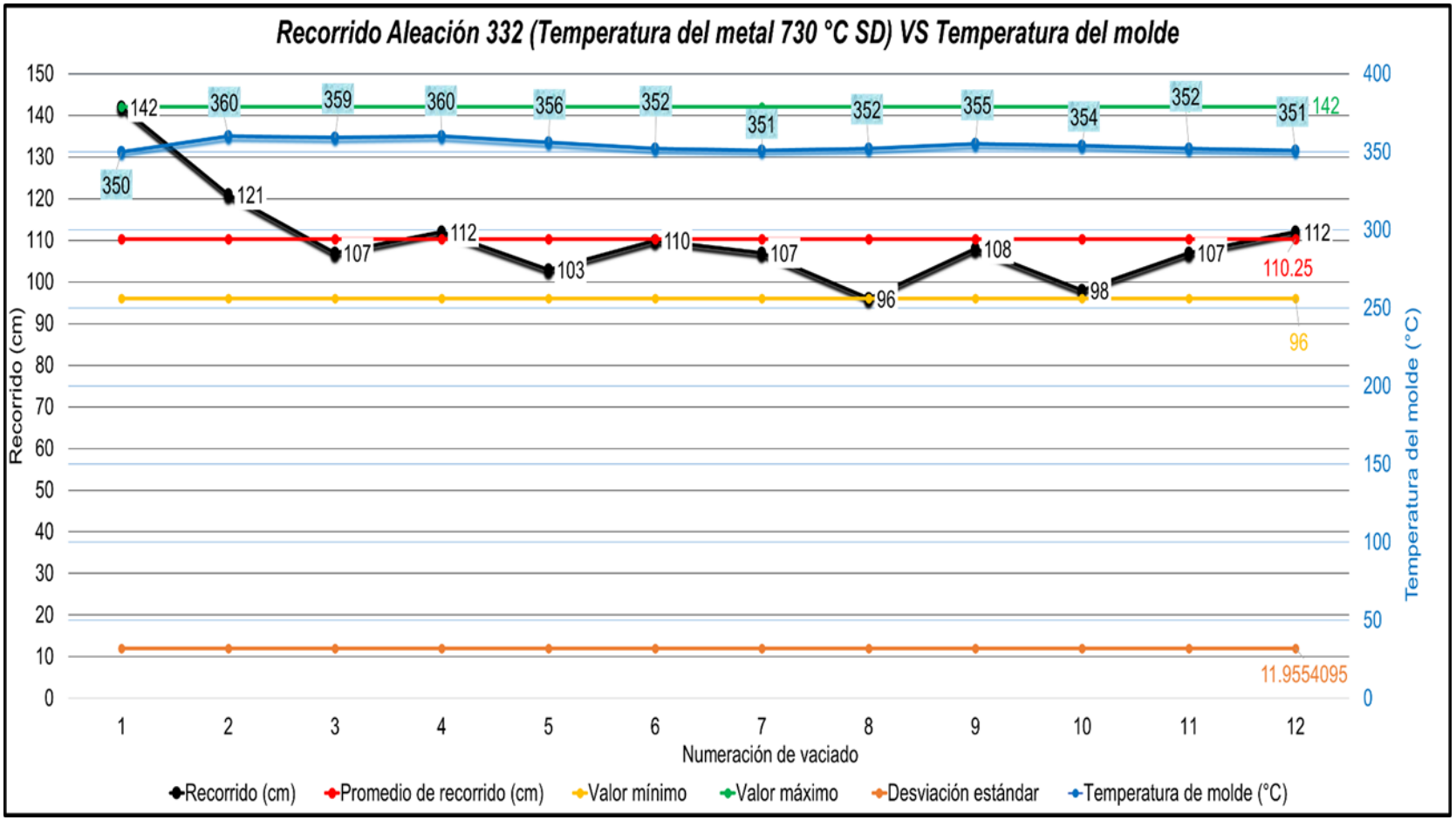


Figura 159: Gráfico lineal con marcadores de la trayectoria del flujo a una temperatura de 730 °C sin desgasificación

La tabla 23 indica que la mejor eficiencia en estas pruebas de fluidez en un molde con geometría en espiral es para el metal desgasificado a una temperatura de 710°C con un alto porcentaje de eficiencia de acuerdo a su recorrido promedio de fluido de 127.93 cm realizado en 30 pruebas, por lo tanto, existe una pequeña diferencia de 0.56% con el siguiente parámetro que fue tener el fluido a 730°C desgasificado.

Tabla 23: Recorridos de fluidez de la aleación 332 desgasificado a una temperatura de 690°C.

Parámetros Aleación 332 (°C / D ó SD)	Recorrido Promedio (cm)	Porcentaje de efectividad en pruebas de Fluidez (%)
690 D	106.3	44.66
690 SD	78.16	32.84
710 D	127.93	53.75
710 SD	107.4	45.12
730 D	126.6	53.19
730 SD	110.2	46.3

La figura 160 muestra la importancia de la desgasificación aplicada a la aleación. En el caso del metal desgasificado, la temperatura sufre un gran impacto al aumentar 20°C entre cada parámetro, dando una eficacia entre el 17% y el 18% en un proceso de fundición comparado con un metal sin desgasificar.

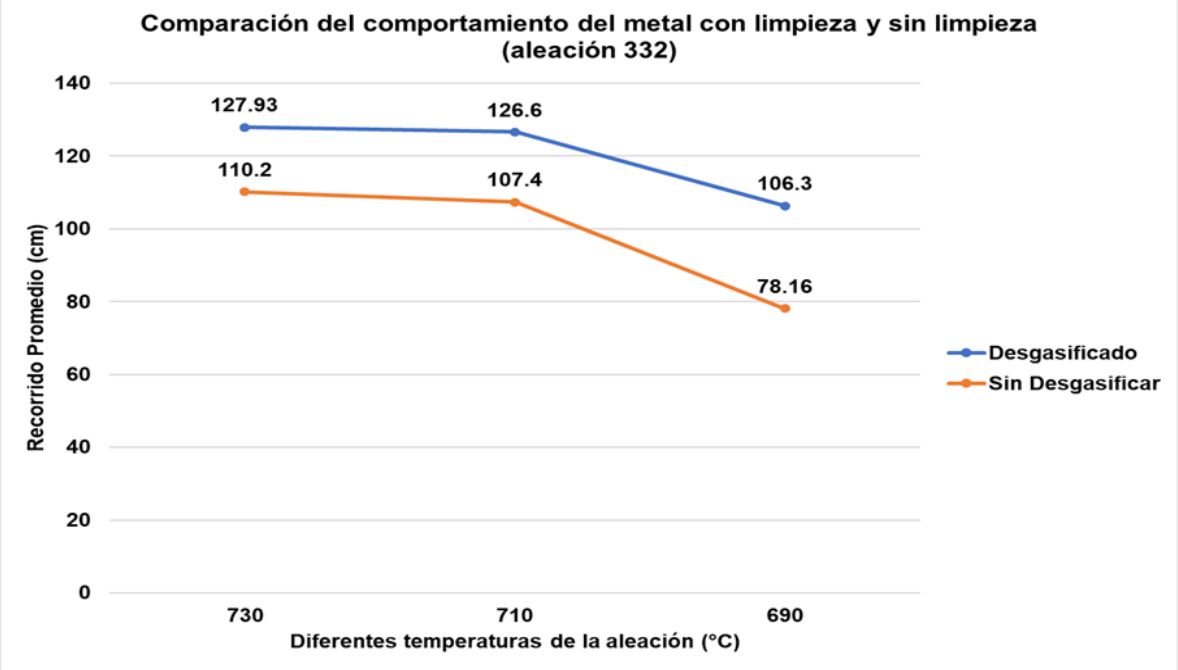


Figura 160: Comportamiento del metal con limpieza y sin limpieza a diferentes temperaturas 690 – 730°C (aleación 332)

3.1.19 Efectividad del quemador en las pruebas de fluidez

La temperatura fue tomada con una cámara térmica en las primeras 12 pruebas vertidas con los parámetros de temperatura: 690°C y 710°C; la tabla 24 muestra que hay 100°C de diferencia al implementar el calentador externo en los procesos de moldeo.

Tabla 24: Desempeño del quemador conforme a la variable de temperatura en el proceso de vaciado

Calentamiento del molde	Diferencias de temperaturas por el sistema de calentamiento (Aleación 356)		
	690°C D	710°C D	710°C SD
Con Quemador	402.58 °C	384.53 °C	388.8 °C
Sin quemador	297.08 °C	273.08 °C	269.83 °C

En cuanto a la eficiencia del flujo a baja temperatura (tabla 25), la diferencia porcentual usando un quemador externo fue de 1.14%, a temperatura intermedia fue de 18.37% y a alta temperatura hace muy poca diferencia porque la primera muestra tuvo un recorrido de 132 cm como se observa en la figura 142, mientras que nuestro flujo promedio fue de 95.8148 cm; aquí otra variable que resultó significativa para el recorrido es la calidad de la pintura y la limpieza del molde.

Tabla 25: Desempeño del quemador conforme a la variable de fluidez en el proceso de vaciado

Calentamiento del molde	Diferencias de porcentajes de eficiencia de fluidez por el sistema de calentamiento (aleación 356)		
	690°C D	710°C D	710°C SD
Con Quemador	34.89%	52.12%	40.16%
Sin quemador	33.75%	33.75%	40.36%

Al comparar ambas aleaciones de las series 300, resulta que la aleación 332 desgasificada presenta mejores porcentajes en un proceso de industrialización del molde para prueba de flujo. En la tabla 26 se observa que se favorece a la aleación 332 en porcentaje de efectividad en alta temperatura de 1.98%, media temperatura: 5.48% y baja temperatura 11.39% con respecto a la aleación 356.

Esto significa que la composición química tiene una gran influencia en la fluidez, la aleación analizada tiene un mayor porcentaje de silicio y cobre.

Sin embargo, la aleación 356 tiene más aluminio y titanio, lo que la hace más resistente y por eso la capacidad de fluidez disminuye.

Tabla 26: Comparación de la desgasificación de las aleaciones y su comportamiento porcentual ante la geometría total del espiral

Temperaturas de metal	**Desgasificación del metal entre ambas aleaciones**	
	356	332
730 D	51.21%	53.19%
710 D	48.27%	53.75%
690 D	33.27%	44.66%

3.1.20 Microestructura y composición química

El anexo A muestra las microestructuras tomadas a diferentes aumentos de 200x, 500x y 1000x con el microscopio electrónico de barrido de las muestras presentadas de los recorridos de flujo.

La tabla 27 muestra las dos mejores trayectorias de flujo recogidas para cada uno de los parámetros de colada en el molde espiral, clasificadas en una numeración de 2 a 6 por su tipo de crecimiento dendrítico (morfología del silicio), existiendo tres tipos: fibroso, fino y acicular.

En el proceso de solidificación la reacción comienza generando granos de alfa-aluminio cuando el líquido comienza a bajar la temperatura ya sea por la propia temperatura del ambiente o por chocar con las paredes del canal que están frías (menor temperatura) siendo la matriz de aluminio; el silicio eutéctico entra en fase de nucleación con otros modificadores de la aleación formando agujas de diferentes aspectos en el líquido.

La calidad de solidificación es llevada de mayor a menor escala, teniendo de esta manera una red cristalina fibrosa que permite mayor fluidez en el metal, o sea, donde el silicio se presenta en forma de agujas cortas homogéneamente distribuidas en el líquido presentando más cristales dentro de una red redonda, evitando que se presente una solidificación precoz permitiendo que el fluido tenga un enfriamiento uniforme.

Otro tipo es la morfología fina del silicio que presenta agujas largas pero finas lo que causa que el fluido se solidifique menos rápidamente.

En la microestructura acicular las agujas están entrelazadas porque son largas y gruesas ya que crecen en diferentes direcciones siendo una barrera a la fluidez, presentándose de manera instantánea cuando se vierte el metal, estas no se notan en conjunto.

Por otro lado, es posible tener una combinación de ambas redes cristalinas, la fibrosa con acicular significa que el modificador que se utilizó, como el estroncio, no

estaba bien distribuido en el líquido (modificación intermedia) y la fibrosa con la delgada indica que tuvo una solidificación rápida.

Es importante mencionar que no solo la morfología eutéctica del silicio, influye en la fluidez, sino que también depende de la temperatura del metal y su desgasificación, esta aleación 356 actúa mejor a una temperatura de 710°C desgasificada reflejándose en las muestras 7 y 17.

En comparación de los otros parámetros aplicados a la aleación a temperaturas altas (730°C) y bajas (690°C) se nota de la misma manera cuando se tiene el metal desgasificado por las diferencias en los recorridos.

Tabla 27: Mejores muestras recolectadas de la aleación 356 a diferentes parámetros de temperatura, su clasificación de modificación y morfología correspondiente

ID de la muestra	Fluidez de la muestra (cm)	Nivel de modificación	Morfología del silicio eutéctico
1 (-) 356 D	133	6	Fibrosa
13 (-) 356 D	117	2	Acicular
1 (-) 356 SD	117	6	Fibrosa y Fina
5 (-) 356 SD	84	6	Fibrosa y fina
7 (710) 356 D	190	6	Fibrosa
17 (710) 356 D	180	3 y 6	Fibrosa y Acicular
1 (710) 356 SD	132	6	Fibrosa
13 (710) 356 SD	115	2	Acicular
2 (+) 356 D	140	2	Acicular
5 (+) 356 D	150	6	Fibrosa
1 (+) 356 SD	165	2	Acicular
2 (+) 356 SD	102	2	Acicular

La Tabla 28 presenta las dos mejores trayectorias de fluido recogidas para cada uno de los parámetros de colada en el molde espiral, clasificadas en una numeración de 4 a 6 por su tipo de crecimiento dendrítico (morfología del silicio), indicando sólo un tipo: fibroso.

La calidad de solidificación es llevada de mayor a menor escala, por lo que tener una red cristalina fibrosa permite una mayor fluidez en el metal, es decir, donde el silicio se presenta en forma de agujas cortas distribuidas homogéneamente en el líquido mostrando más cristales dentro de una red redonda, evitando una solidificación temprana y permitiendo que el fluido tenga un enfriamiento uniforme.

Es importante mencionar que no solo la morfología eutéctica del silicio influye en la fluidez, sino que también depende de la temperatura del metal y su desgasificación, esta aleación 332 desgasificada actúa mejor a una temperatura de 730°C, lo cual se refleja en las muestras 1 y 2.

Tabla 28: Mejores muestras recolectadas de la aleación 332 a diferentes parámetros de temperatura, su clasificación de modificación y morfología correspondiente

ID de la muestra	Fluidez de la muestra (cm)	Nivel de modificación	Morfología del silicio eutéctico
1 (-) 332 D	227	4	Fibrosa
2 (-) 332 D	179	4	Fibrosa
1 (-) 332 SD	96	4	Fibrosa
6 (-) 332 SD	94	4	Fibrosa
1 (710) 332 D	188	6	Fibrosa
8 (710) 332 D	228	6	Fibrosa
20 (710) 332 SD	153	6	Fibrosa
25 (710) 332 SD	154	6	Fibrosa
1 (+) 332 D	238 (LLENO)	6	Fibrosa
2 (+) 332 D	211	4	Fibrosa
1 (+) 332 DS	142	4	Fibrosa
2 (+) 332 DS	121	4	Fibrosa

En estas pruebas de fluidez se lograron modificar cuatro elementos que componen la aleación, como se mencionó anteriormente, el aluminio es la matriz que sirve para generar la nucleación de otros elementos, además de sus propiedades químicas que les dan a las piezas fundidas: ligereza, resistencia y en la fundición les da facilidad de flujo en los moldes. La cantidad de silicio le da buena fluidez; el magnesio actúa endureciendo el elemento base de la aleación para algunos tratamientos térmicos (dándole buena resistencia mecánica). El estroncio se modificó principalmente para cambiar la morfología del silicio, formando agujas o placas que son ideales para que sus formas redondas, compacto u homogénea influyan en el crecimiento de la nucleación, estableciendo porcentajes de los elementos químicos de los que se compone la aleación para mantener un estándar con el que se obtenía una fluidez de mayor recorrido con respecto a las temperaturas y su proceso de desgasificación. Para obtener una mejor fluidez de colada de la aleación 356, la tabla 29 establece la composición química para una buena fluidez a una temperatura de desgasificación de 710°C.

Tabla 29: Composición química de las muestras con mayor índice de fluidez de la aleación 356 con limpieza y sin limpieza a diferentes temperaturas

Nombre	Al	Si	Sr	Mg	Mn	Zn	Fe	Cr	Ti	Cu	Ni
1 (-) 356 D	91.8	7.02	0.0081	0.266	0.21	0.052	0.39	0.026	0.053	0.096	0.014
13 (-) 356 D	92.2	6.82	0.0004	0.119	0.21	0.07	0.31	0.028	0.073	0.135	0.031
1 (-) 356 SD	91.8	7.34	0.0133	0.0081	0.21	0.067	0.3	0.021	0.075	0.115	0.02
5 (-) 356 SD	91.9	7.23	0.0141	0.0092	0.21	0.067	0.31	0.022	0.072	0.133	0.023
7 (710) 356 D	92.4	6.44	0.0088	0.251	0.22	0.063	0.32	0.036	0.065	0.141	0.019
17 (710) 356 D	92.1	6.93	0.0037	0.123	0.21	0.068	0.31	0.027	0.073	0.131	0.031
13(710) 356 SD	92.3	6.58	0.0003	0.233	0.21	0.071	0.3	0.027	0.071	0.133	0.032
1 (710) 356 SD	91.7	7.11	0.0066	0.255	0.22	0.043	0.37	0.038	0.053	0.126	0.013
2 (+) 356 D	92.4	6.67	0.00021	0.0358	0.21	0.068	0.3	0.027	0.073	0.13	0.03
5 (+) 356 D	92.6	6.47	0.0064	0.0513	0.21	0.068	0.3	0.027	0.075	0.137	0.031
1 (+) 356 SD	92.2	7.11	0.00015	0.0108	0.21	0.062	0.29	0.021	0.073	0.126	0.022
2(+) 356 SD	92.2	6.95	0.00015	0.0107	0.21	0.063	0.3	0.022	0.072	0.13	0.022

Para obtener una mejor fluidez de colada para la aleación 332, en la Tabla 30 se establece que, a una temperatura de desgasificación de 730°C, se debe tener una composición química de 86,6% de aluminio, 9,14% de silicio, 0,0091% de estroncio,0,328% de magnesio, 0,260% de Manganeso, 0,408% de Zinc, 0,623% de Hierro, 0,0216% de Cromo, 0,130% de Titanio, 2,26% de Cobre y 0,132 de Níquel.

Tabla 30: Composición química de las muestras con mayor índice de fluidez de la aleación 332 con limpieza y sin limpieza a diferentes temperaturas

Nombre	Al	Si	Sr	Mg	Mn	Zn	Fe	Cr	Ti	Cu	Ni
1 (-) 332 D	95.8	9.64	0.0123	0.576	0.241	0.376	0.587	0.0206	0.122	2.44	0.107
2 (-) 332 D	95.8	9.64	0.0123	0.576	0.241	0.376	0.587	0.0206	0.122	2.44	0.107
1 (-) 332 SD	85.4	10.53	0.0143	0.399	0.259	0.367	0.618	0.0222	0.115	2.33	0.102
6 (-) 332 SD	86.4	9.33	0.0126	0.394	0.268	0.363	0.613	0.0232	0.122	2.28	0.0986
1 (710) 332 D	86.5	9.14	0.0104	0.472	0.259	0.415	0.61	0.0215	0.127	2.28	0.139
8 (710) 332 D	86.4	9.27	0.0205	0.39	0.258	0.407	0.625	0.0209	0.13	2.29	0.139
20 (710)332 SD	86.2	9.18	0.0016	0.578	0.25	0.424	0.604	0.021	0.128	2.4	0.148
25 (710) 332 SD	86.3	9.31	0.00093	0.508	0.262	0.404	0.623	0.0221	0.132	2.2	0.132
1 (+) 332 D	86.6	9.14	0.0091	0.328	0.26	0.408	0.623	0.0216	0.13	2.26	0.132
2 (+) 332 D	96.2	9.54	0.0098	0.336	0.26	0.414	0.615	0.0222	0.127	2.28	0.139
1 (+) 332 SD	86.3	9.61	0.0355	0.373	0.247	0.357	0.585	0.0214	0.124	2.22	0.0969
2 (+) 332 SD	86.5	9.03	0.027	0.403	0.247	0.374	0.609	0.0217	0.128	2.44	0.105

3.1.21 Modelado de fundición en pruebas de fluidez en geometría en espiral

Como se muestra en el anexo C las simulaciones demuestran tener un sistema de calentamiento constante y con temperatura alta se mantiene la fluidez, sin en embargo el software que simula aproximaciones de cuanto llenaría la cavidad; no asemeja la realidad del moldeado debido al control de todos los parámetros manifestados que se presentan en el vaciado: tales como la velocidad de vertido, impurezas del metal, el impacto de diferentes temperaturas del molde y aleación, por último la calidad de la pintura.

El recorrido promedio es otro factor importante que se presenta en las simulaciones, las gráficas lineales indican que las primeras vaciadas registran cantidades altas de fluidez y distantes del vaciado continuo de moldeo. Debido al desgaste de la pintura, pero en el modelado ese parámetro será ideal y constante, siempre.

Se puede presenciar que, sin el quemador, la trayectoria del líquido va descendiendo debido a la perdida de calor en el molde, esto se confirma en las gráficas de la aleación 356, al momento de comparar ambas condiciones de manipulación del molde. Usando el quemador se manifiestan temperaturas favorables dentro y fuera de la geometría (figura 161).



Figura 161: Demostración del calentamiento del molde a través de una simulación por el quemador externo hacia la tapa fija.

3.2 Discusión

3.2.1 Diseño de experimentos para el proceso de pruebas de fluidez en un molde de espiral

Para dejar estadísticamente comprobado cuales son las variables controlables que pueden influir en el vaciado del metal, se realizaron estudios sobre los diseños experimentales como un ANOVA (Análisis de varianza) y DOE (Diseño de experimentos); el experimento es llamado multifactorial debido a que los factores tienen diferentes niveles como se muestra en la figura 162.

Información del factor

Factor	Niveles	Valores
Aleación	2	332, 356
Aplicación de pintura	2	0, 1
Temperatura de metal	3	690, 710, 730
Desgasificado/sin desgasificado	2	D, SD

Figura 162: Factores ingresados en el software Minitab® que nos dieron respuestas a diferentes comportamientos de fluidez

La gráfica de efectos principales como se observa en la figura 163 indica cual aleación tuvo una mejor fluidez en promedio de las dos series de aleaciones, cuyo valor es 104.34 cm, siendo esta la media acorde a los resultados de los recorridos, así se demuestra cuales parámetros afectaron o beneficiaron a la fluidez como la pintura, el desgasificado y las distintas temperaturas de vaciado.

La aleación 332 tuvo un mejor desempeño para ambas aleaciones, el impacto de la pintura (1) fue mayor a cuando no se tenían retoques (0), el desgasificado beneficia al flujo y el comportamiento a temperaturas a partir de 700°C otorga mayores recorridos.

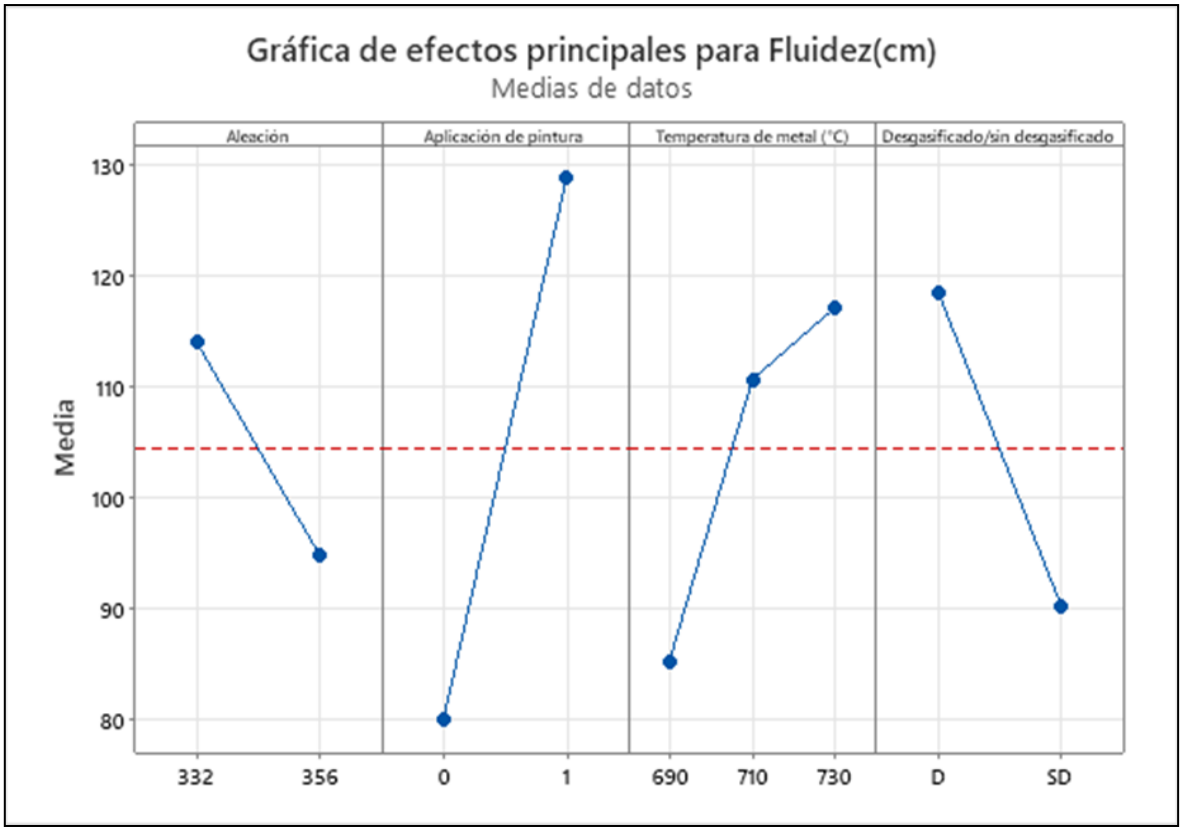


Figura 163: Gráfico de efectos principales que se presentaron en los datos fluidez

Los diferentes datos correlacionados y sus propias medias de las aleaciones, nos dan una estimación del desempeño que se logró con cada interacción, la aleación con la aplicación de pintura es superior a cuando no hay retoques cada 6 a 8 ciclos de su vaciado; la aleación con mayor fluidez en las pruebas fue la serie 332 a diferentes temperaturas y por último su relación con la desgasificación es mejor en ambas que cuando no se desgasificaba.

La aplicación de pintura conforme a la temperatura del metal mejora el recorrido cuando hay retoques, sin embargo, cuando el molde se encuentra granallado y el líquido está recién desgasificado, los recorridos de fluidez serán superiores, esto se confirma con los trayectos de las gráficas lineales.

La figura 164 muestra el comportamiento de la aleación con temperaturas por encima de los 710°C, sin impurezas por el proceso de desgasificado y el control de los elementos químicos por su análisis térmico, favorece al llenado de la cavidad del molde.

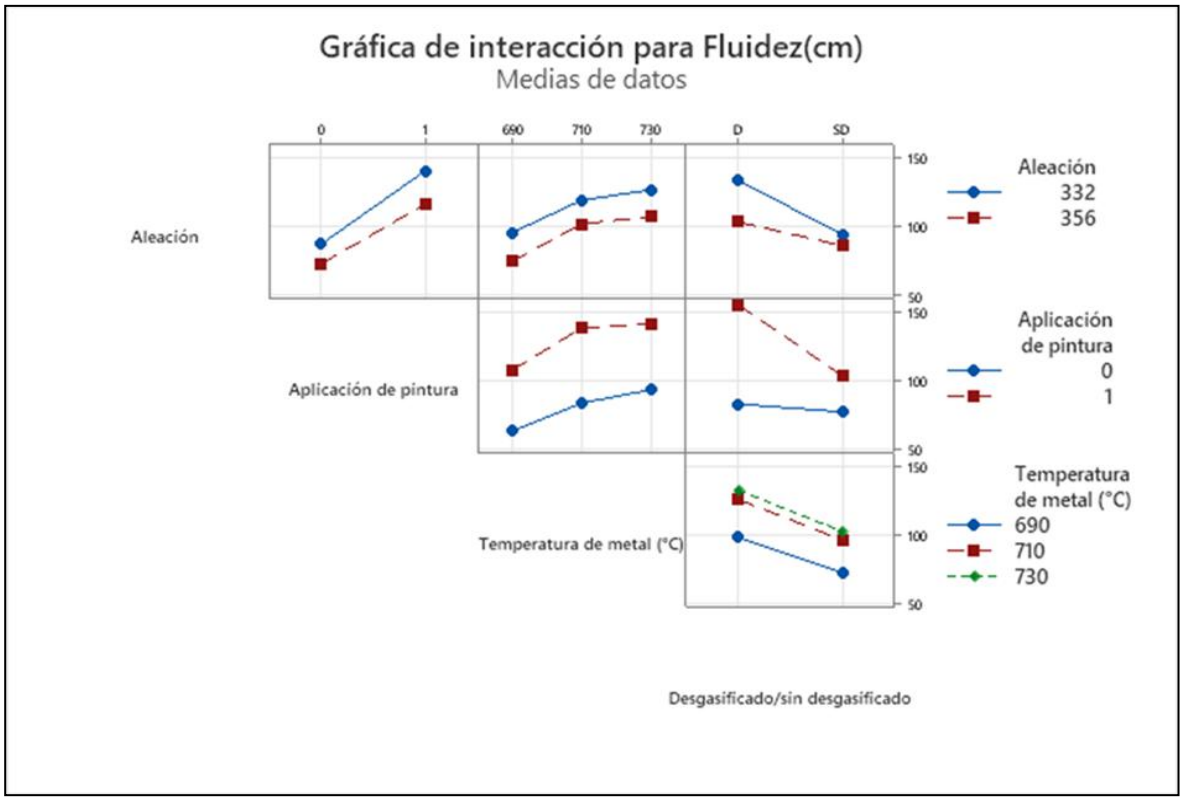


Figura 164: Gráfica de interacción entre los efectos de desgasificación, temperatura de metal, aplicación de pintura y el tipo de aleación.

En el DOE (figura 165), el diagrama de Pareto de efectos estandarizados existe un valor-P, esto quiere decir que por arriba de este valor las causas generan un porcentaje mayoritario de efectos, por otro lado, sus posibles independencias o relaciones son significativas y tienen un impacto mayor en la fluidez.

En la representación del diagrama se tiene un mayor efecto estandarizado que tiene un rango numérico de 0 a 12 por orden descendente representando la magnitud de la varianza con las variables dependientes o independientes.

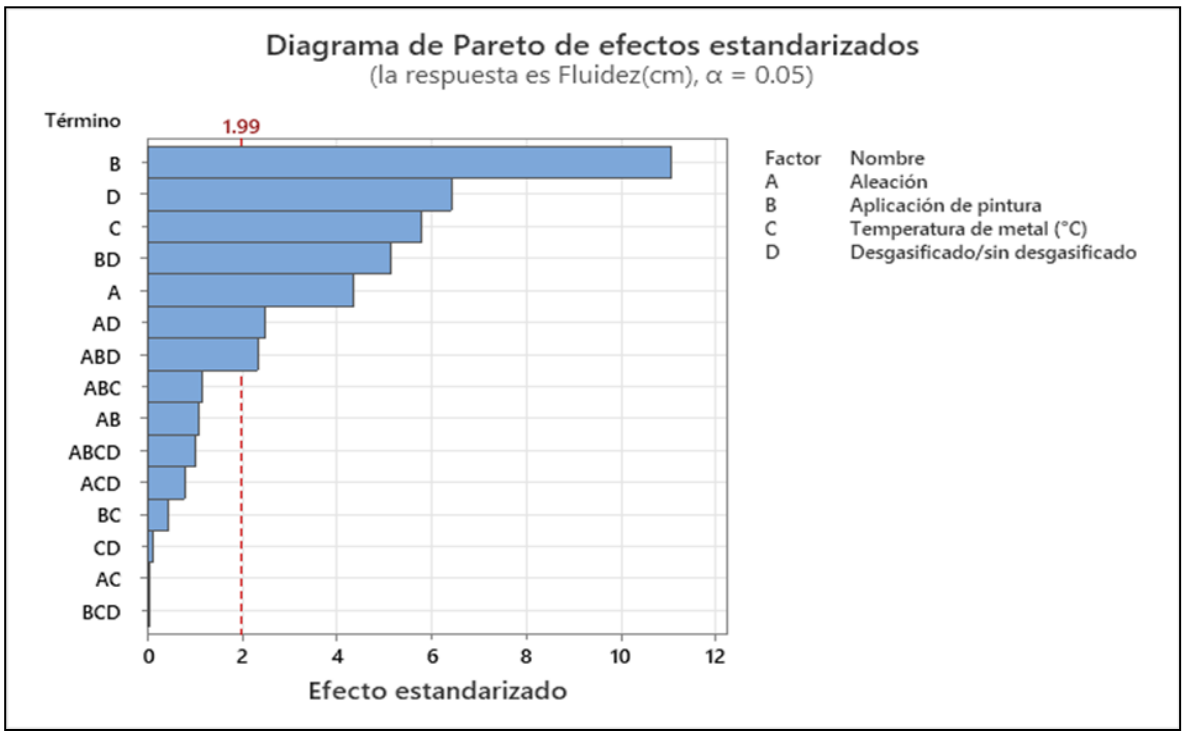


Figura 165: Diagrama de Pareto de efectos estandarizados y sus combinaciones clasificadas en un rango de 0-12 de varianza de las variables para ambas aleaciones

En los análisis y resultados estadísticos da un R-cuadrado de 78.85% que indica una buena proporción de variabilidad de la variable principalmente por el desgasificado, mientras que el 21.15% restante es debido a los valores alejados de fluidez (como se muestra en el anexo B) debido a las condiciones “ideales” del molde con relación a la pintura que lo recubre y ha presentado desgaste; el modelo puede enriquecerse añadiendo otros factores con efectos colaterales considerando los rechupes y poros que afectan a la fluidez como se muestra con detalle en el anexo D.

3.2.2 Comprobación de los efectos individuales de cada aleación

Para justificar el comportamiento de ambas aleaciones, se establecieron por separado los análisis estadísticos de las variables que influyeron en las pruebas de fluidez respecto al molde de espiral.

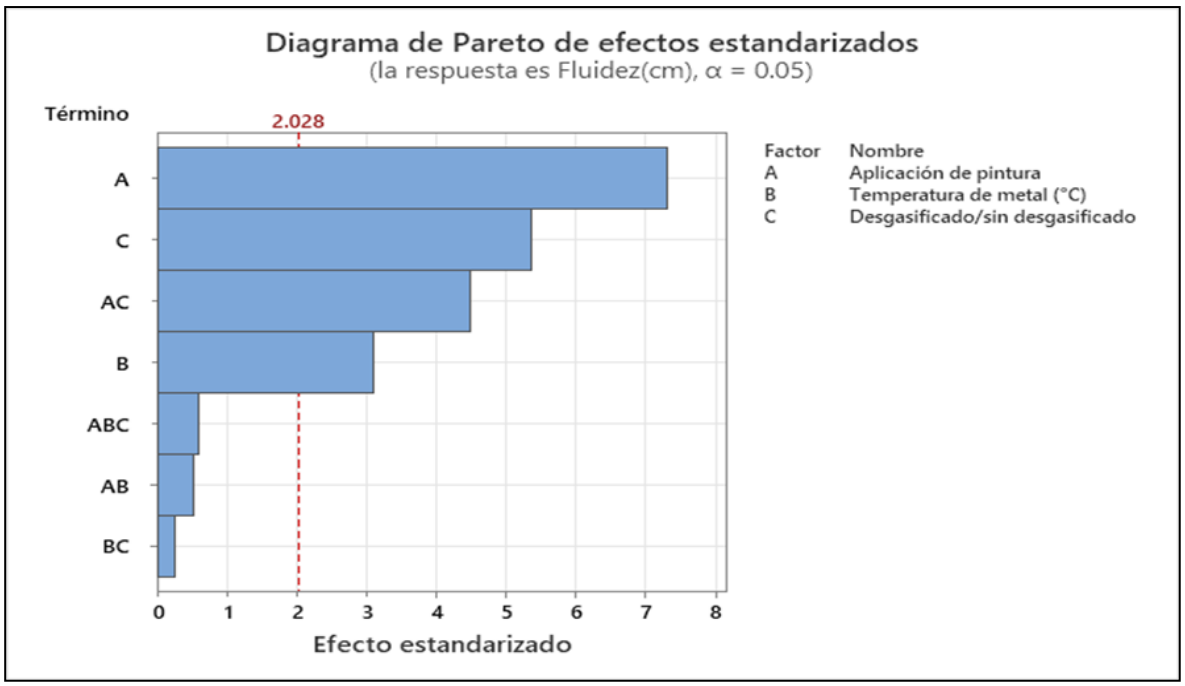


Figura 166: Diagrama de Pareto de efectos estandarizados y sus combinaciones clasificadas en un rango de 0-8 de varianza de las variables para la aleación 332

La principal diferencia que existe entre la aleación 332 es su desgasificación y su respuesta ante la aplicación o estado de la pintura (figura 166), la temperatura del metal es significativa; sobre todo para la aleación A356(figura 167) debido a los distintos recorridos experimentados entre cada parámetro de temperatura

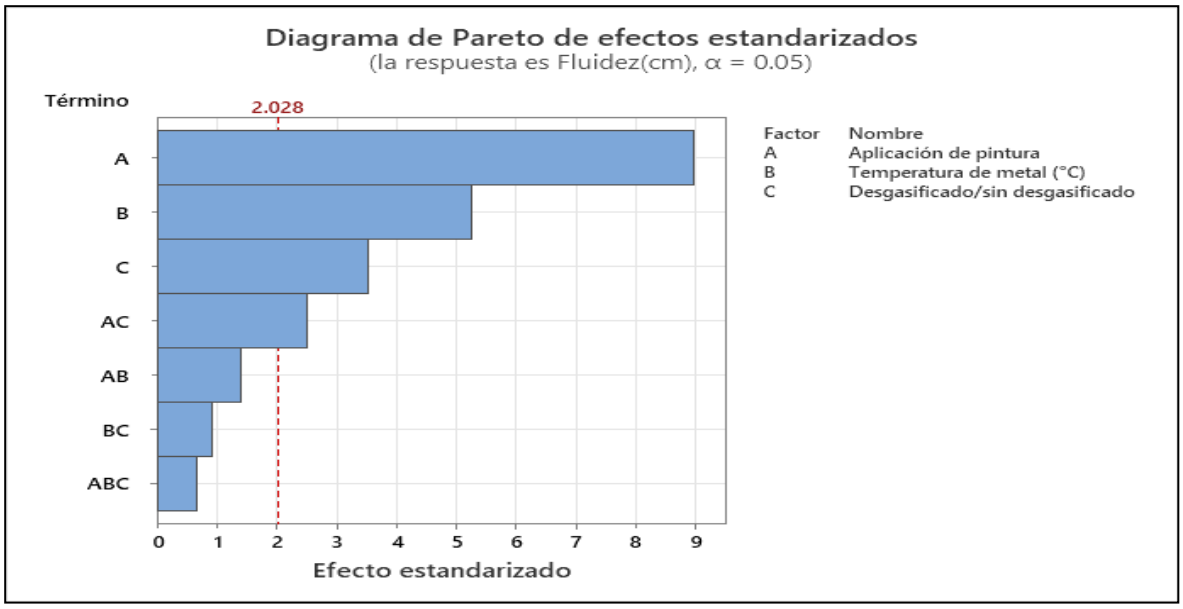


Figura 167: Diagrama de Pareto de efectos estandarizados y sus combinaciones clasificadas en un rango de 0-9 de varianza de las variables para la aleación 356

3. Conclusiones

Al utilizar la geometría de la espiral ayudó a realizar simulaciones previas antes del vertido además de establecer dimensiones reales del molde fabricado para adaptar y comparar diferentes conos de alimentación de esta manera adecuarlo para la colada en el molde.

En este caso se eligió un cono con abertura de 2.4 cm en el fondo del cono y 8.32 cm en el área superior del cono debido a que si se llegan a hacer las modificaciones propuestas en el molde este pueda servir para futuras pruebas y se vean mejoras respecto a las primeras pruebas hechas en el molde que se encuentra originalmente diseñado y con las que fue fabricado; para la adaptación de este cono fue necesario modificar la entrada del molde para que el fluido entrará en la cavidad del molde.

La modificación en el software 3D del molde de espiral ayudó a determinar que, si la forma del canal es modificada a dimensiones amplias, ayudará a que se tenga un mayor volumen del fluido y este pueda recorrer con mayor facilidad la cavidad puesto que si esta es más grande mantendrá una mayor temperatura y el volumen metalostático será mayor, esto se puede ver en el recorrido que se obtuvo de 59 cm. Otra situación considerable fue identificar las zonas en el que el molde se estaba enfriando debido al uso de aceite como método de calentamiento el cual pasa entre los tubos roscados en la tapa inferior del molde en espiral; esto afecta el recorrido de las pruebas, la recomendación es tapar esos ductos con aluminio fundido.

Las simulaciones permiten hacer una preparación y optimización antes del vaciado real. El control de variables sigue siendo tan importante para ajustar y refinar el proceso en condiciones y observaciones prácticas.

La comparación entre la simulación y las pruebas de vertido en el molde de espiral resultaron en que el fluido físico tuvo un recorrido mejor que en las simulaciones(de 59 a 109 cm de recorrido) a pesar de que se haya esparcido fuera del molde en la

primera vuelta del espiral (contraparte de donde se ubican las bisagras de mariposa) debido a que no estaba bien sellado; el software tiene algunas limitaciones a algunas condiciones que en la realidad se pueden controlar como la temperatura del molde, la temperatura del fluido, recubrir el molde con cierto espesor de pintura y revestimiento que mejoren el recorrido del fluido, el vertido,etc) y variables que no se pueden controlar (la temperatura del ambiente, la humedad del aire y algunas variaciones en la calidad del aluminio).

Las evaluaciones efectuadas para medir el desempeño del molde en espiral mostraron que los principales problemas (fugas, deformación, residuos de la aleación en la tapa fija y separación de ventilas durante los vaciados) influyen directamente en la eficacia del llenado en el molde con geometría en espiral.

Con un recorrido promedio de 121.43 cm, como se mostró que mejores recorridos obtenidos se hacen a temperaturas elevadas (400 °C), llegando a trayectos de hasta 175 cm, sin embargo, a temperaturas más bajas (270-280 °C) reducen el flujo a menos de 115 cm. La aplicación de espesores de soldadura de 0.05 mm mejora el sellado y la aplicación de pintura ayuda parcialmente al flujo metálico debido a la compensación de la zona de sello.

La simulación con Magmasoft® ayudó a la visualización y modificación de parámetros antes de los ensayos físicos, lo que mejoró el diseño del molde y a anticipar los resultados de los vaciados.

Al cambiar el material de la tapa superior a la que estaba fabricada la tapa móvil por un material de acero H13 con un mayor espesor, nos permitió hacer un proceso continuo de vaciado y conseguir pruebas de fluidez sin defectos permitiéndonos trabajar a diferentes temperaturas de la aleación.

El punto crucial para mantener un recorrido de fluidez en el molde de pruebas en espiral fue implementar un quemador en la parte inferior de la mesa donde se localiza el molde y este conservará una temperatura constante en la etapa de calentamiento (transferencia de calor); además de que esto contribuía a que el

aluminio en su estado sólido no se atascará en las cavidades del molde debido a su contracción y perdida de temperatura.

Los análisis estadísticos conforme a los resultados recolectados de los recorridos de fluidez y el comportamiento que generaban a distintas fases de temperatura, dan como resultado que la pintura es el principal factor para incrementar la longitud de los espirales, acompañado de una desgasificación al metal.

La variable en común entre las dos aleaciones es la temperatura de metal, al tener una mayor temperatura se tienen mayores recorridos de fluidez siempre cuando los factores de limpieza de la aleación y pintura estén controlados.

La diferencia significativa es cuando comparamos los dos tipos de aleaciones de series 356 y 332, de acuerdo a la representación gráfica de los datos; los recorridos son susceptibles a las composiciones químicas donde su principal efecto es la cantidad de silicio empleada de un 6.88% a un 9.44%, con una variación de 20 cm de recorrido promedio a temperaturas de 690°C hasta 730°C. Es importante mencionar que los factores mencionados con anterioridad continúan siendo válidos para este caso.

La clasificación de la modificación microestructural permitió relacionar las mejores pruebas y saber que fases intermetálicas del Al-Si nos otorgan mejores recorridos de fluidez; las formas de las estructuras con forma de agujas largas en el material ocasionan una reducción de propiedades mecánicas como su vida útil, resistencia, y ductilidad. Por consiguiente, se requieren agujas redondeadas o fibrosas en base a su enfriamiento y composición química, teniendo una modificación más firme y resistente.

En el proceso de vaciado en un molde permanente con geometría en espiral para pruebas de fluidez existen condiciones no previstas como efectos físicos que ocurren de modo inherente por solidificación y contracción en la pieza extraída del molde ante una diferencia térmica, siendo estos: rechupes, porosidades, grietas, deformaciones, segregaciones e inclusiones, como se evidencia con las pruebas realizadas con rayos x a los espirales extraídos del molde.

4. Recomendaciones

A modo de experiencia, vivencia y aprendizaje. Este tema de investigación aplicado en un ámbito académico-empresarial hacia los efectos de las aleaciones Al-Si, así como su modificación a las pruebas de fluidez; contiene un amplio campo de estudio hacia la fabricación e innovación de productos con un valor agregado en conjunto del ajuste, mejora e impacto en los parámetros de producción y reducción de scrap.

Adicionalmente la tesis actualmente tiene una relevancia y trascendencia en campos de investigación avanzados, fusionando conocimientos de diferentes áreas como las ciencias de los materiales, metalurgia y mecatrónica promoviendo e incentivando a profundizar a futuro con temas relacionados.

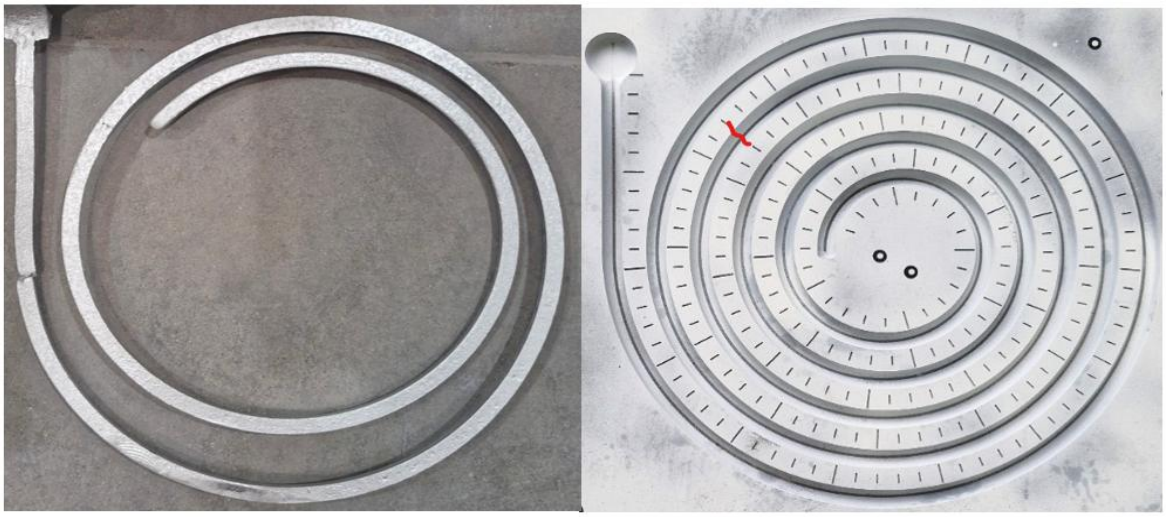
Los resultados divulgados de este trabajo final de titulación están siendo evaluados para publicarlos en la revista “American Foundry Society”, evidenciando el aporte en el desarrollo investigativo.

El proyecto de investigación es factible para profundizar en aspectos aún no abordados como el análisis microestructural de los efectos que pueden tener distintas aleaciones sin restringirse a estas dos series de aluminio, el estudio de diferentes recubrimientos, establecer con precisión los resultados de fluidez en las simulaciones de vaciado para que se repliquen en la práctica, los ajustes funcionales y aplicaciones directas a distintos moldes e incluso contribuir a la reducción de piezas rechazadas en producción; favoreciendo al acoplamiento de diferentes parámetros en el proceso de fundición con un impacto científico.

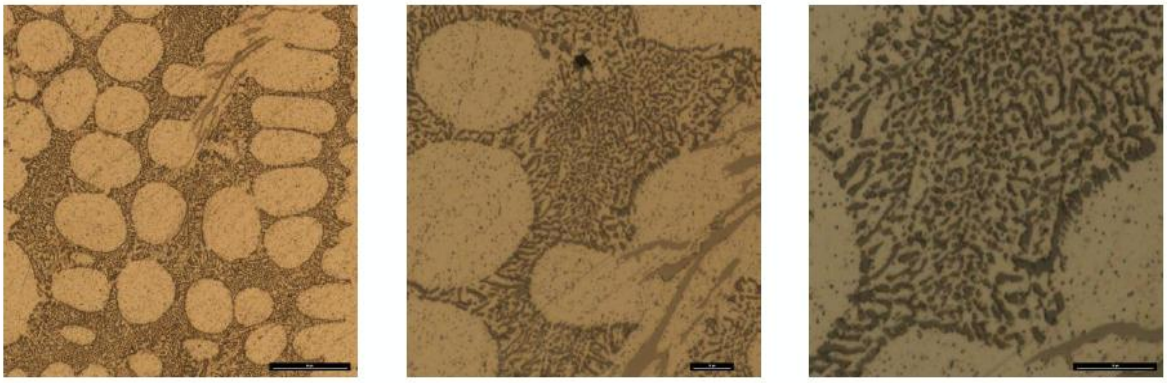
Anexo A

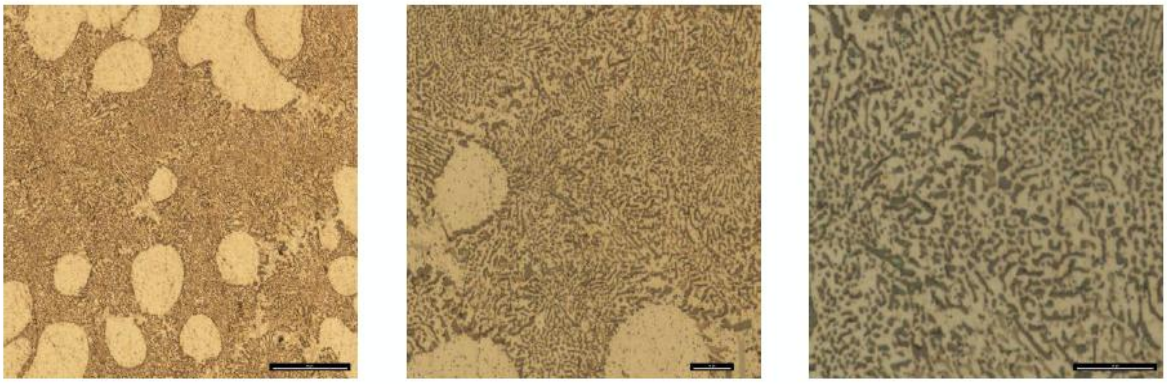
Aleación 356 desgasificada (temperatura 688-690°C)

1 (-) 356 D	133 cm	6	Fibrosa



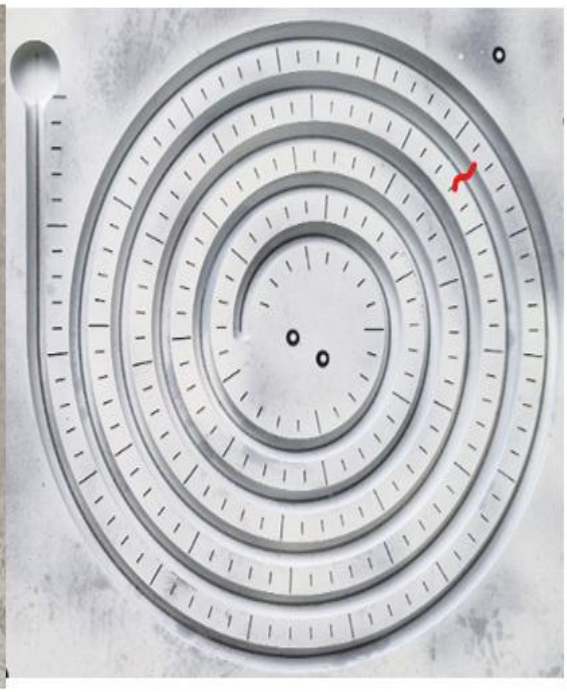
200x 500x 1000x



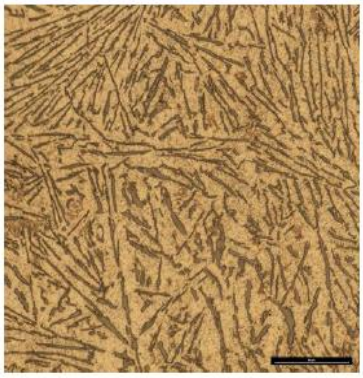


13 (-) 356 D	117 cm	2	Acicular

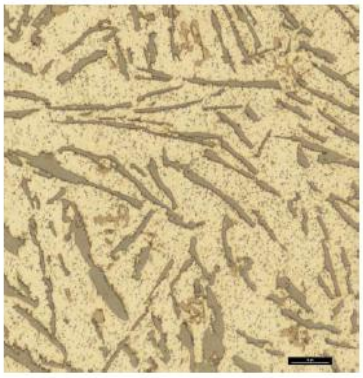




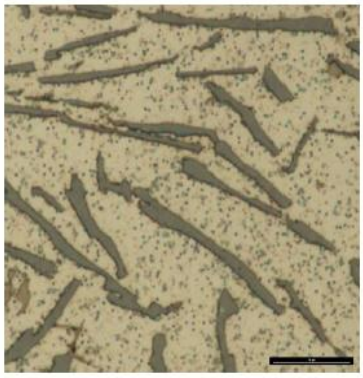
200x

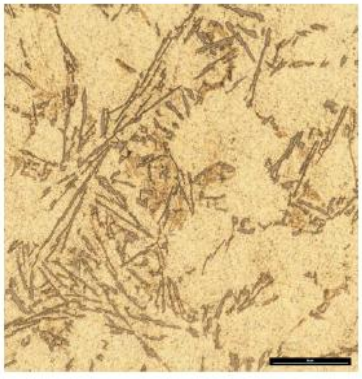


500x

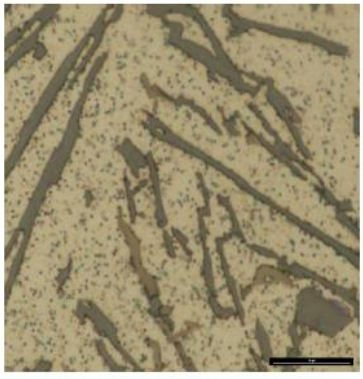


1000x



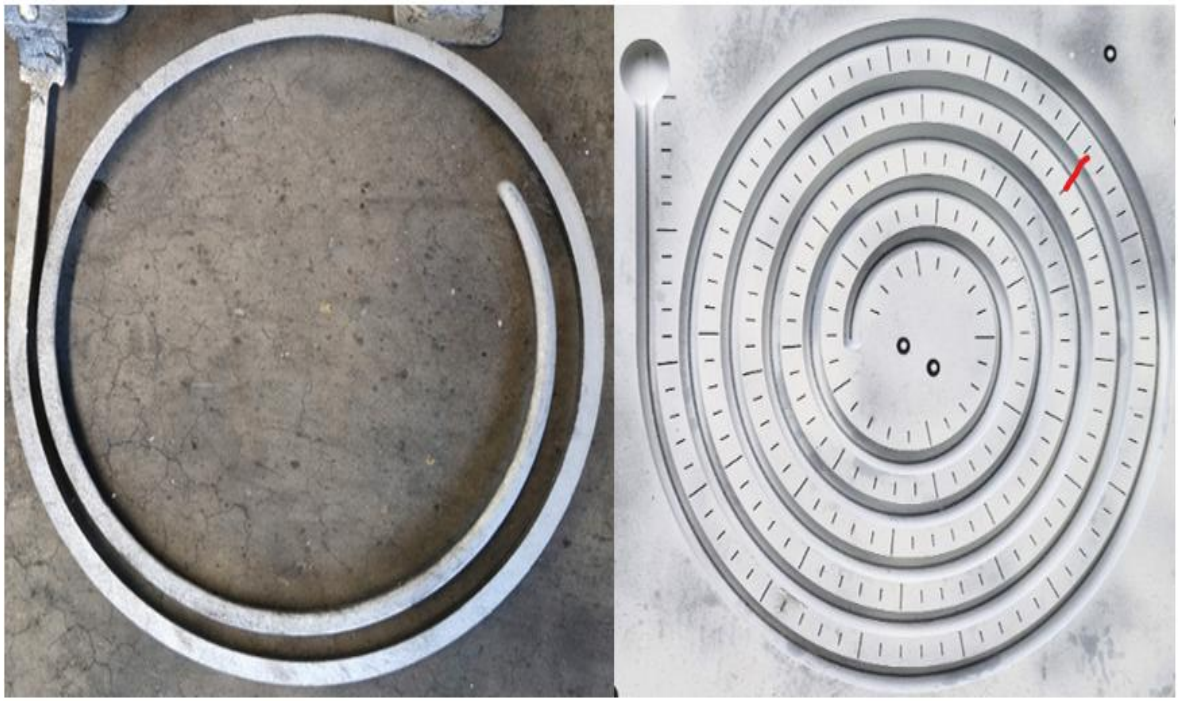




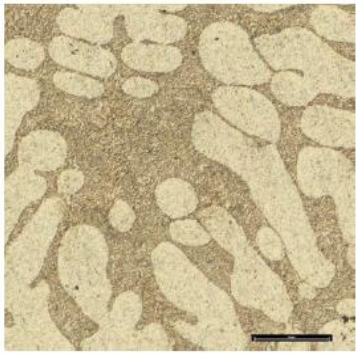
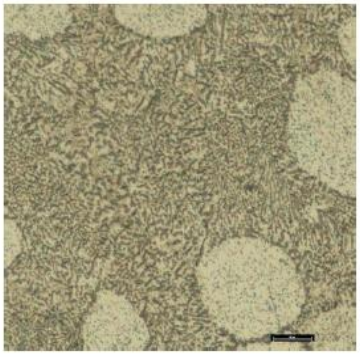
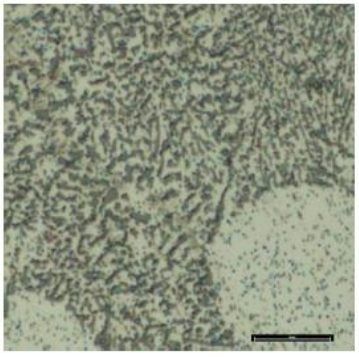
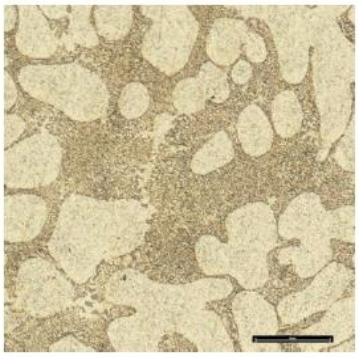
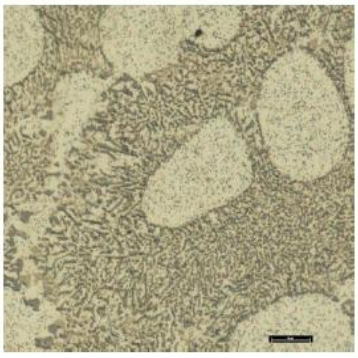
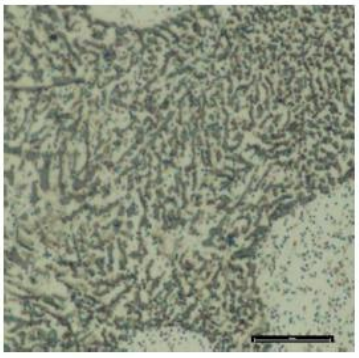


Aleación 356 sin desgasificar (temperatura 690°C)

1 (-) 356 SD	117 cm	6	Fibrosa y Fina

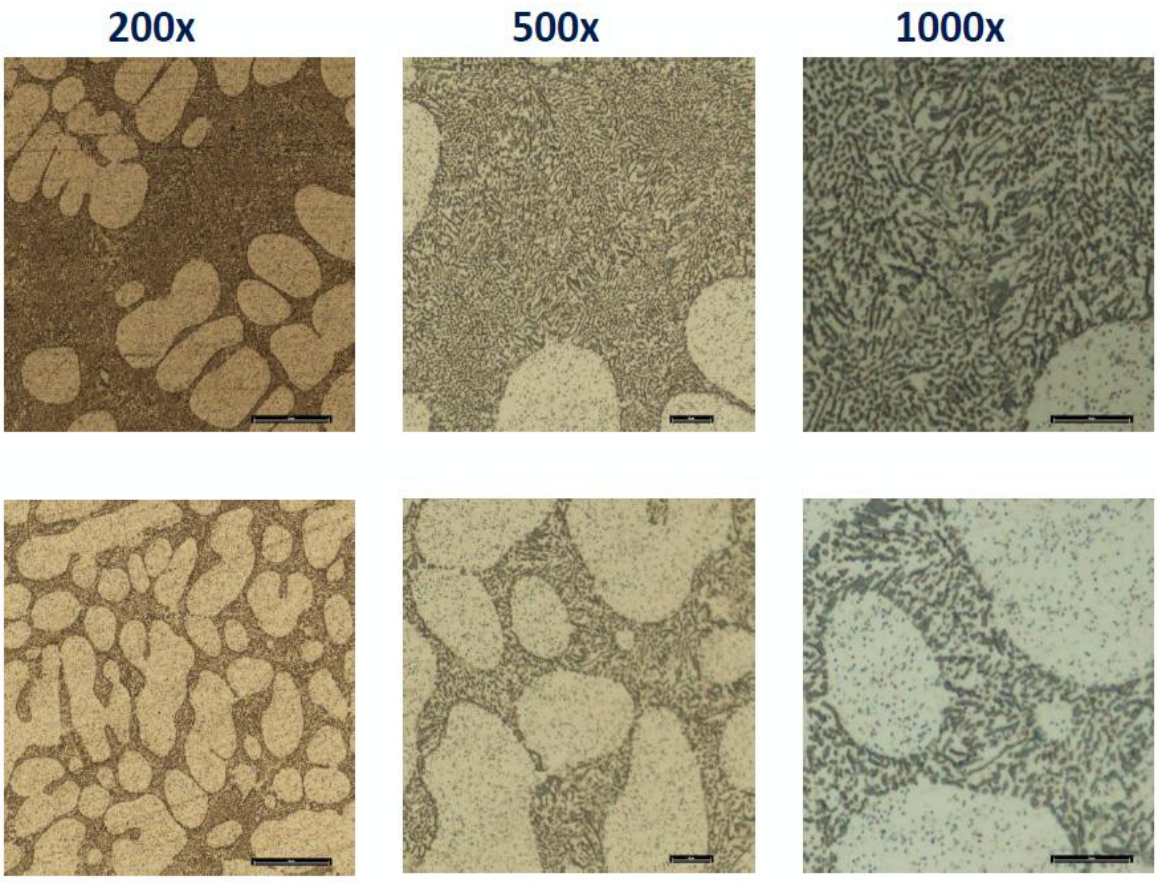


200x 500x 1000x

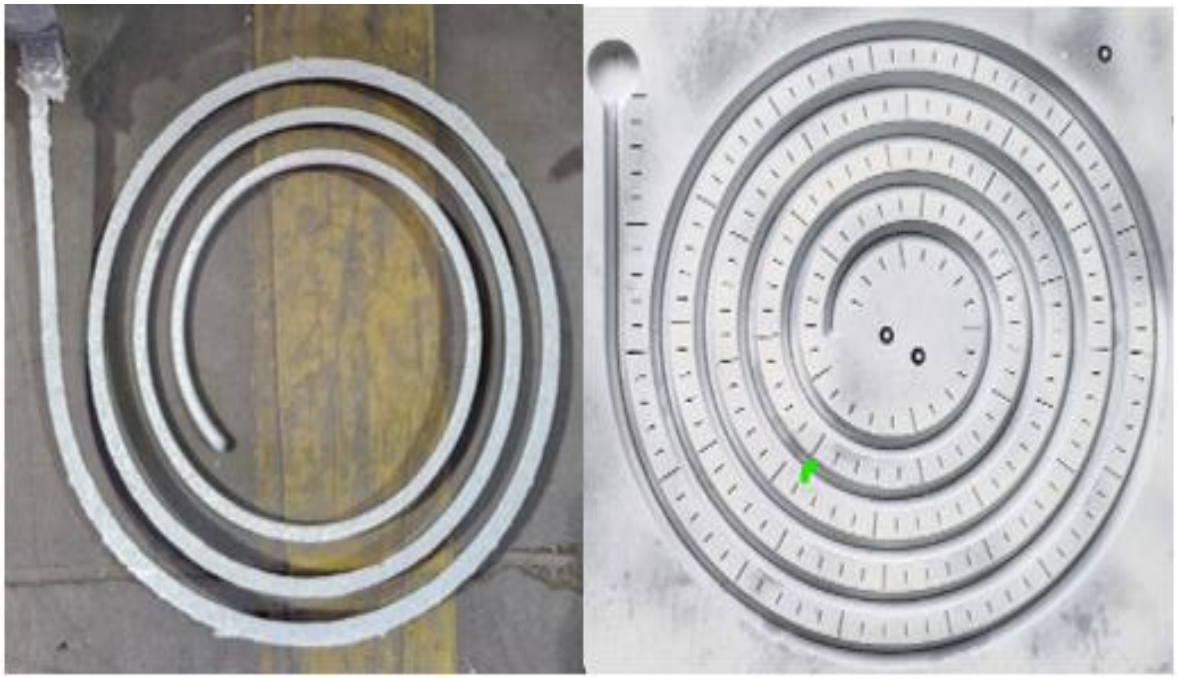
5 (-) 356 SD	84 cm	6	Fibrosa y fina

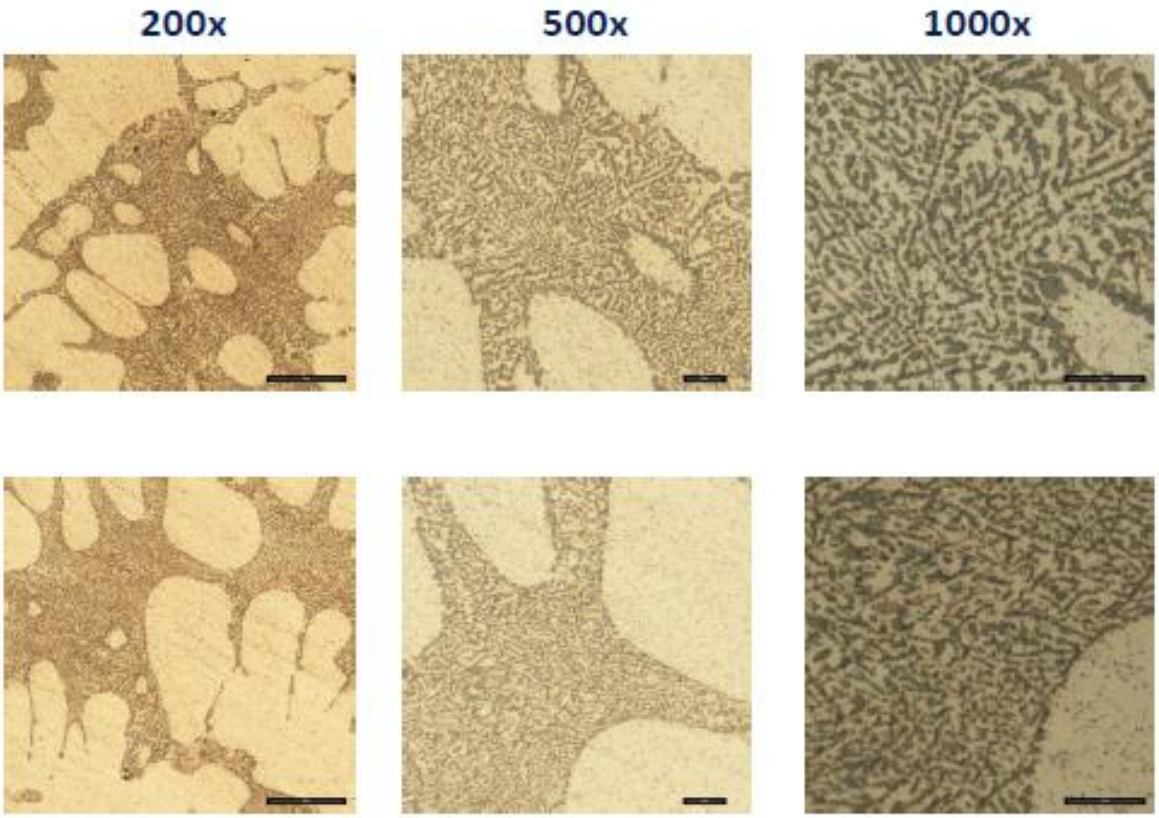




Aleación 356 desgasificada (temperatura 710°C)

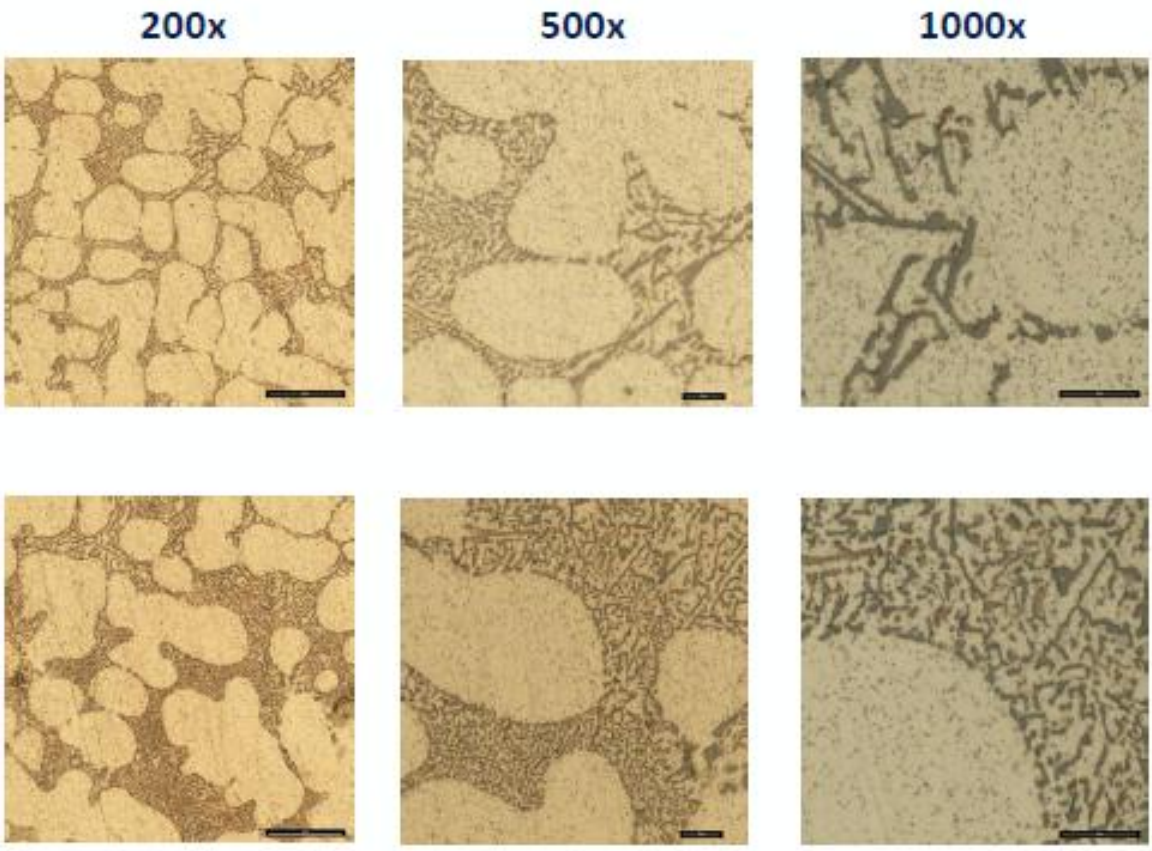
7 (710) 356 D	190 cm	6	Fibrosa





17 (710) 356 D	180 cm	3 y 6	Fibrosa y Acicular





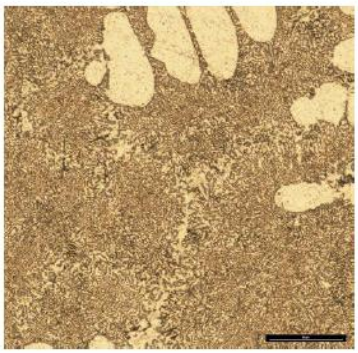
Aleación 356 sin desgasificar (temperatura 710°C)

1 (710) 356 SD	132 cm	6	Fibrosa

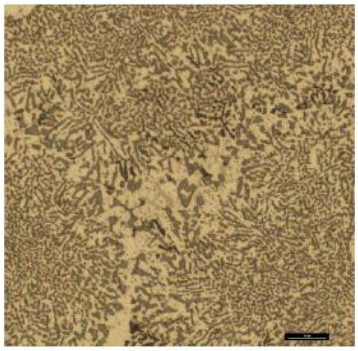




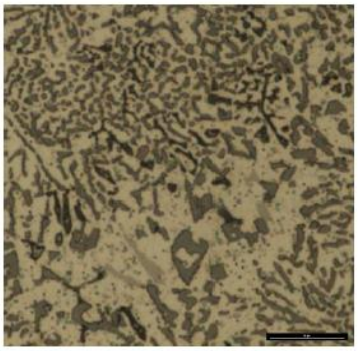
200x

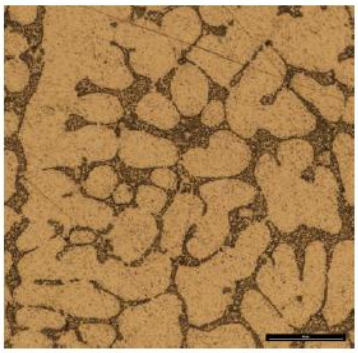


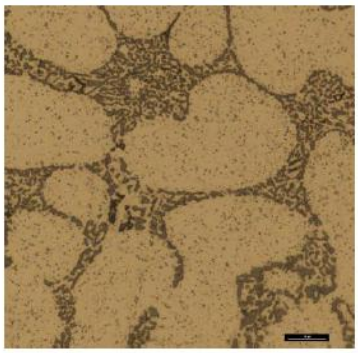
500x

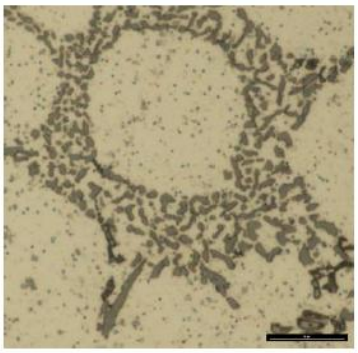


1000x

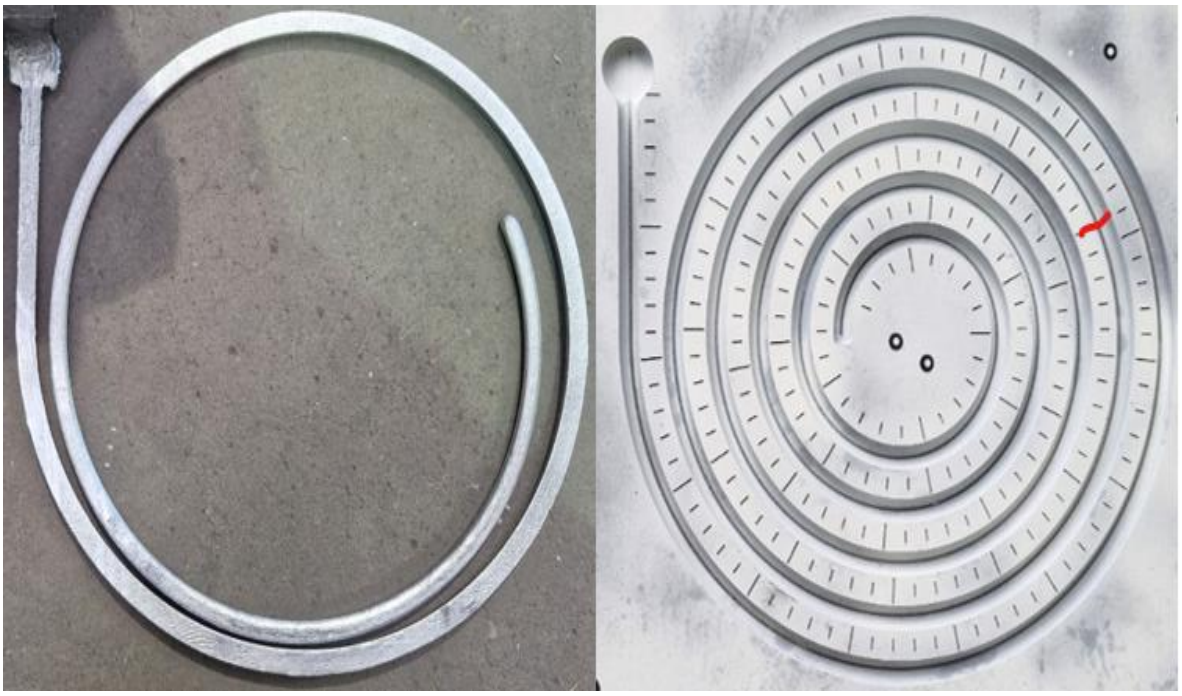


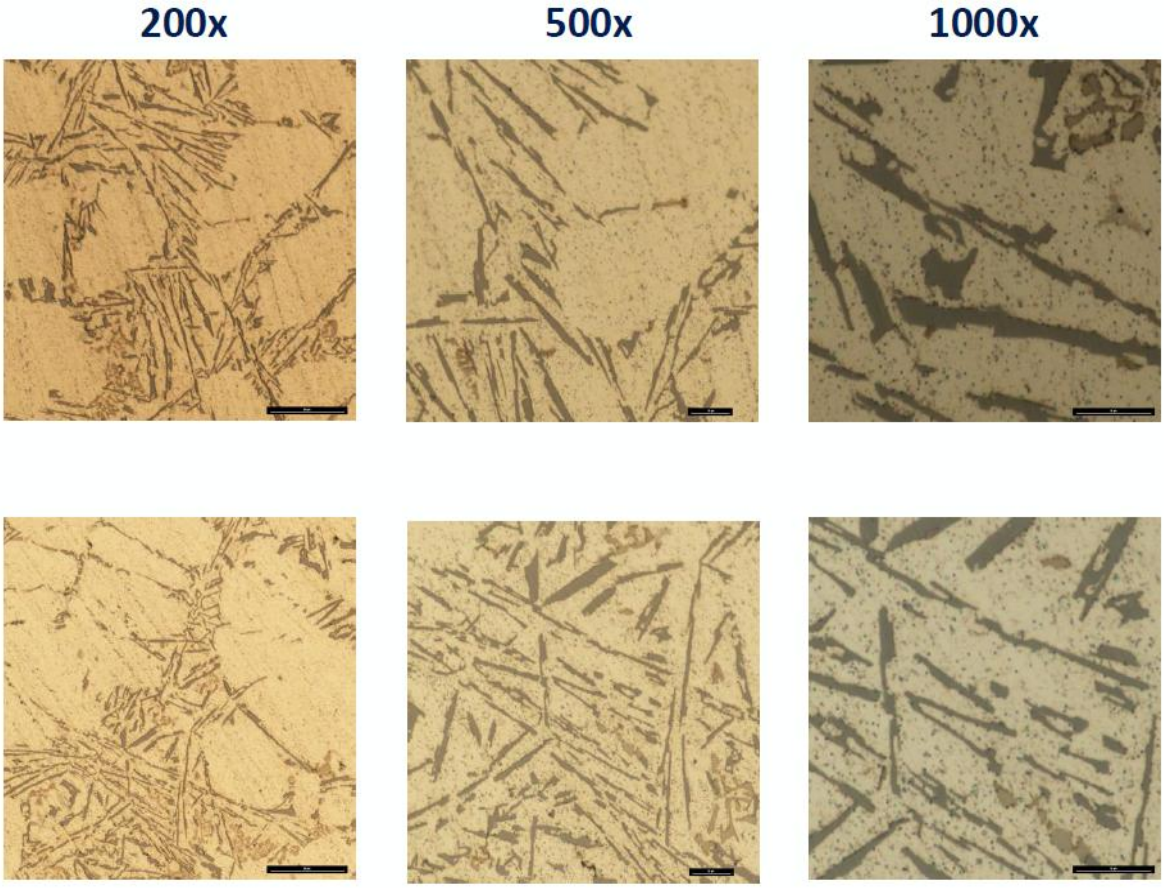






13 (710) 356 SD	115 cm	2	Acicular



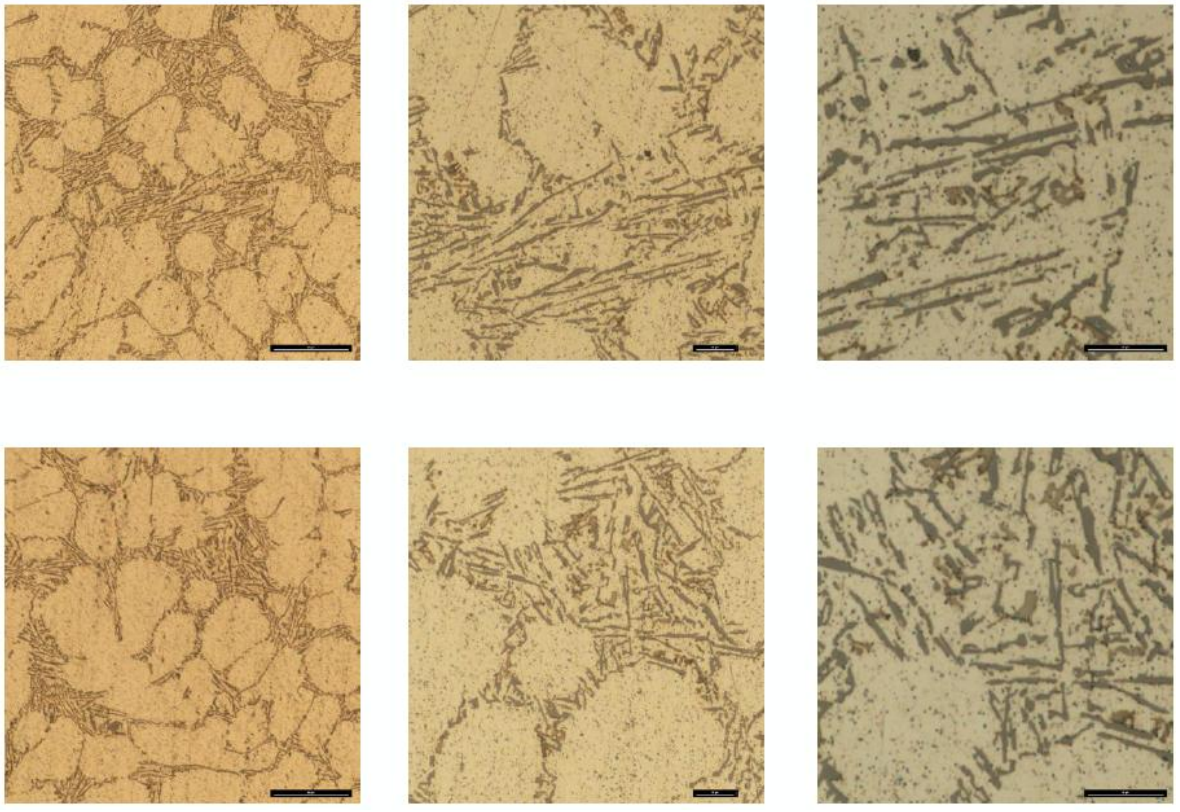


Aleación 356 desgasificado (temperatura 730°C)

2 (+) 356 D	140 cm	2	Acicular



200x 500x 1000x

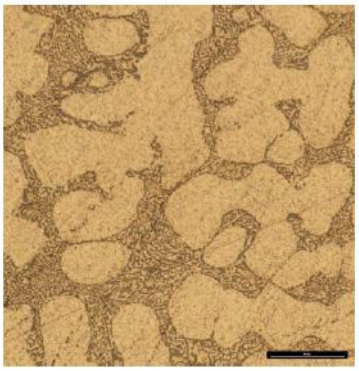


5 (+) 356 D	150 cm	6	Fibrosa

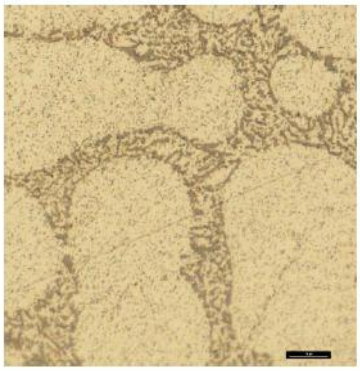




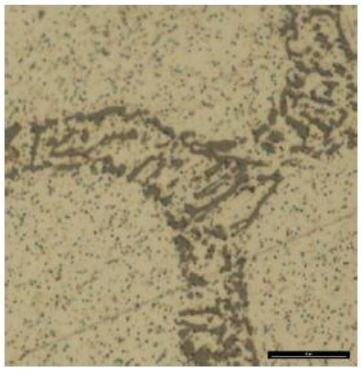
200x

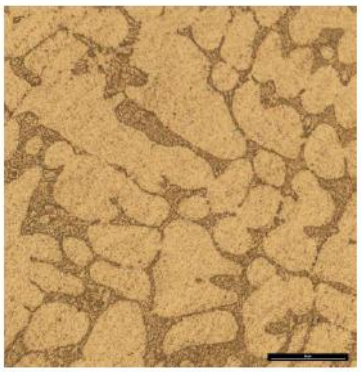


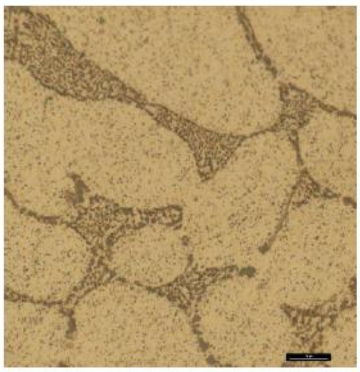
500x

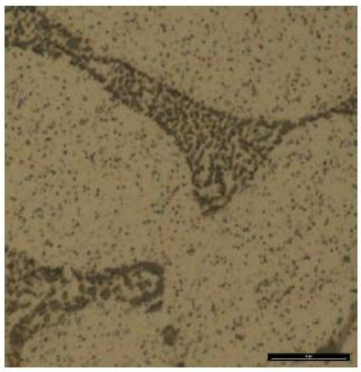


1000x





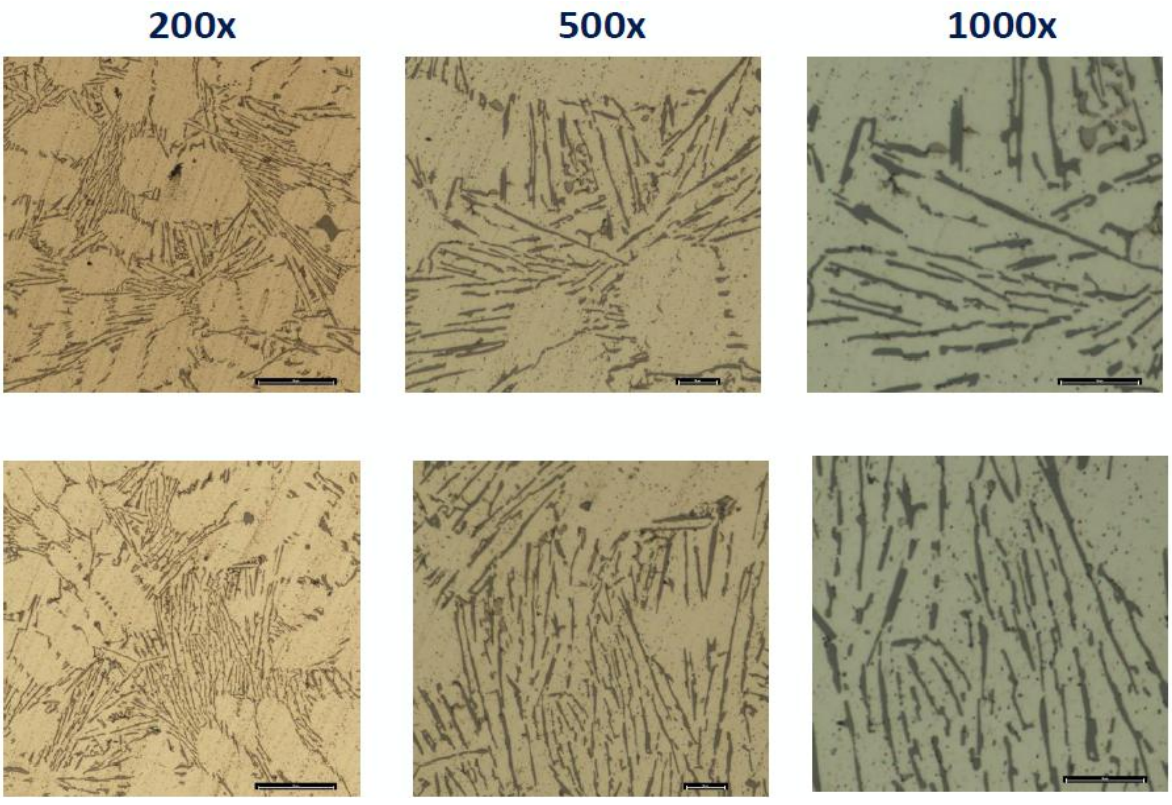




Aleación 356 sin desgasificar (temperatura 730°C)

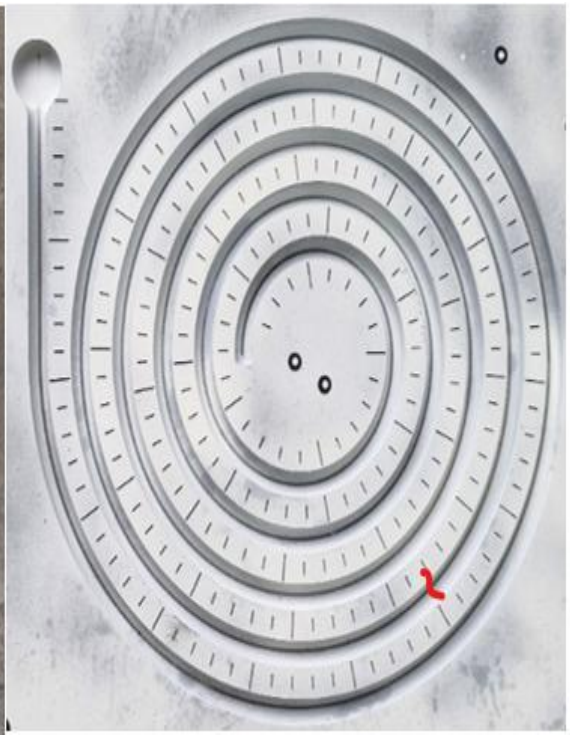
1 (+) 356 SD	165 cm	2	Acicular



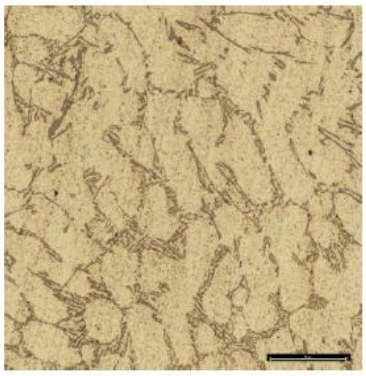


2 (+) 356 SD	102 cm	2	Acicular

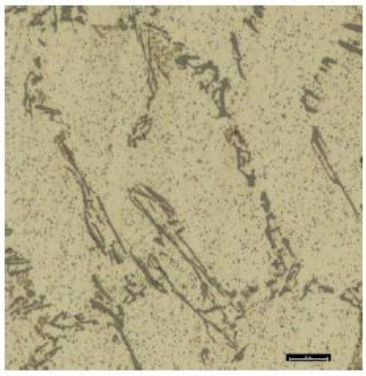




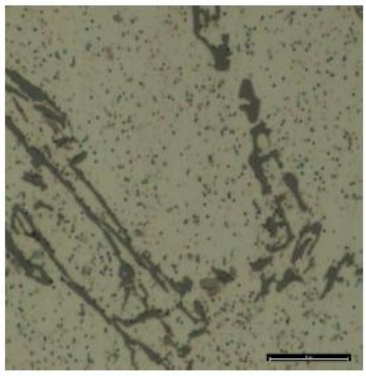
200x

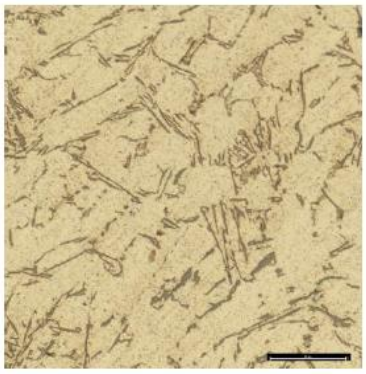


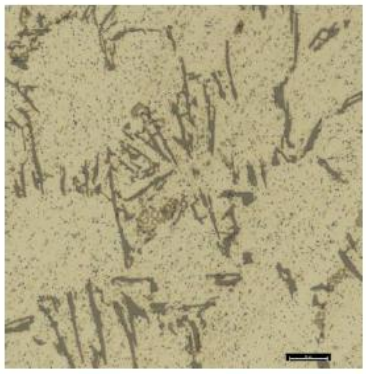
500x

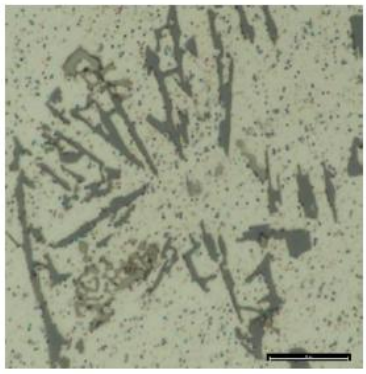


1000x



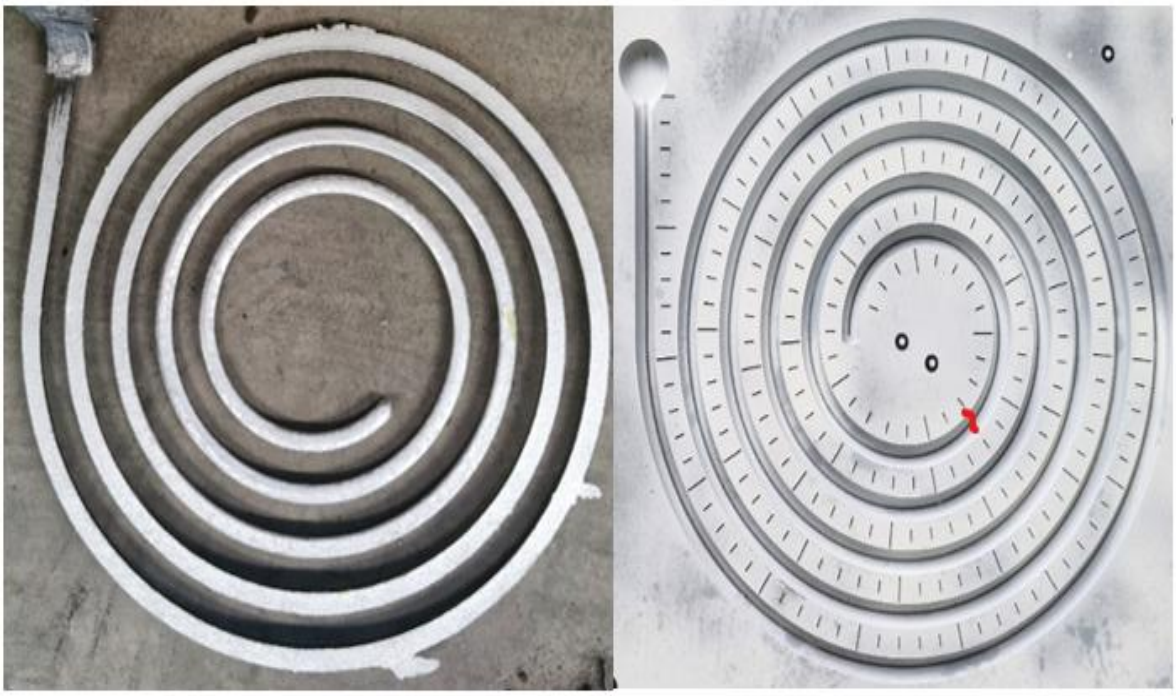




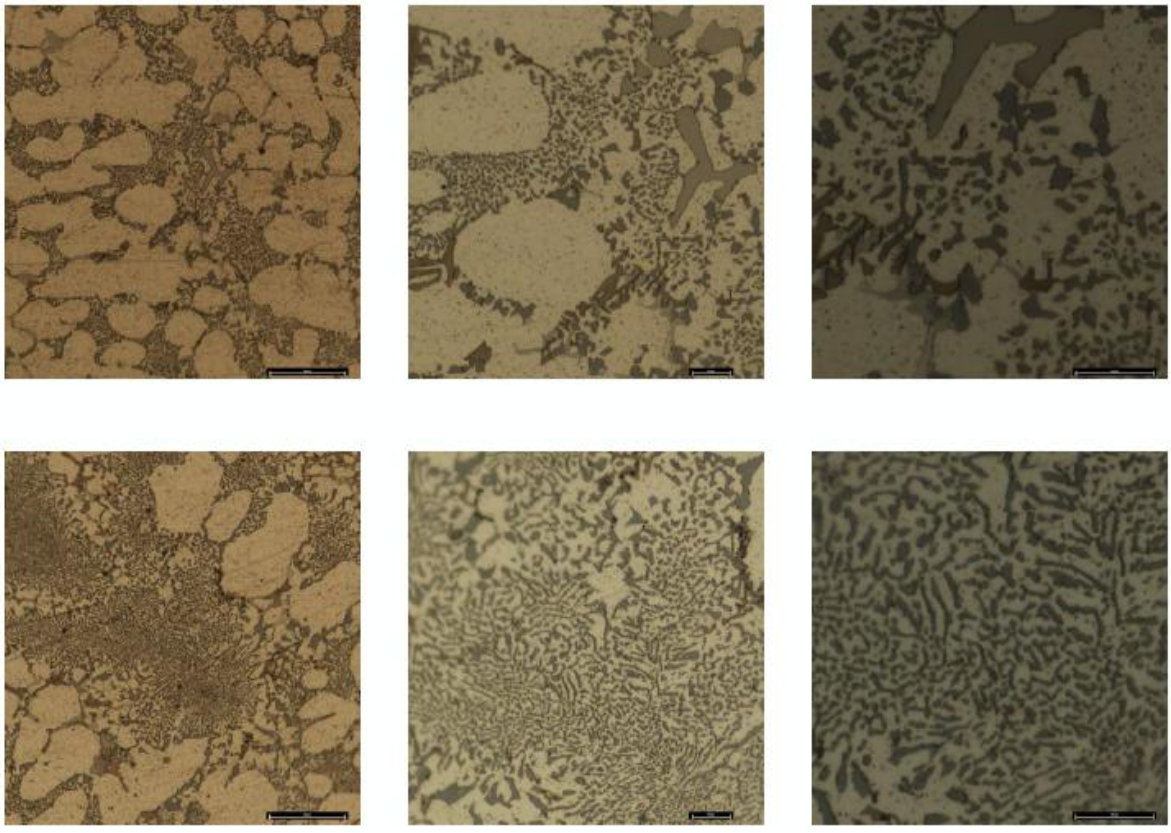


Aleación 332 desgasificado (temperatura 690°C)

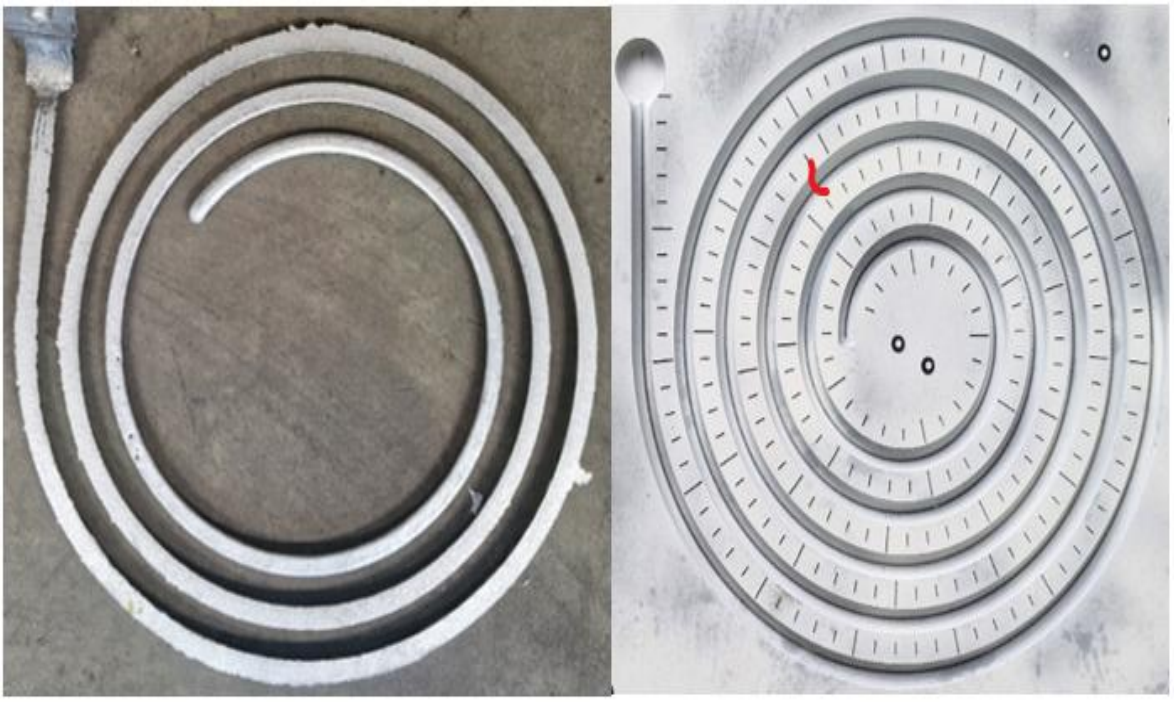
1 (-) 332 D	227 cm	4	Fibrosa

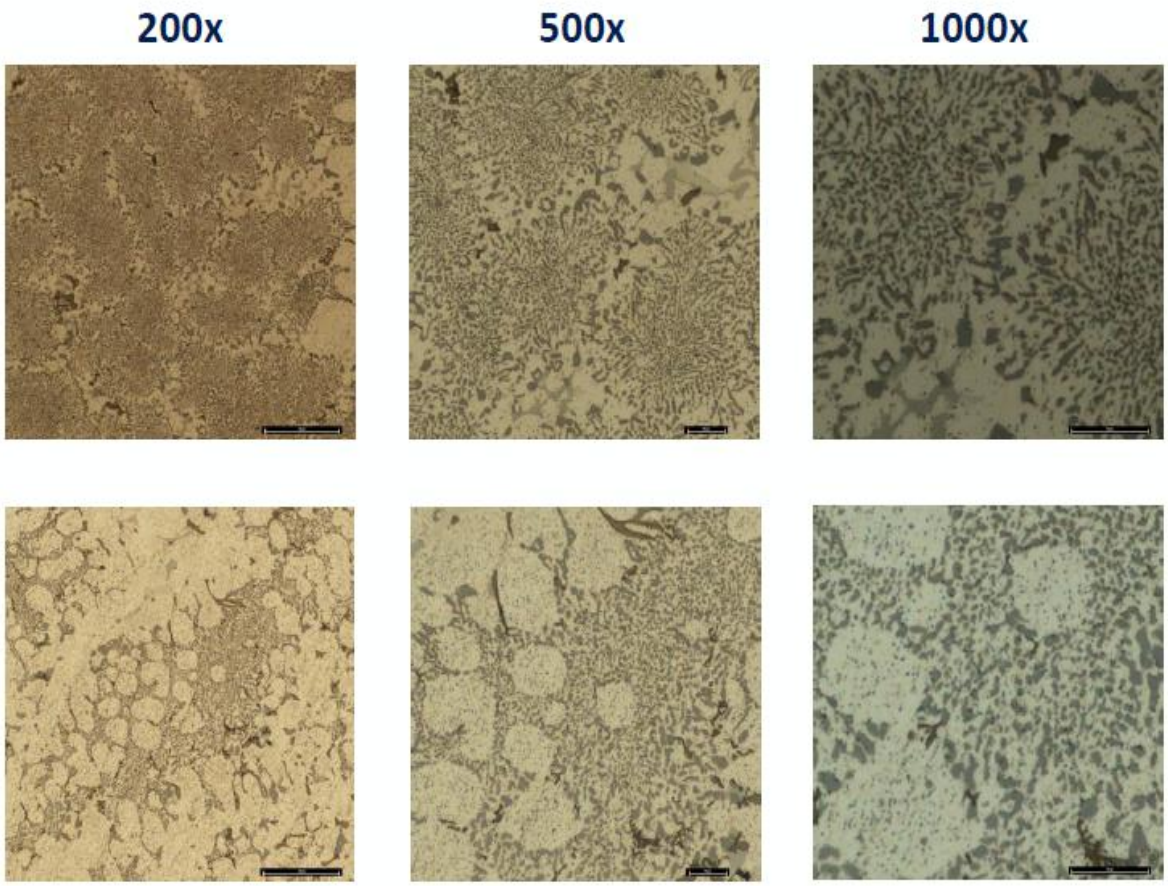


200x 500x 1000x



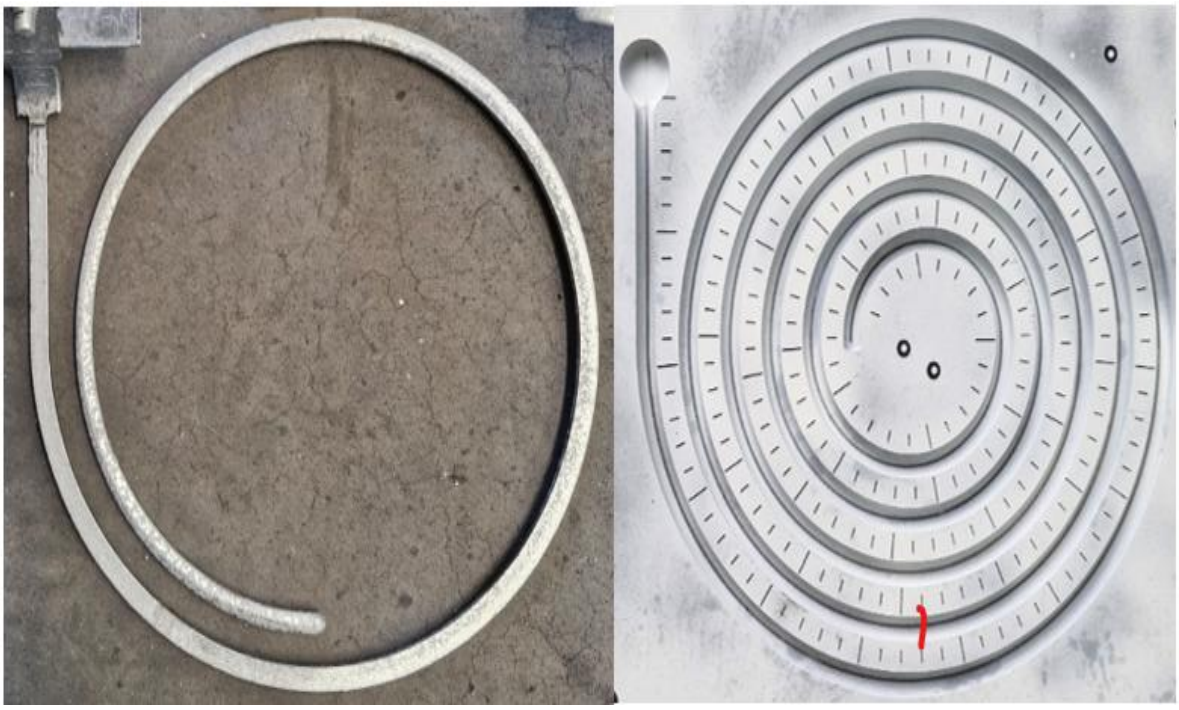
2 (-) 332 D	179 cm	4	Fibrosa



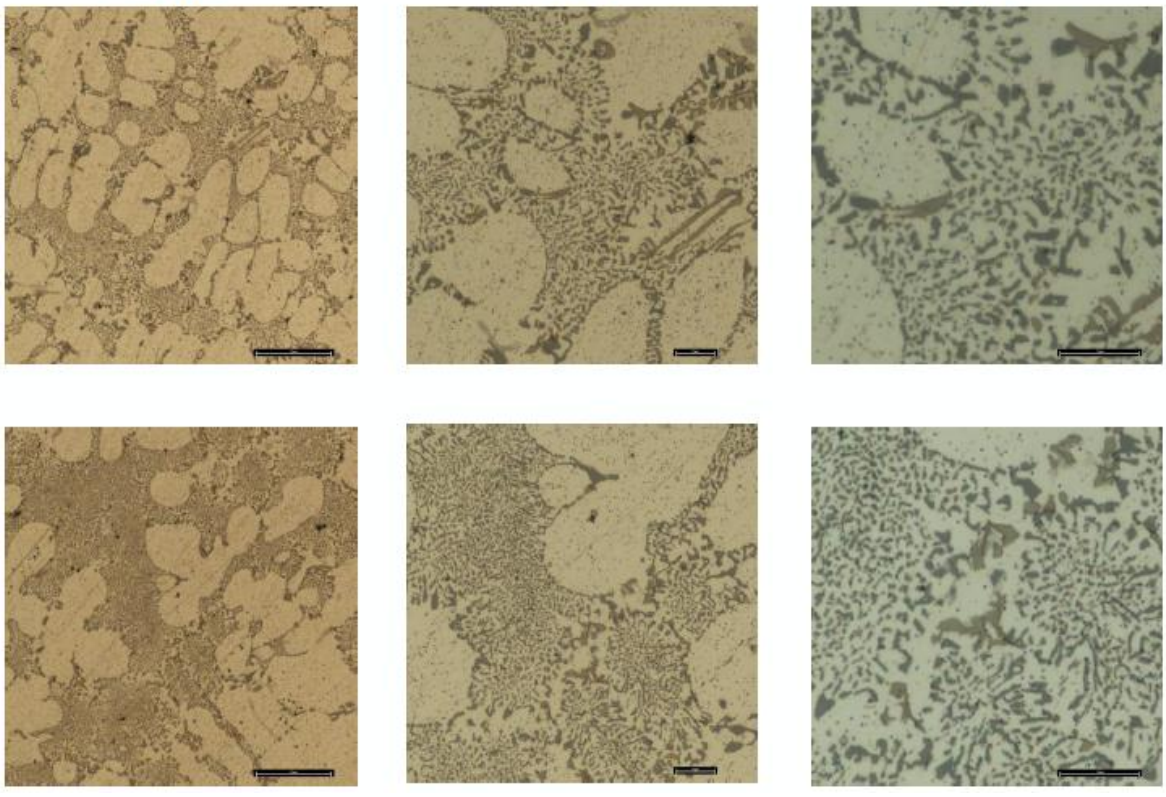


Aleación 332 sin desgasificar (temperatura 690°C)

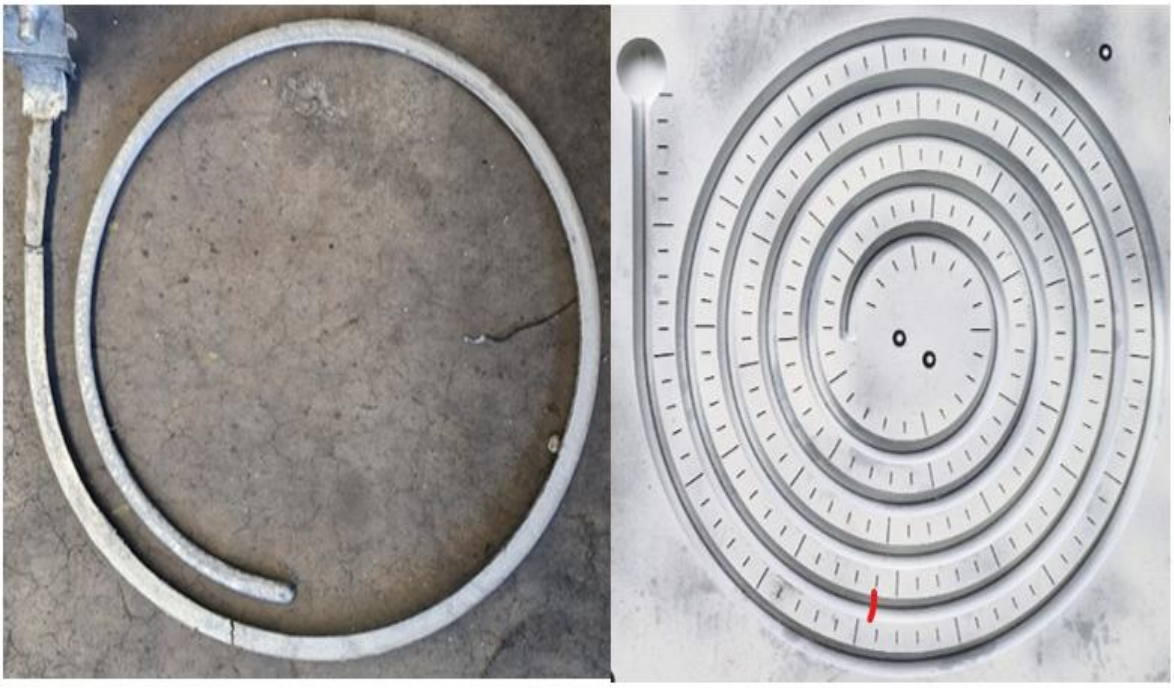
1 (-) 332 SD	96 cm	4	Fibrosa



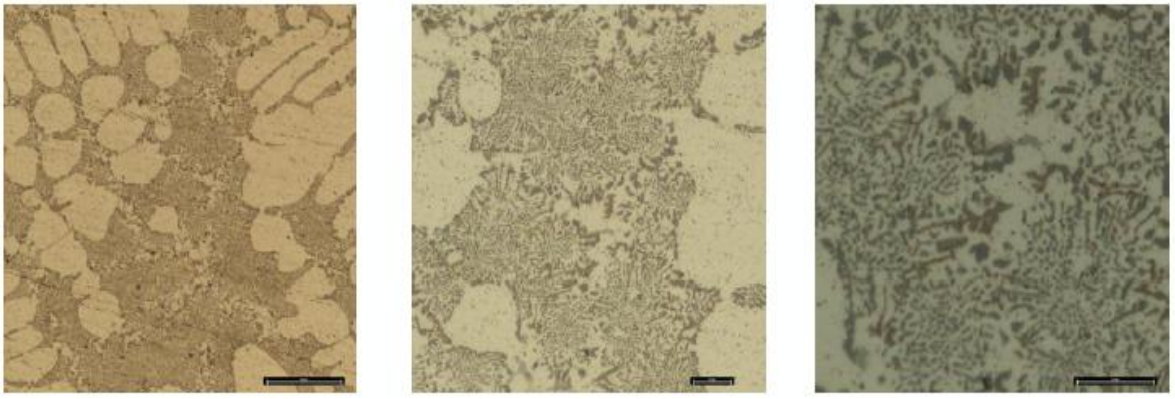
200x 500x 1000x

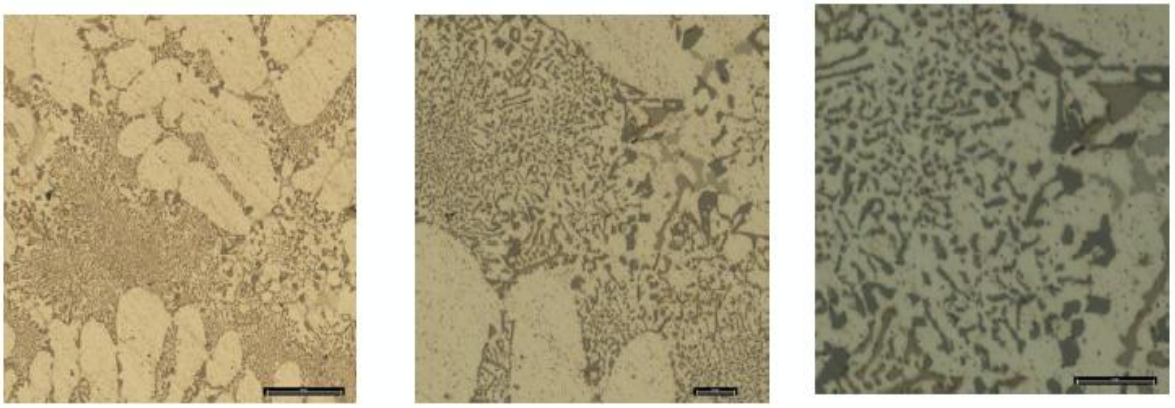


6 (-) 332 SD	94 cm	4	Fibrosa



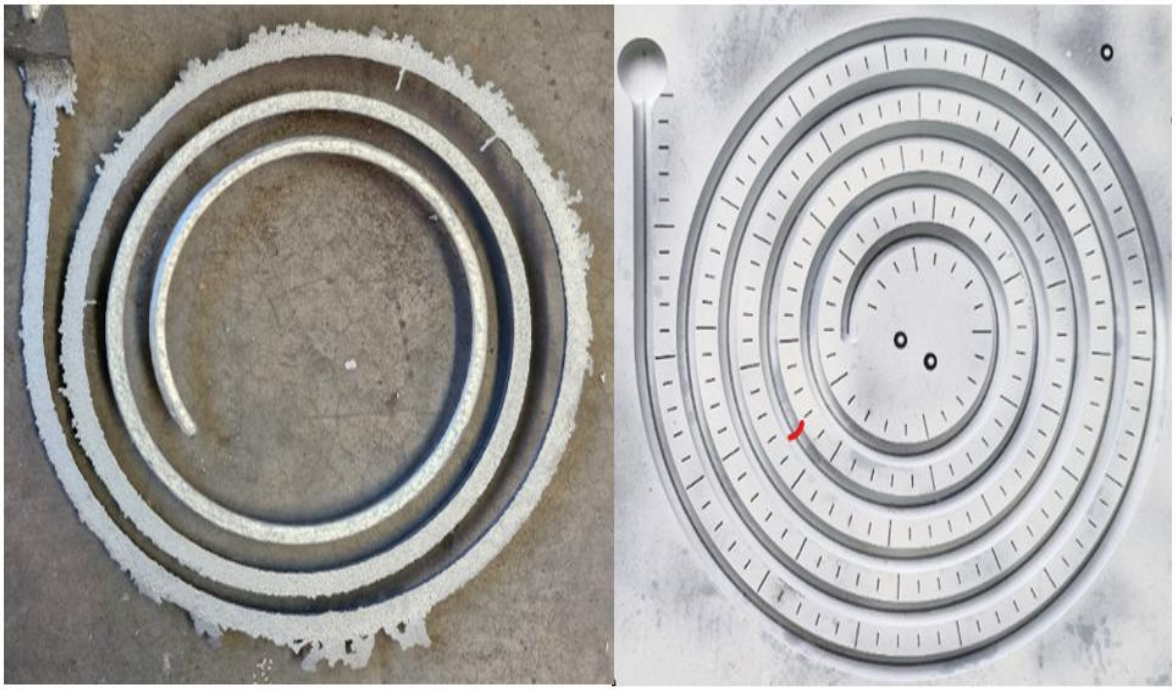
200x 500x 1000x



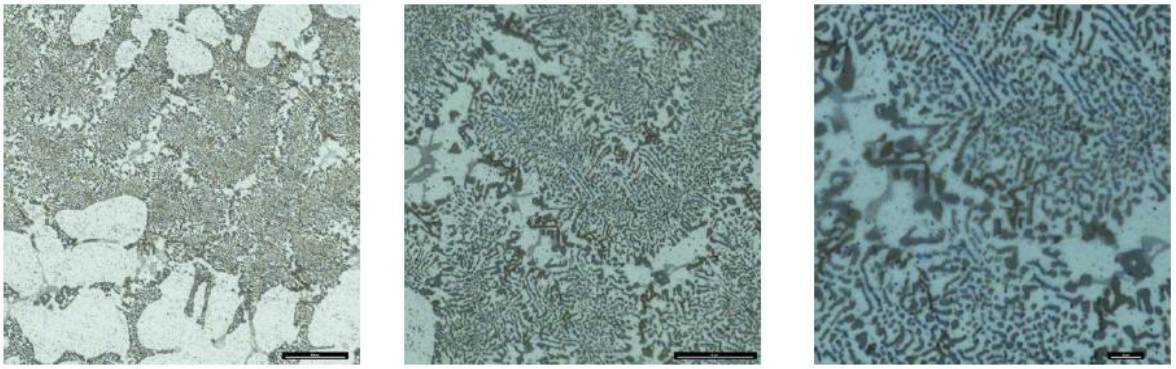


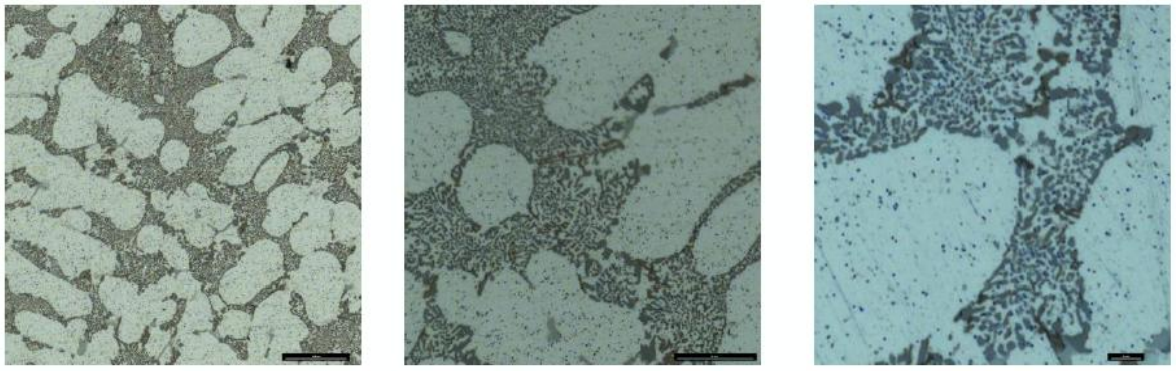
Aleación 332 desgasificado (temperatura 710°C)

1 (710) 332 D	188 cm	6	Fibrosa

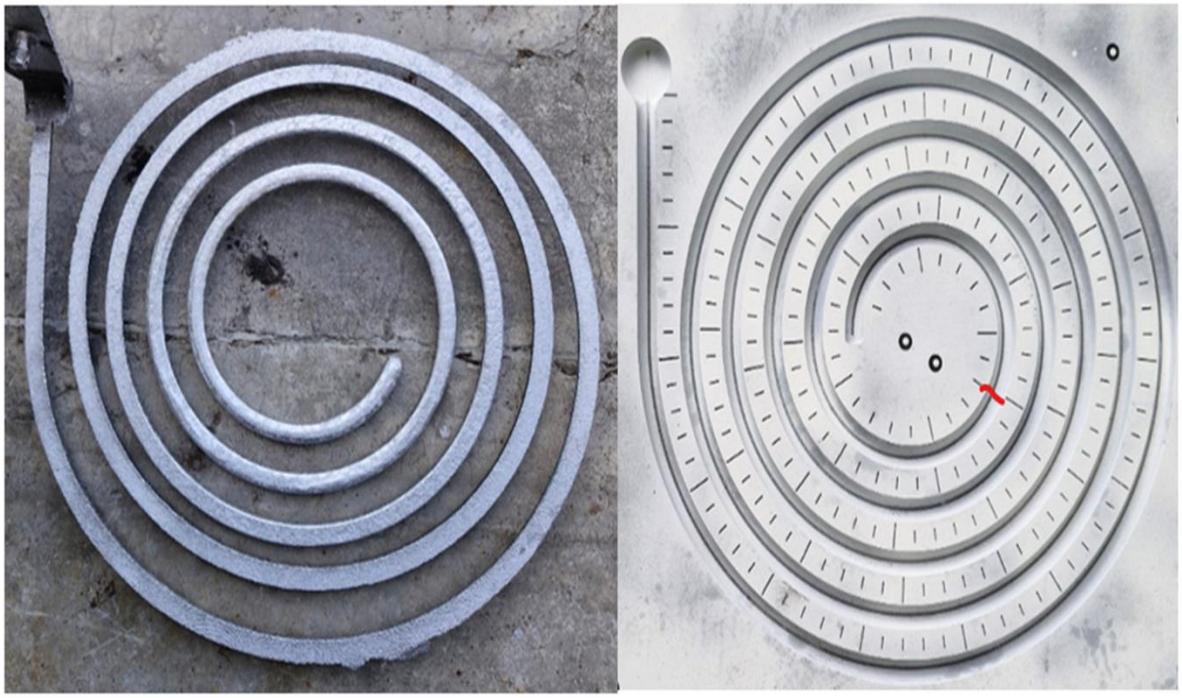


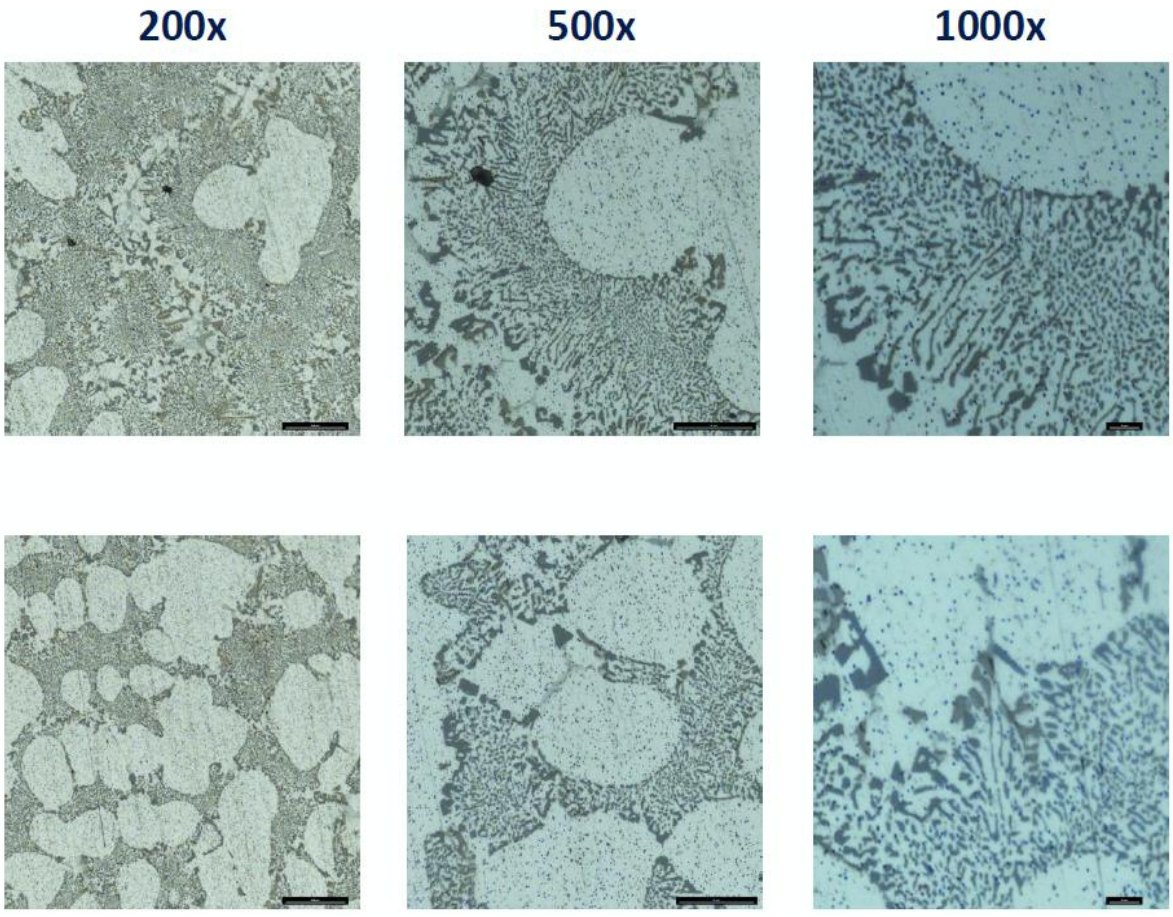
200x 500x 1000x





8 (710) 332 D	228 cm	6	Fibrosa



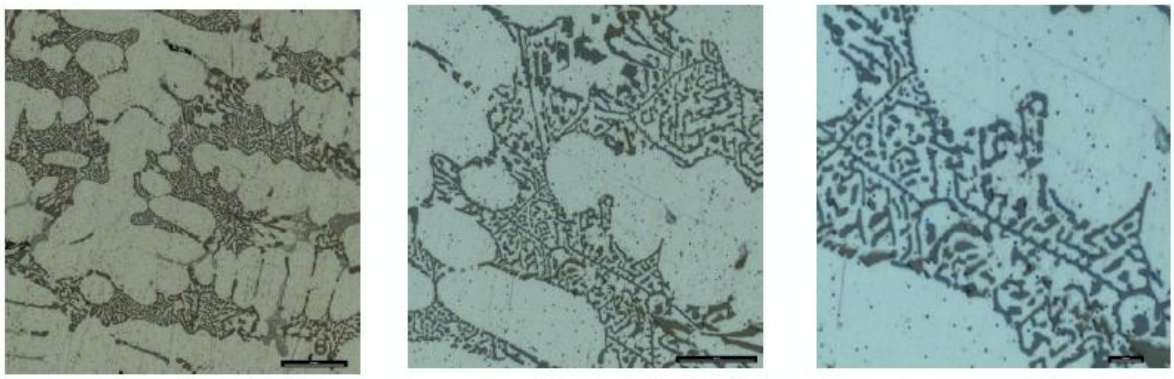


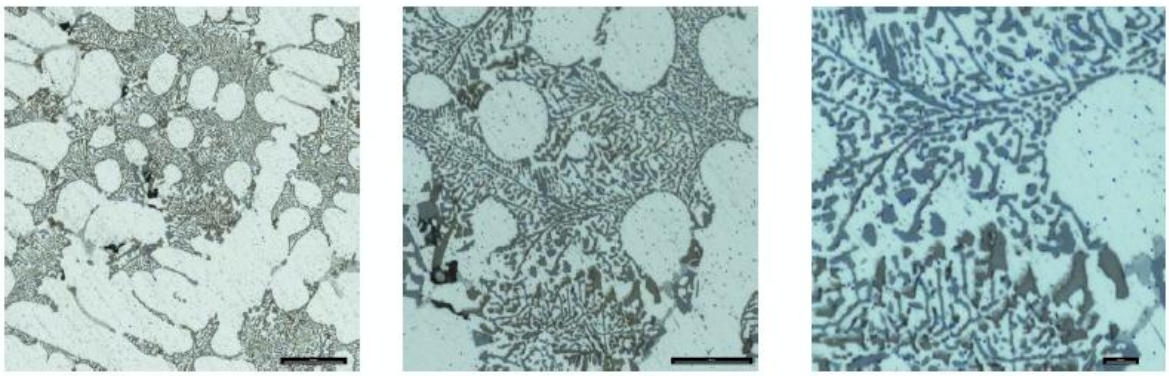
Aleación 332 sin desgasificar (temperatura 710°C)

20 (710) 332 SD	153 cm	6	Fibrosa



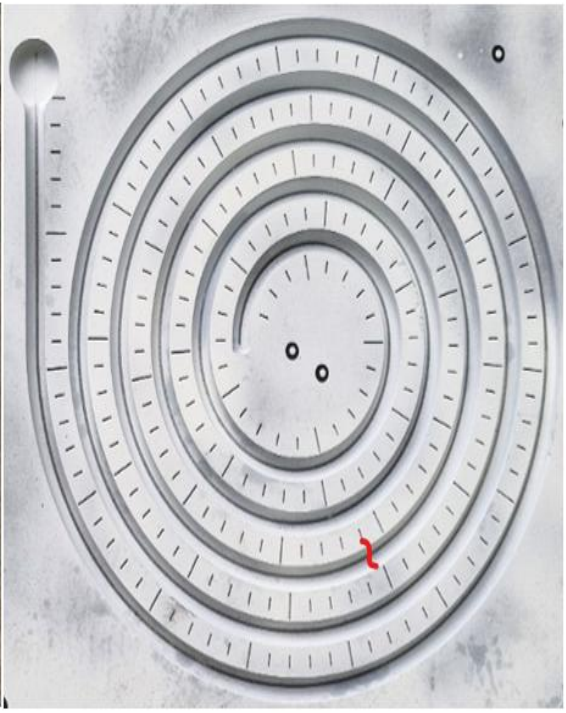
200x 500x 1000x



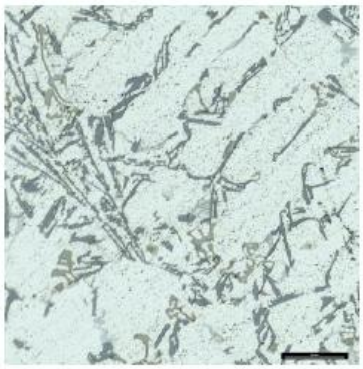


25 (710) 332 SD	154 cm	6	Fibrosa

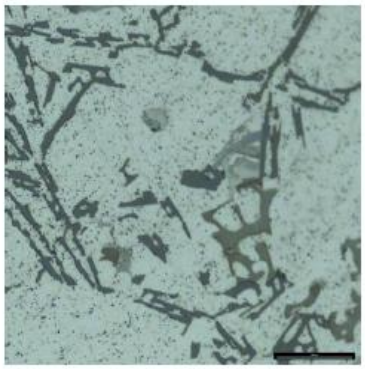




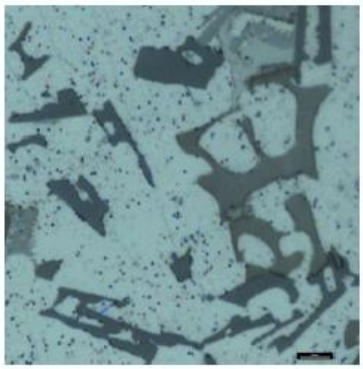
200x

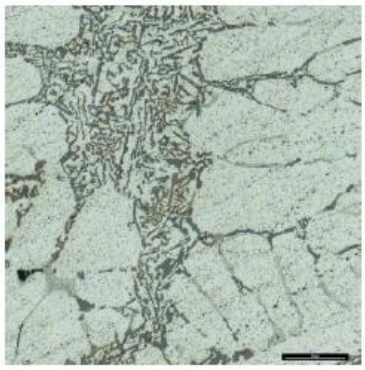


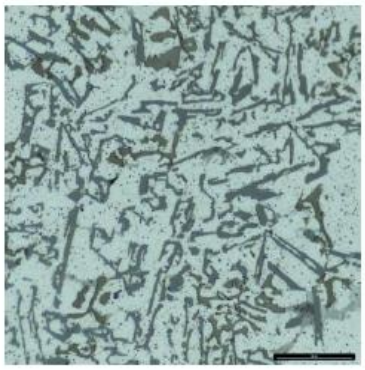
500x

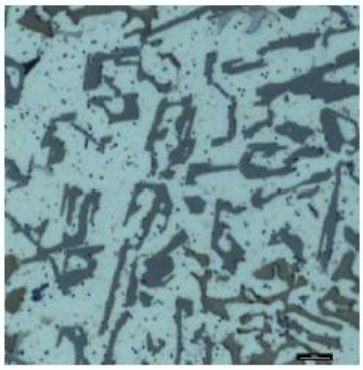


1000x



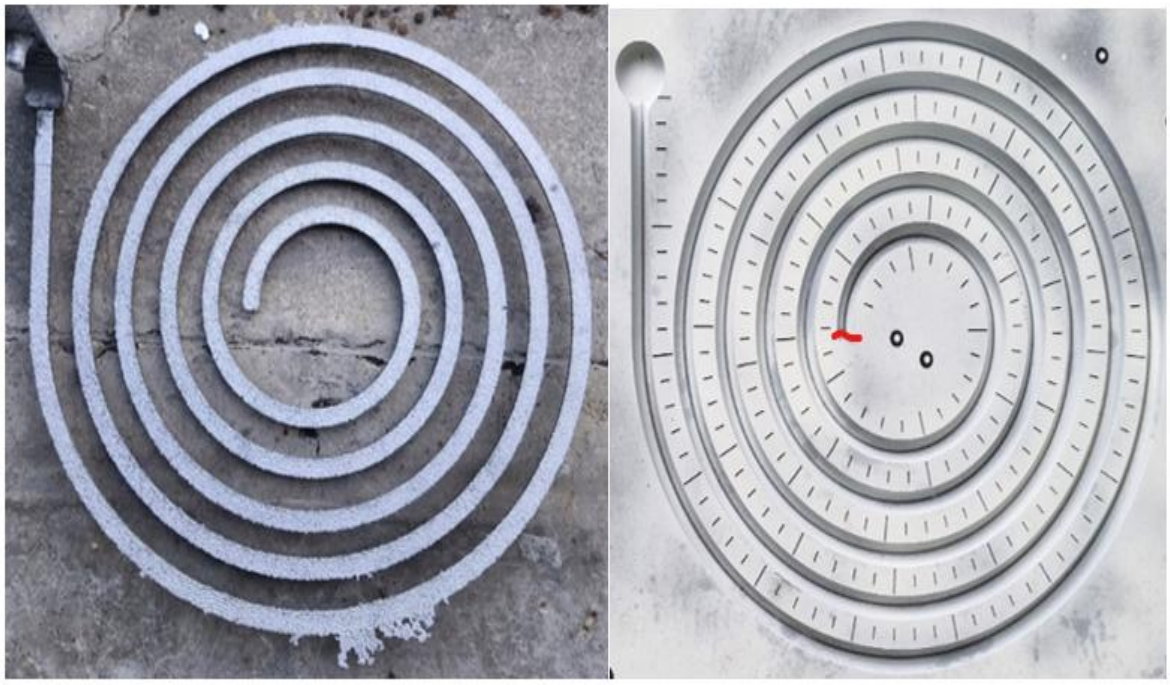




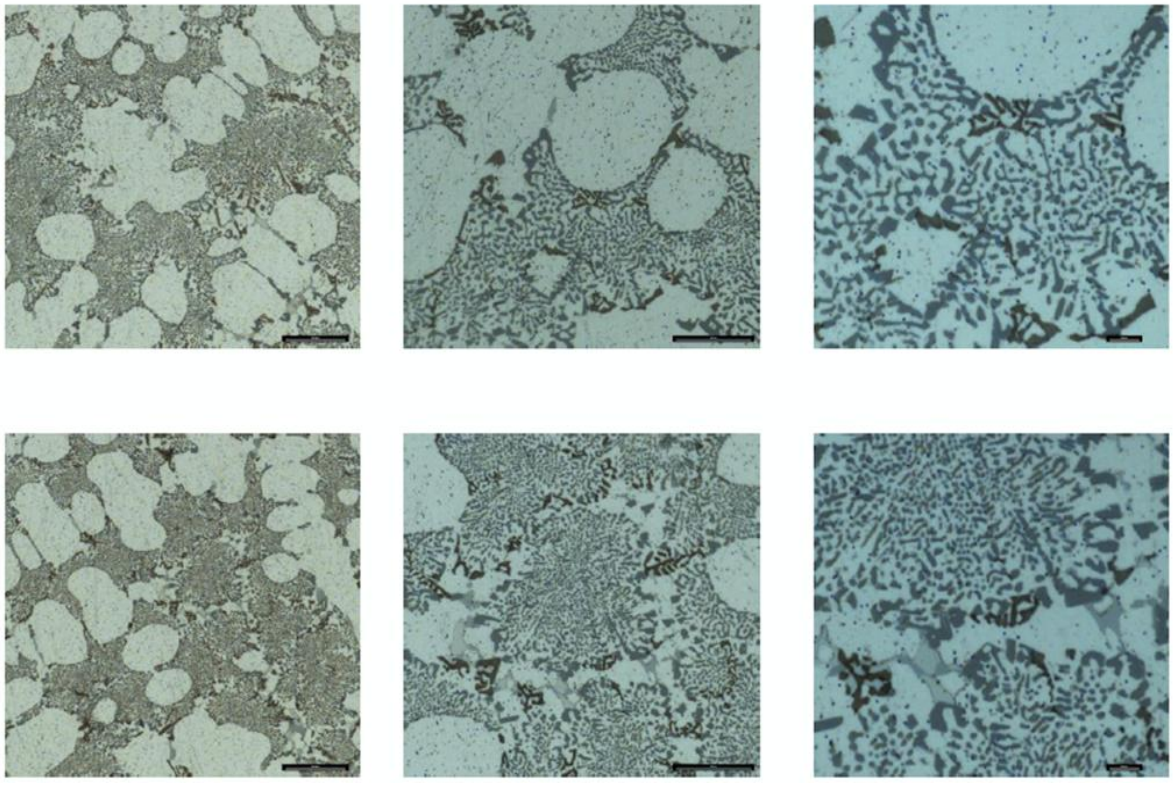


Aleación 332 desgasificado (temperatura 730°C)

1 (+) 332 D	238 cm	6	Fibrosa



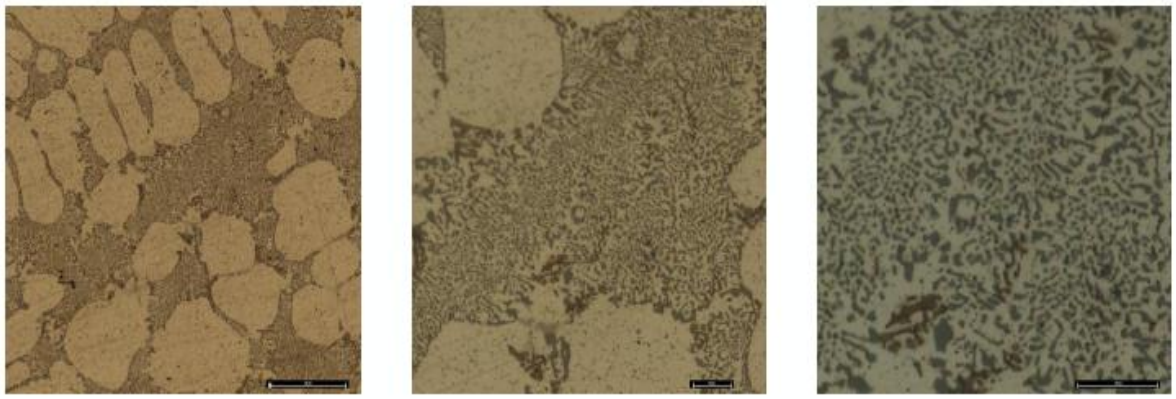
200x 500x 1000x

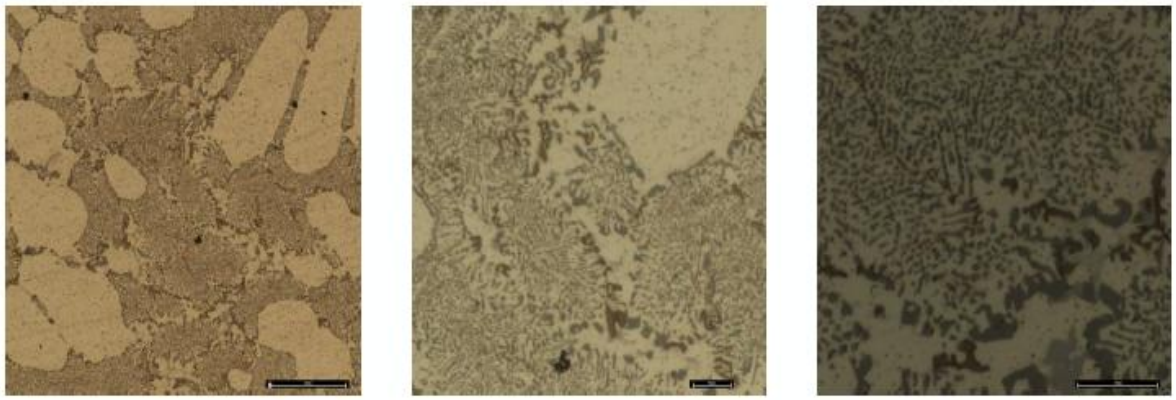


2 (+) 332 D	211 cm	4	Fibrosa



200x 500x 1000x

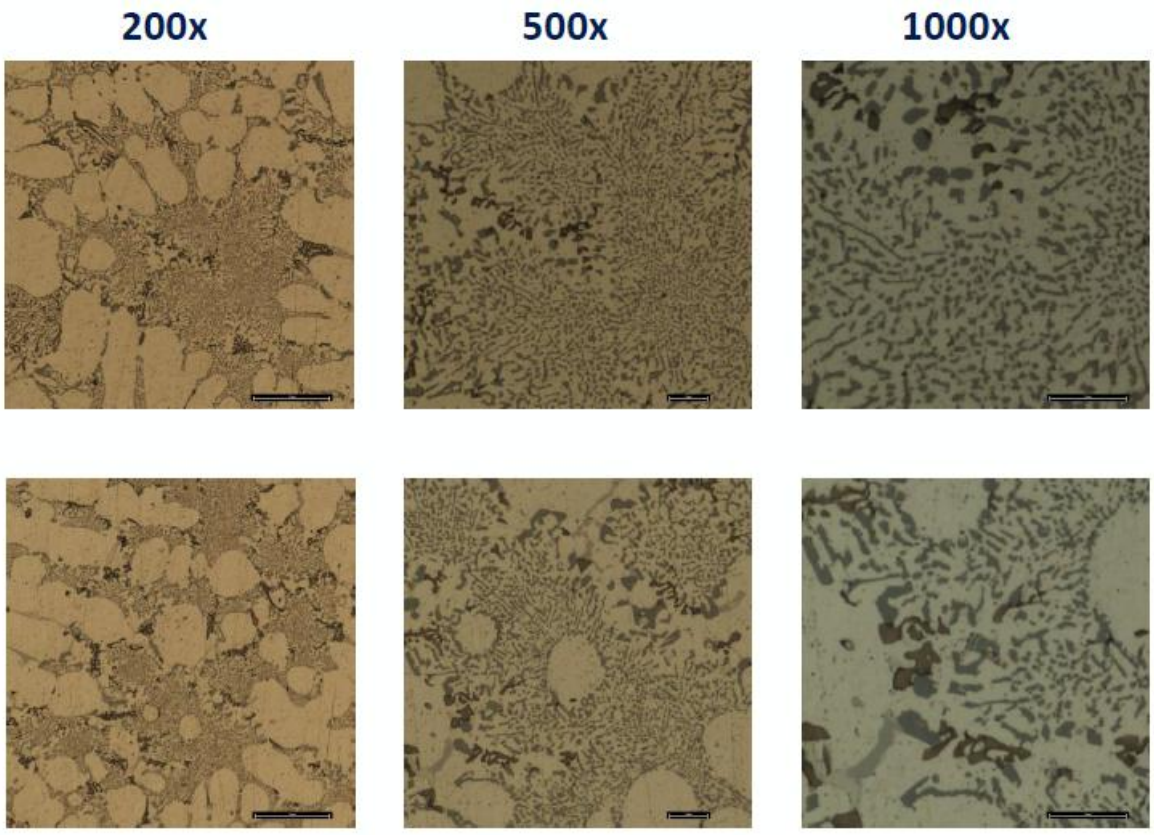




Aleación 332 sin desgasificar (temperatura 730°C)

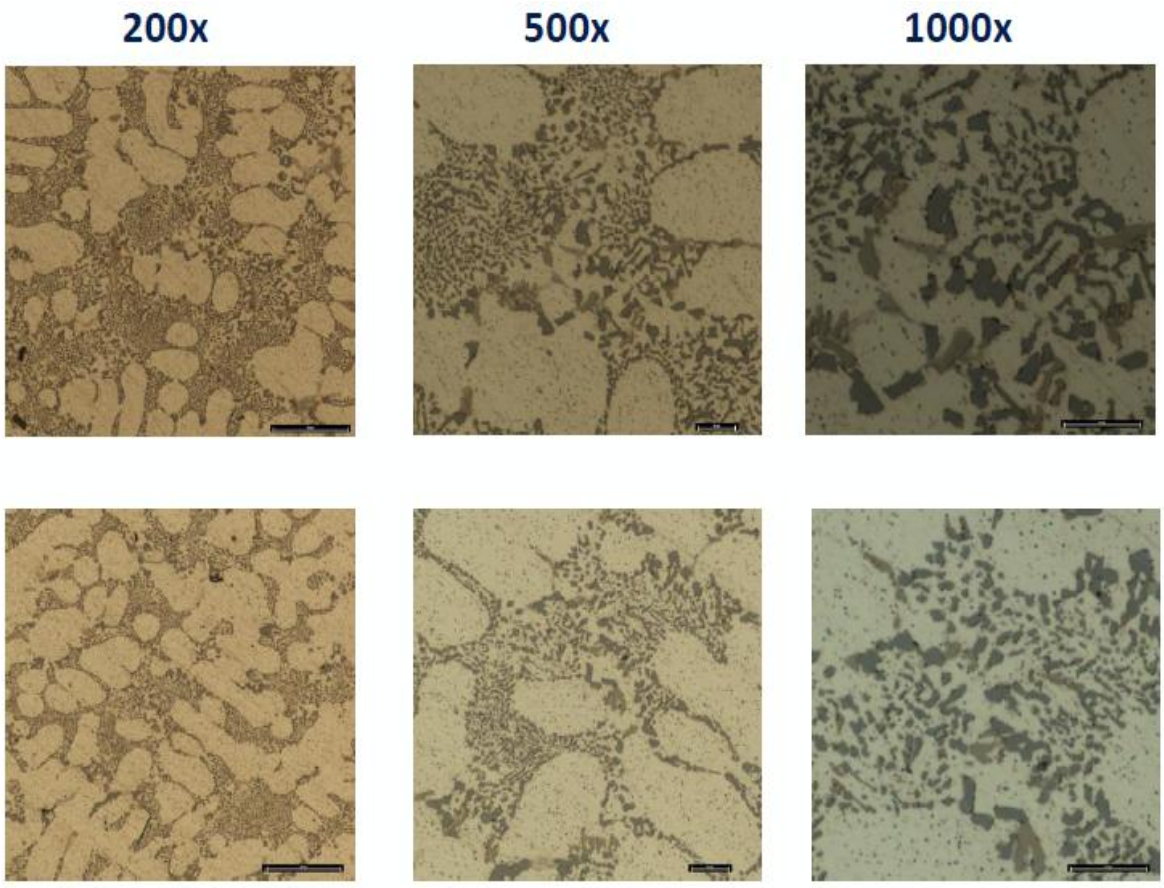
1 (+) 332 DS	142 cm	4	Fibrosa





2 (+) 332 DS	121 cm	4	Fibrosa

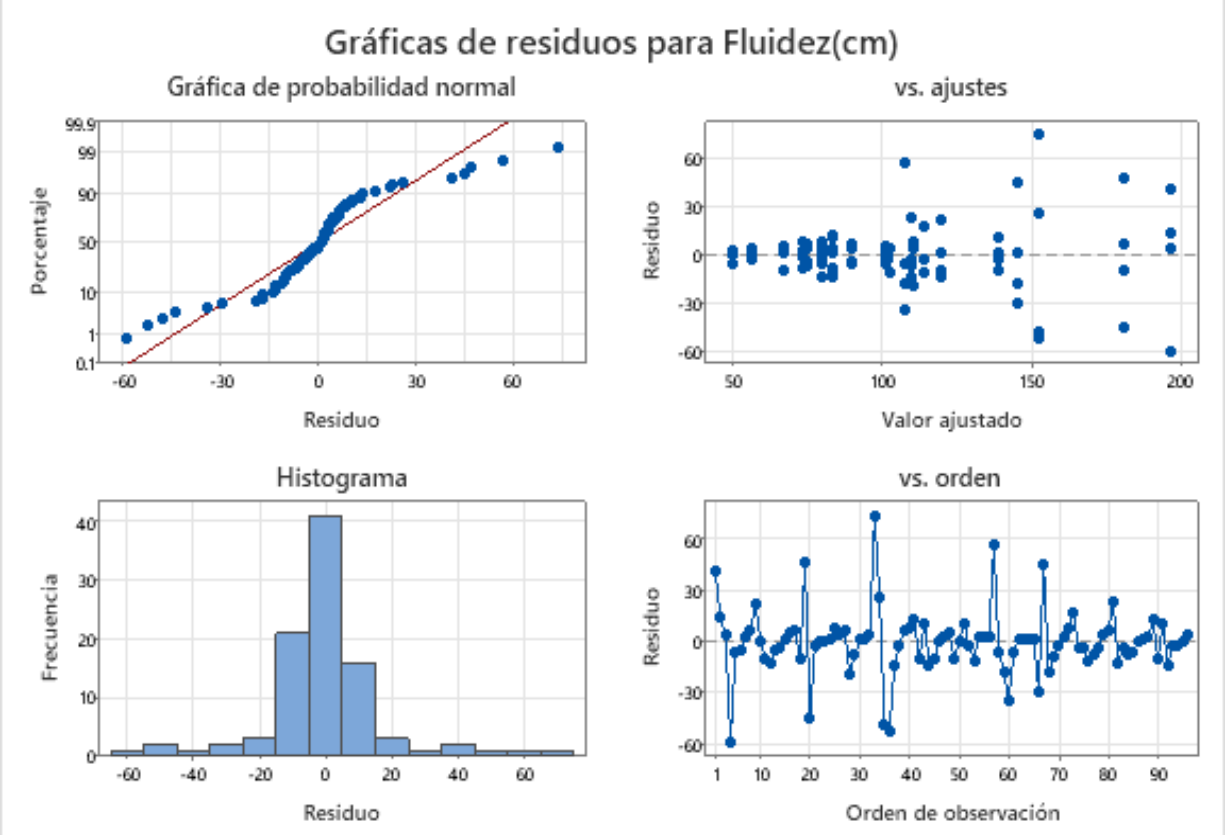




Anexo B

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	23	125767	5468.1	11.67	0.000
Lineal	5	103561	20712.1	44.22	0.000
Aleación	1	8913	8912.8	19.03	0.000
A.P.	1	57184	57183.8	122.08	0.000
T. M. (°C)	2	18169	9084.5	19.39	0.000
D/SD	1	19295	19295.0	41.19	0.000
Interacciones de 2 términos	9	16352	1816.8	3.88	0.000
Aleación*A.P.	1	575	575.3	1.23	0.271
Aleación*T. M. (°C)	2	48	23.9	0.05	0.950
Aleación*D/SD	1	2915	2915.0	6.22	0.015
A.P.*T. M. (°C)	2	416	207.8	0.44	0.643
A.P.*D/SD	1	12308	12308.0	26.28	0.000
T. M. (°C)*D/SD	2	90	44.9	0.10	0.909
Interacciones de 3 términos	7	4725	675.0	1.44	0.203
Aleación*A.P.*T. M. (°C)	2	1333	666.4	1.42	0.248
Aleación*A.P.*D/SD	1	2552	2552.3	5.45	0.022
Aleación*T. M. (°C)*D/SD	2	799	399.4	0.85	0.430
A.P.*T. M. (°C)*D/SD	2	41	20.3	0.04	0.958
Interacciones de 4 términos	2	1131	565.3	1.21	0.305
Aleación*A.P.*T. M. (°C)*D/SD	2	1131	565.3	1.21	0.305
Error	72	33726	468.4		
Total	95	159494			



Anexo C

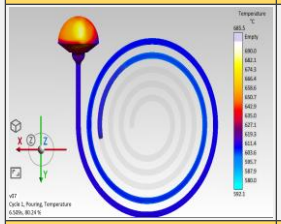
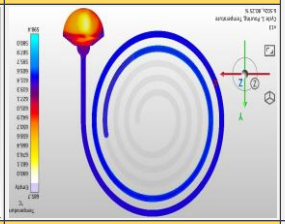
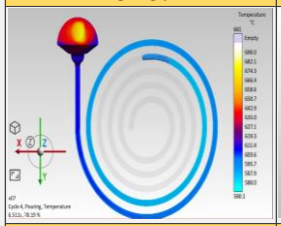
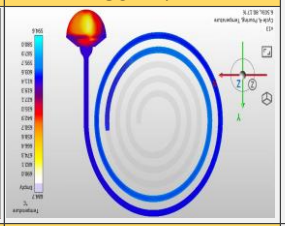
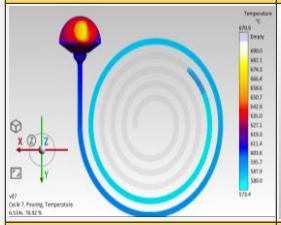
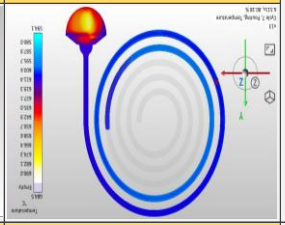
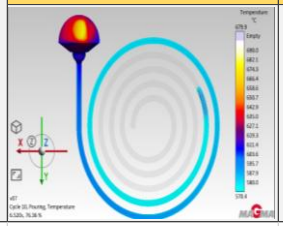
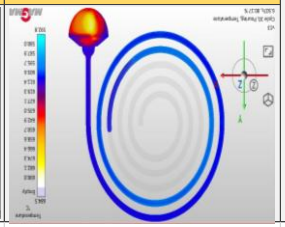
Simulaciones de vaciado aleación 332

Aleación desgasificada (690°C)	Porcentaje de llenado total del recorrido con la copa		Numeración del ciclo de vaciado	Fluidez de simulación (cm)		Pruebas Reales
	Sin quemador	Con Quemador		Sin quemador	Con quemador	
332	80.21%	80.21%	1	140 cm		
	80.22%	80.21%	4	140.01 cm	140 cm	
	80.08%	80.20%	7	138.77 cm	139.98 cm	
	79.93%	80.21%	10	137 cm	140 cm	

Aleación desgasificada (710°C)	Porcentaje de llenado total del recorrido con la copa		Numeración del ciclo de vaciado	Fluidez de simulación (cm)		Pruebas Reales
	Sin quemador	Con Quemador		Sin quemador	Con quemador	
332	80.23%	80.24%	1	140.03 cm	140.05 cm	
	80.25%	80.25%	4	140.06 cm	140.06 cm	
	80.21%	80.25%	7	140 cm	140.06 cm	
	80.14%	80.25%	10	139 cm	140.06 cm	

Aleación desgasificada (730°C)	Porcentaje de llenado total del recorrido con la copa		Numeración del ciclo de vaciado	Fluidez de simulación (cm)		Pruebas Reales
	Sin quemador	Con Quemador		Sin quemador	Con quemador	
332	80.26%	80.26%	1	140.08 cm		
	80.27%	80.29%	4	140.1 cm	140.13 cm	
	80.27%	80.28%	7	140.1 cm	140.12 cm	
	80.25%	80.29%	10	139.98 cm	140.13 cm	

Simulaciones de vaciado aleación 356

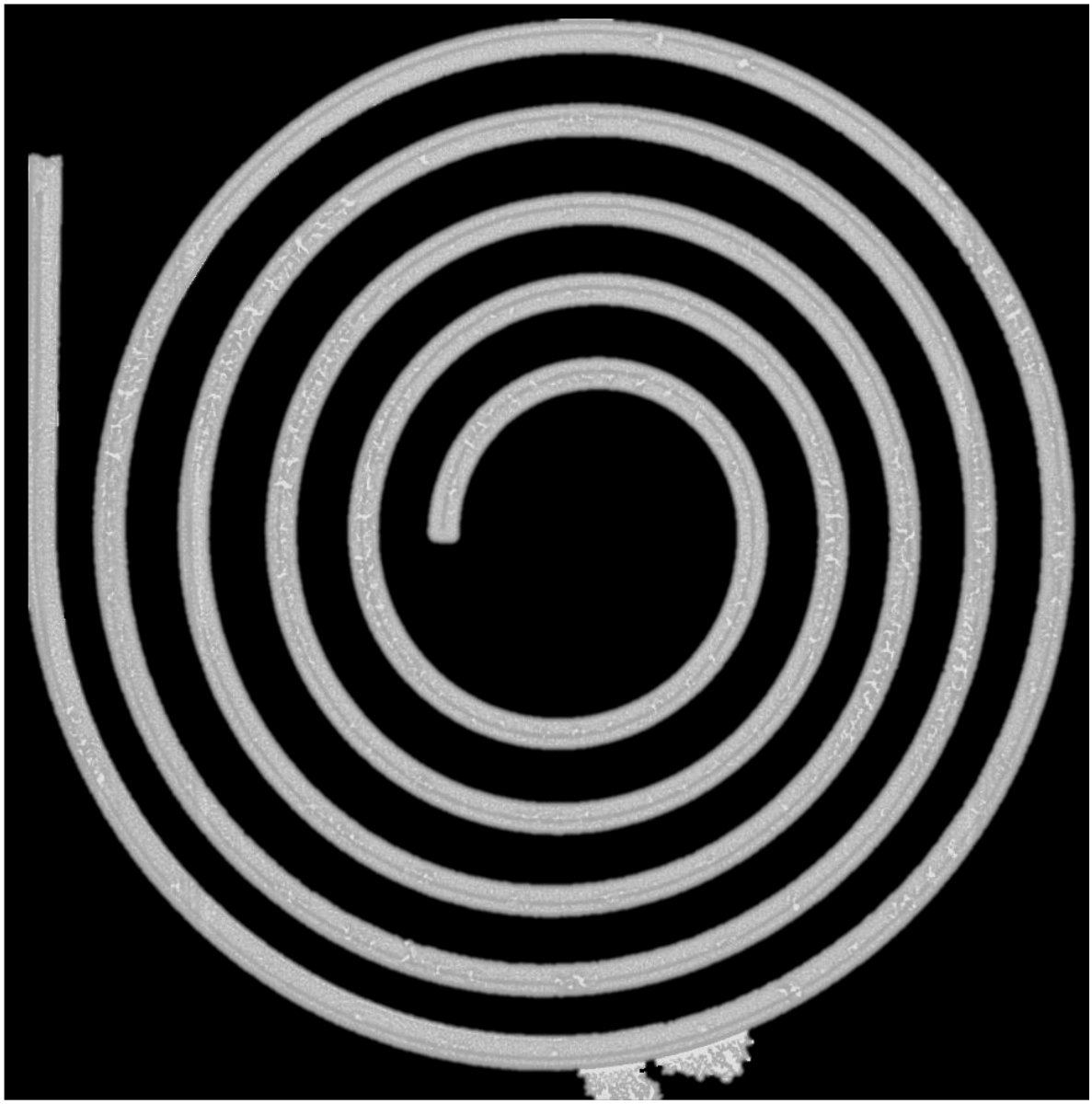
Aleación desgasificada (690°C)	Porcentaje de llenado total del recorrido con la copa		Numeración del ciclo de vaciado	Fluidez de simulación (cm)		Pruebas Reales
	Sin quemador	Con Quemador		Sin quemador	Con quemador	
356	80.24%	80.25%	1	140.05 cm	140.06 cm	
						
	78.19%	80.17%	4	126 cm	139.93 cm	
						
	76.92%	80.18%	7	117 cm	139.94 cm	
						
	76.36%	80.17%	10	116 cm	139.93 cm	
						

Aleación desgasificada (710°C)	Porcentaje de llenado total del recorrido con la copa		Numeración del ciclo de vaciado	Fluidez de simulación (cm)		Pruebas Reales
	Sin quemador	Con Quemador		Sin quemador	Con quemador	
356	80.28%	80.28%	1	140.12 cm		
	79.13%	80.28%	4	133 cm	140.12 cm	
	77.97%	80.27%	7	125 cm	140.1 cm	
	77.44%	80.26%	10	122 cm	140.08 cm	

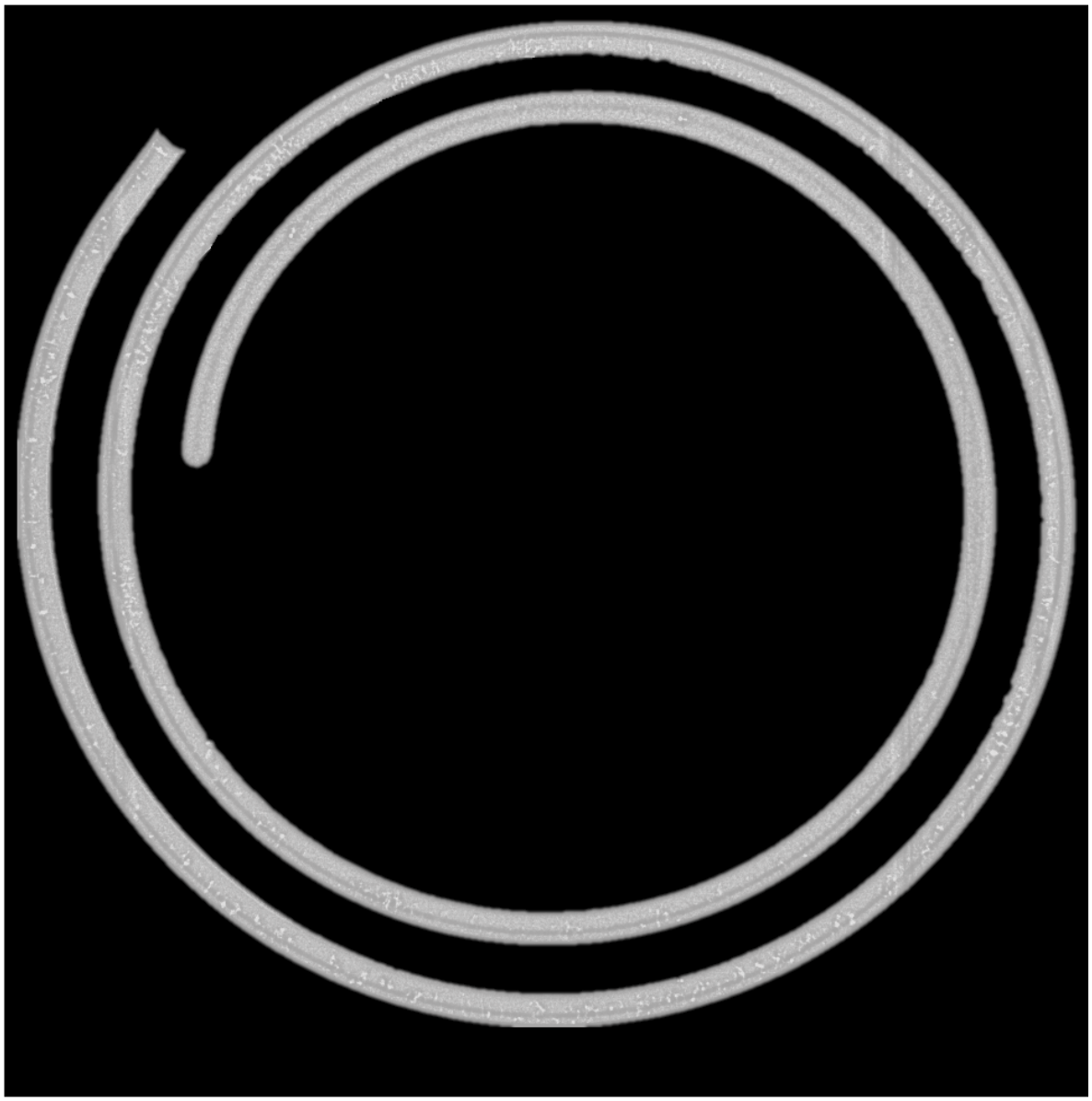
Aleación desgasificada (730°C)	Porcentaje de llenado total del recorrido con la copa		Numeración del ciclo de vaciado	Fluidez de simulación (cm)		Pruebas Reales
	Sin quemador	Con Quemador		Sin quemador	Con quemador	
356	80.33%	80.30%	1	140.2 cm	140.15 cm	
	79.76%	80.32%	4	135 cm	140.19 cm	
	78.83%	80.32%	7	131 cm	140.19 cm	
	78.42%	80.31%	10	128 cm	140.17 cm	

Anexo D

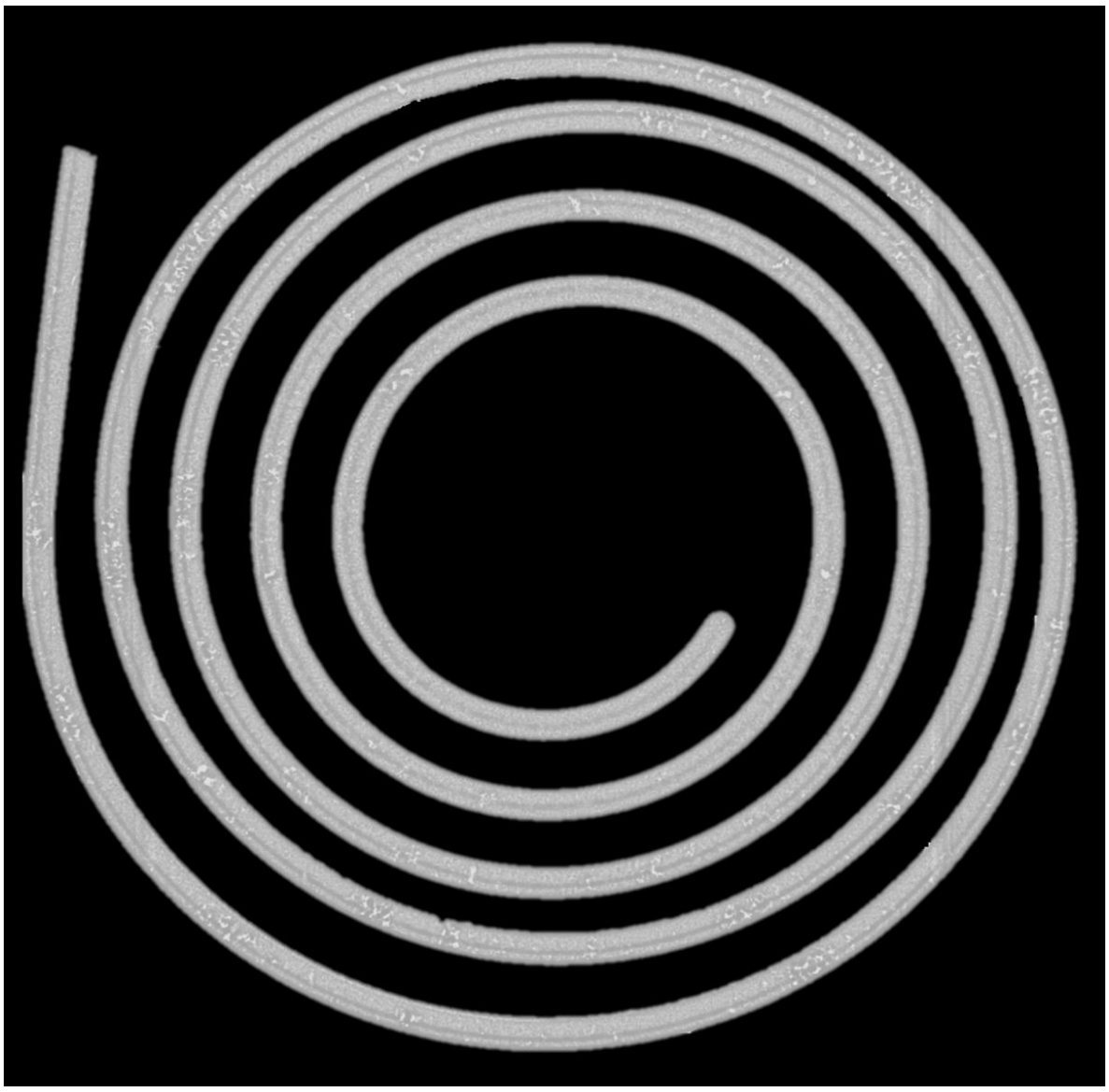
Rayos X			
ID	Aleación	Temperatura del metal	Limpieza de metal
1	332	730°C	D



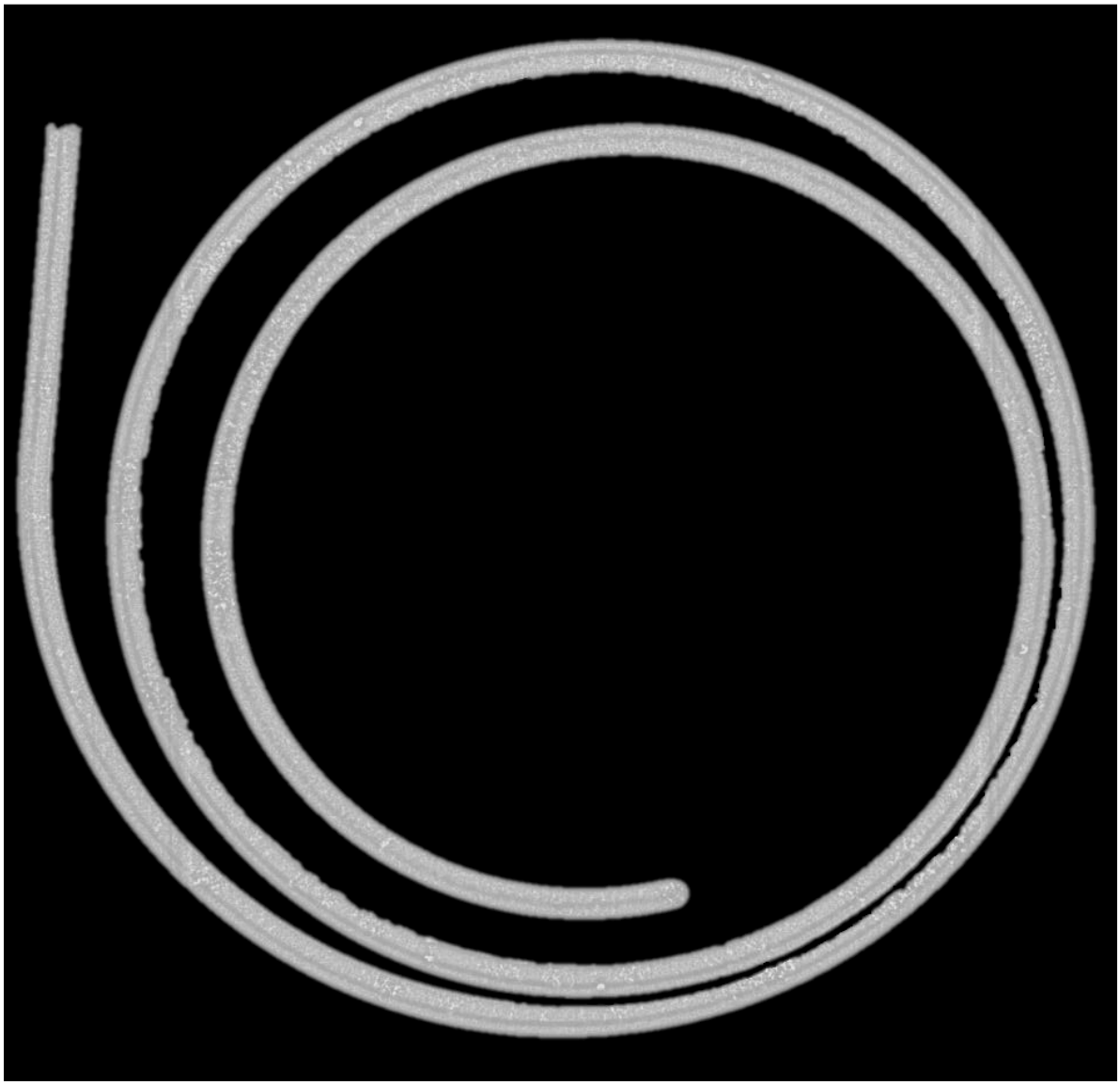
Rayos X			
ID	Aleación	Temperatura del metal	Limpieza de metal
1	332	730°C	SD



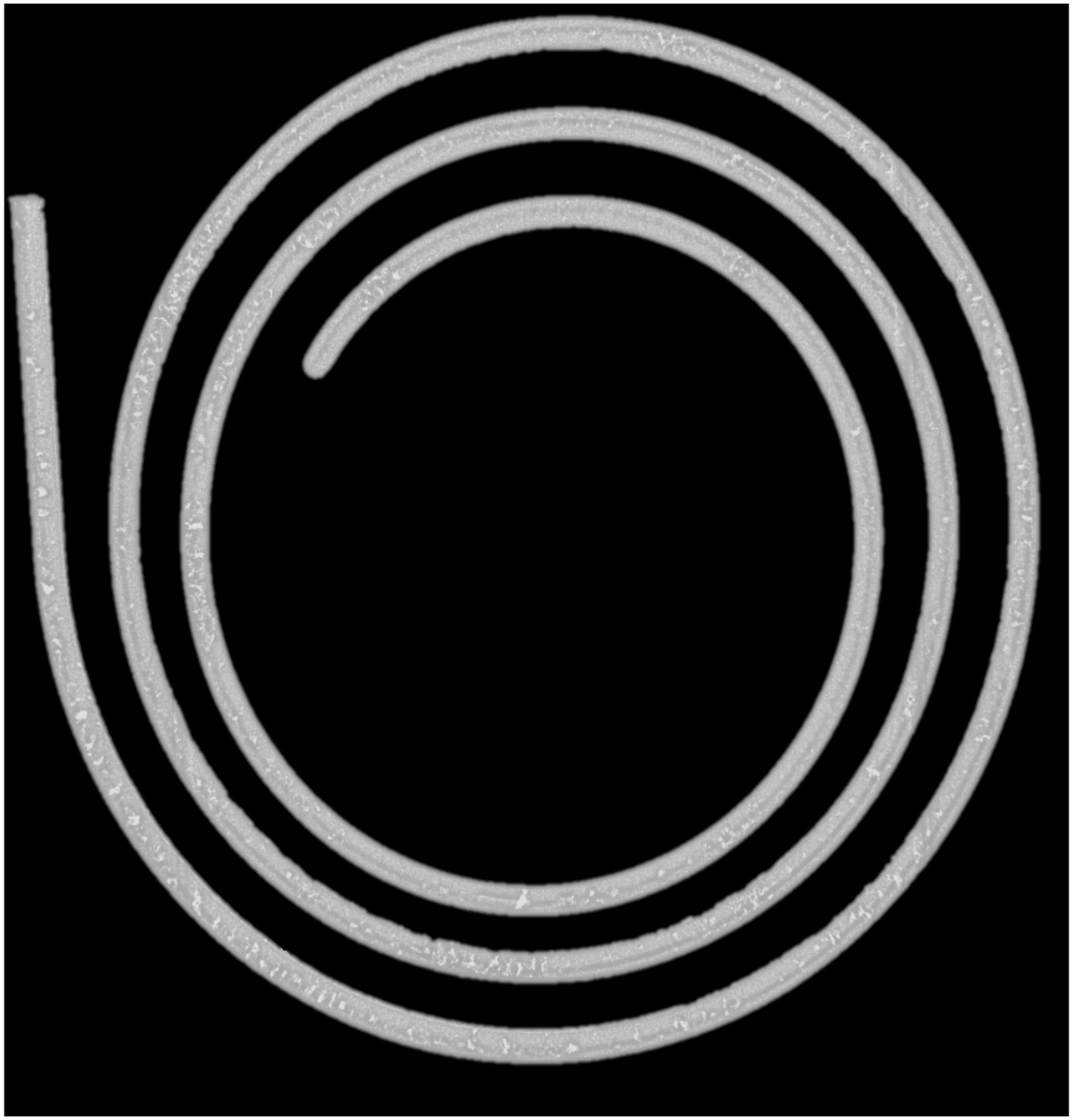
Rayos X			
ID	Aleación	Temperatura del metal	Limpieza de metal
8	332	710 °C	D



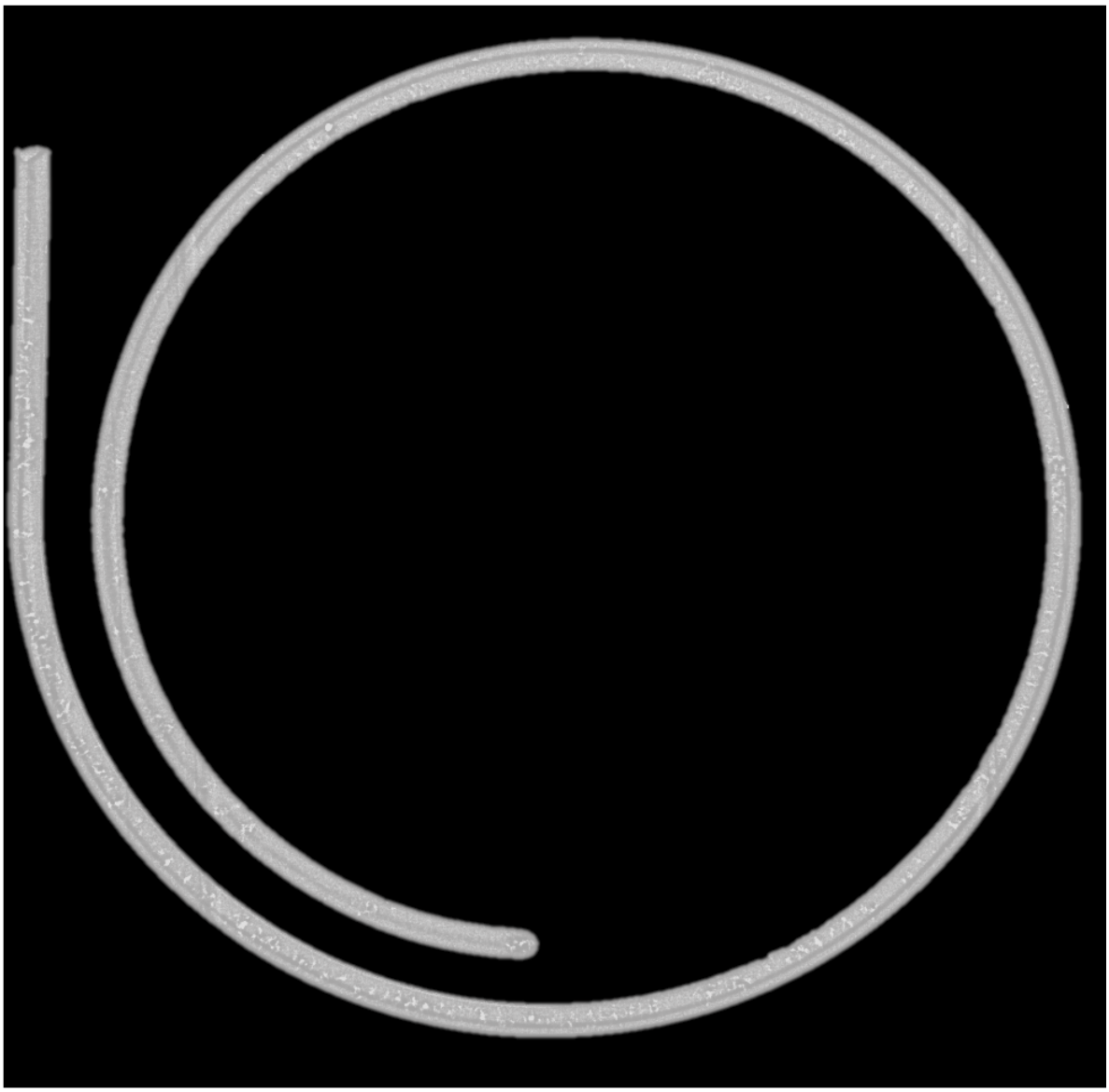
Rayos X			
ID	Aleación	Temperatura del metal	Limpieza de metal
25	332	710 °C	SD



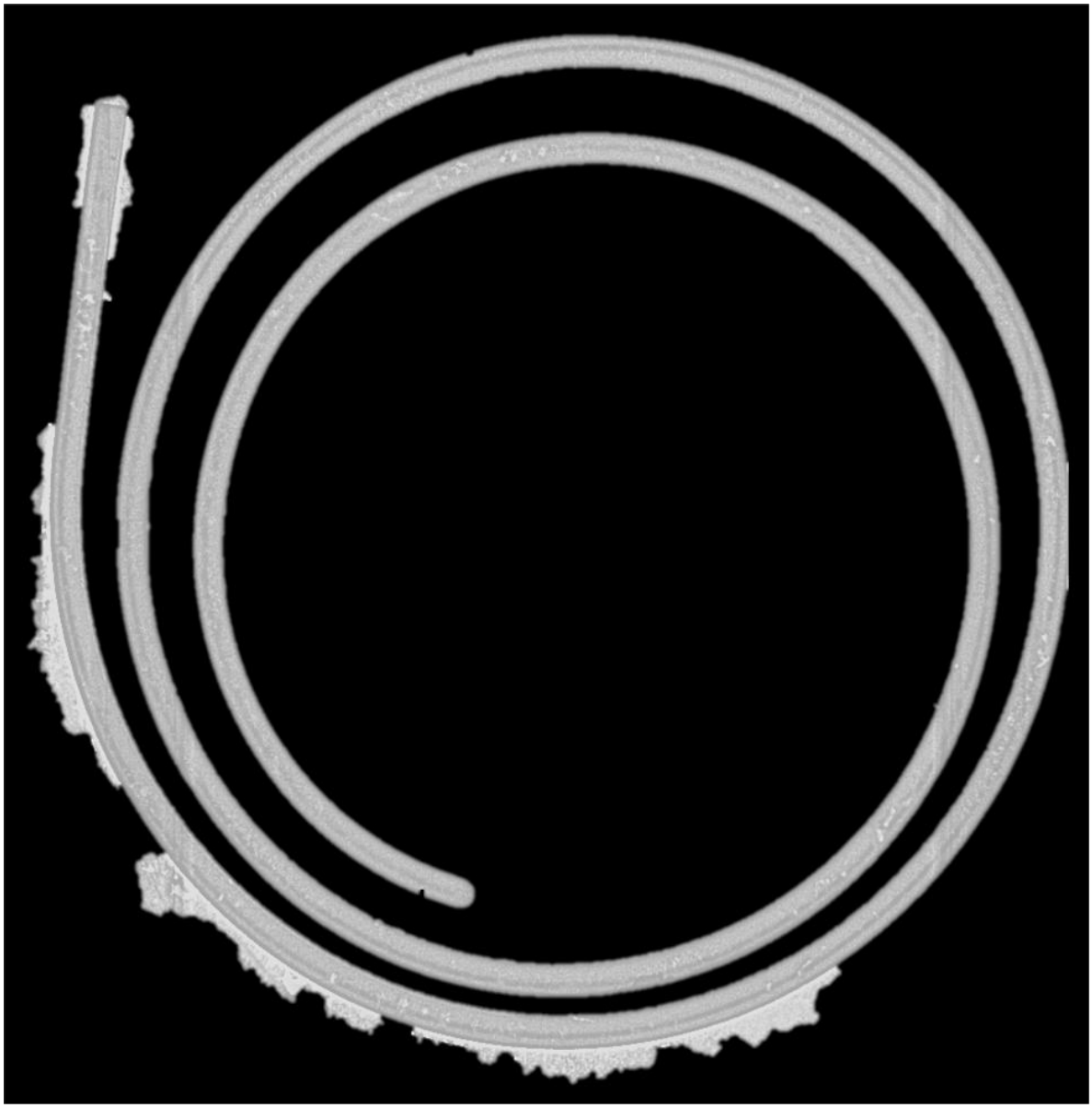
Rayos X			
ID	Aleación	Temperatura del metal	Limpieza de metal
1	332	690 °C	D



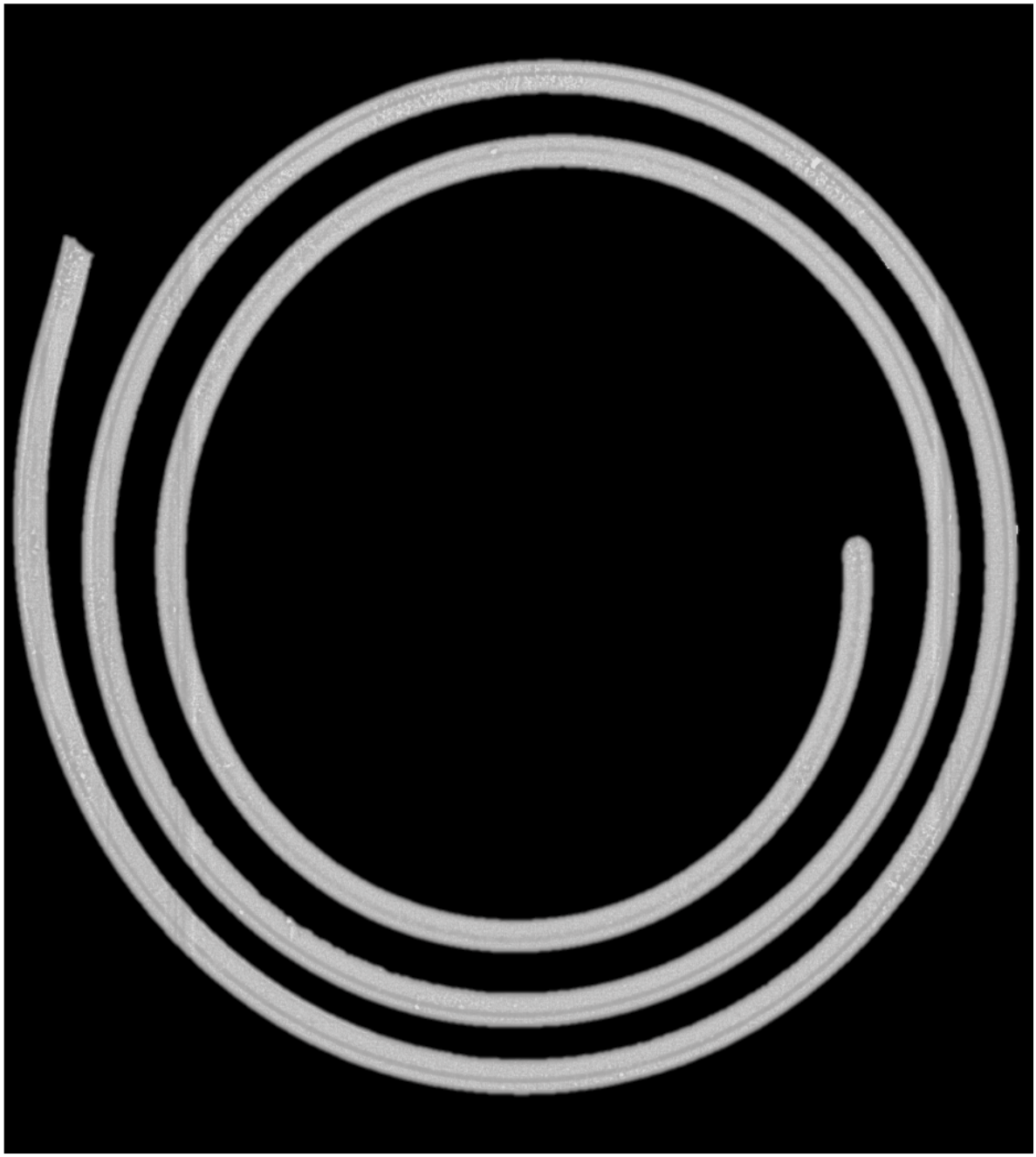
Rayos X			
ID	Aleación	Temperatura del metal	Limpieza de metal
1	332	690°C	SD



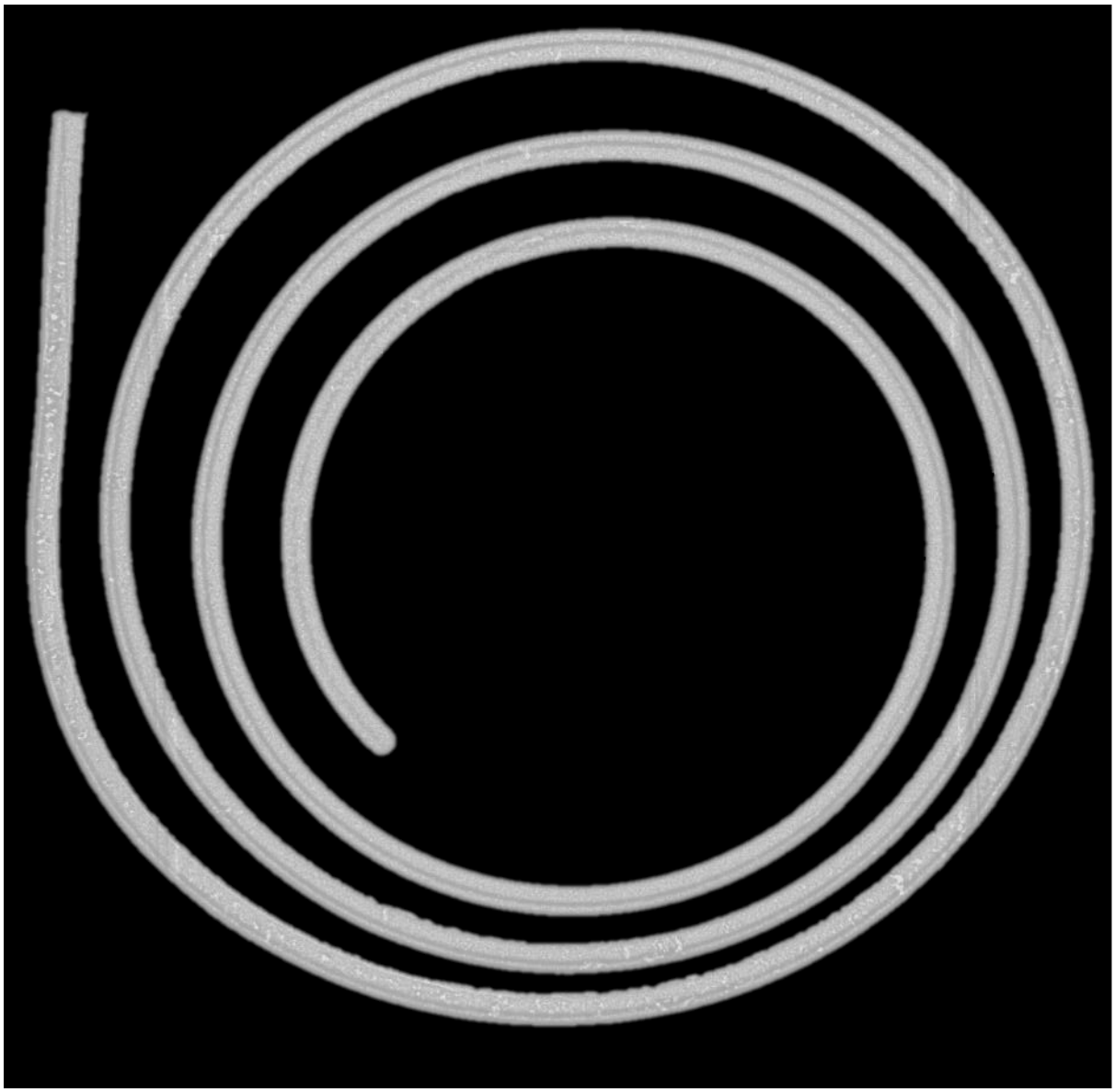
Rayos X			
ID	Aleación	Temperatura del metal	Limpieza de metal
5	356	730°C	D



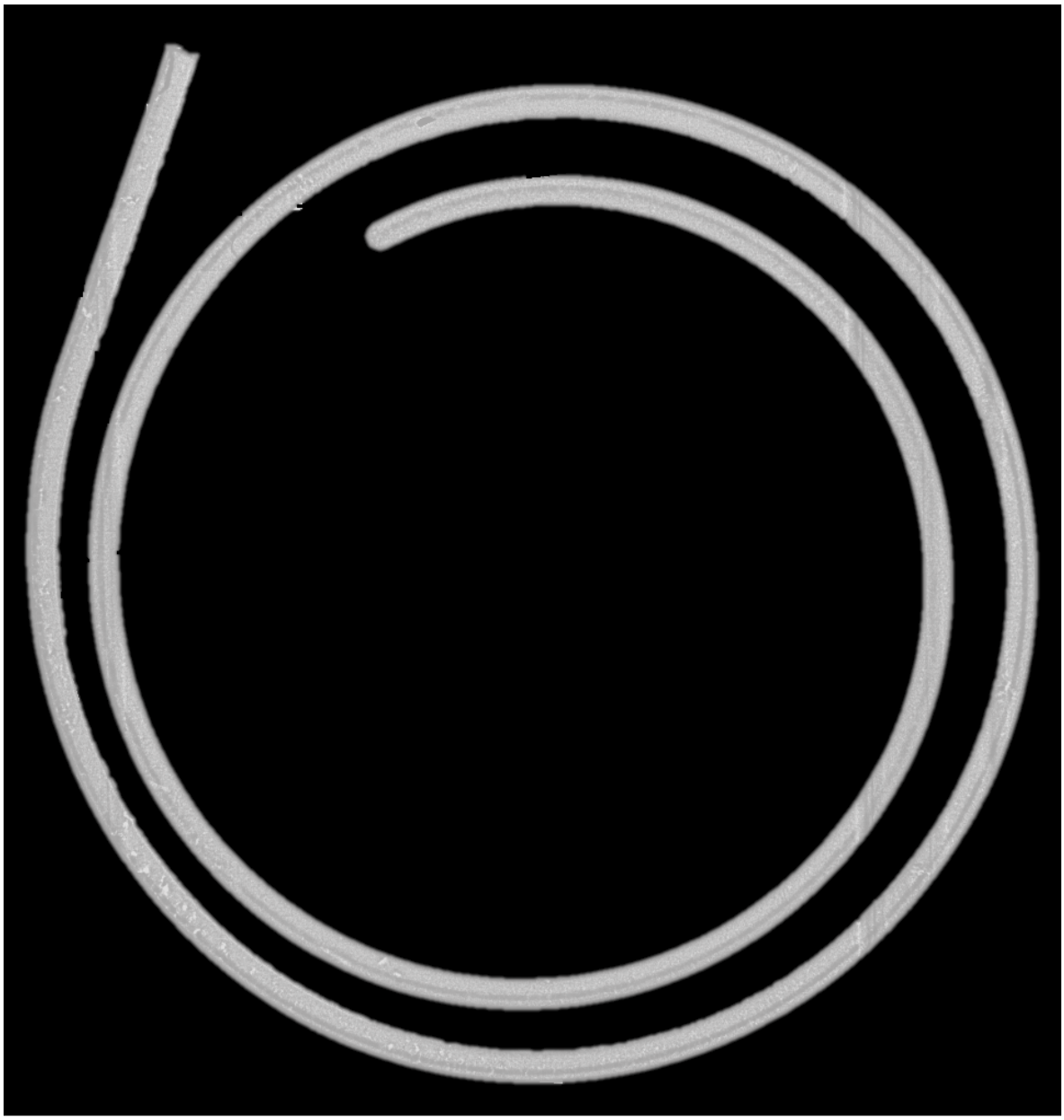
Rayos X			
ID	Aleación	Temperatura del metal	Limpieza de metal
1	356	730 °C	SD



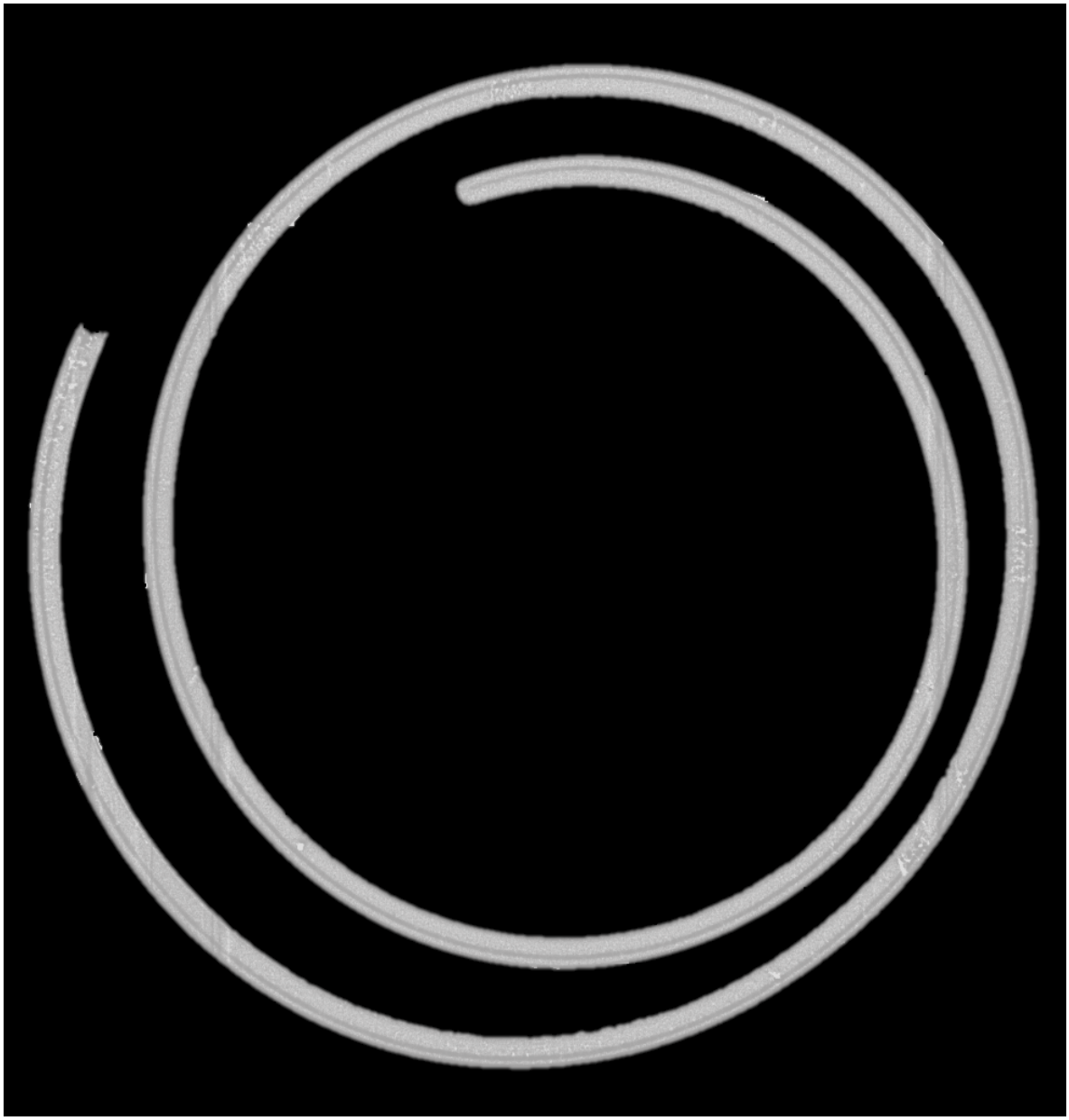
Rayos X			
ID	Aleación	Temperatura del metal	Limpieza de metal
7	356	710°C	D



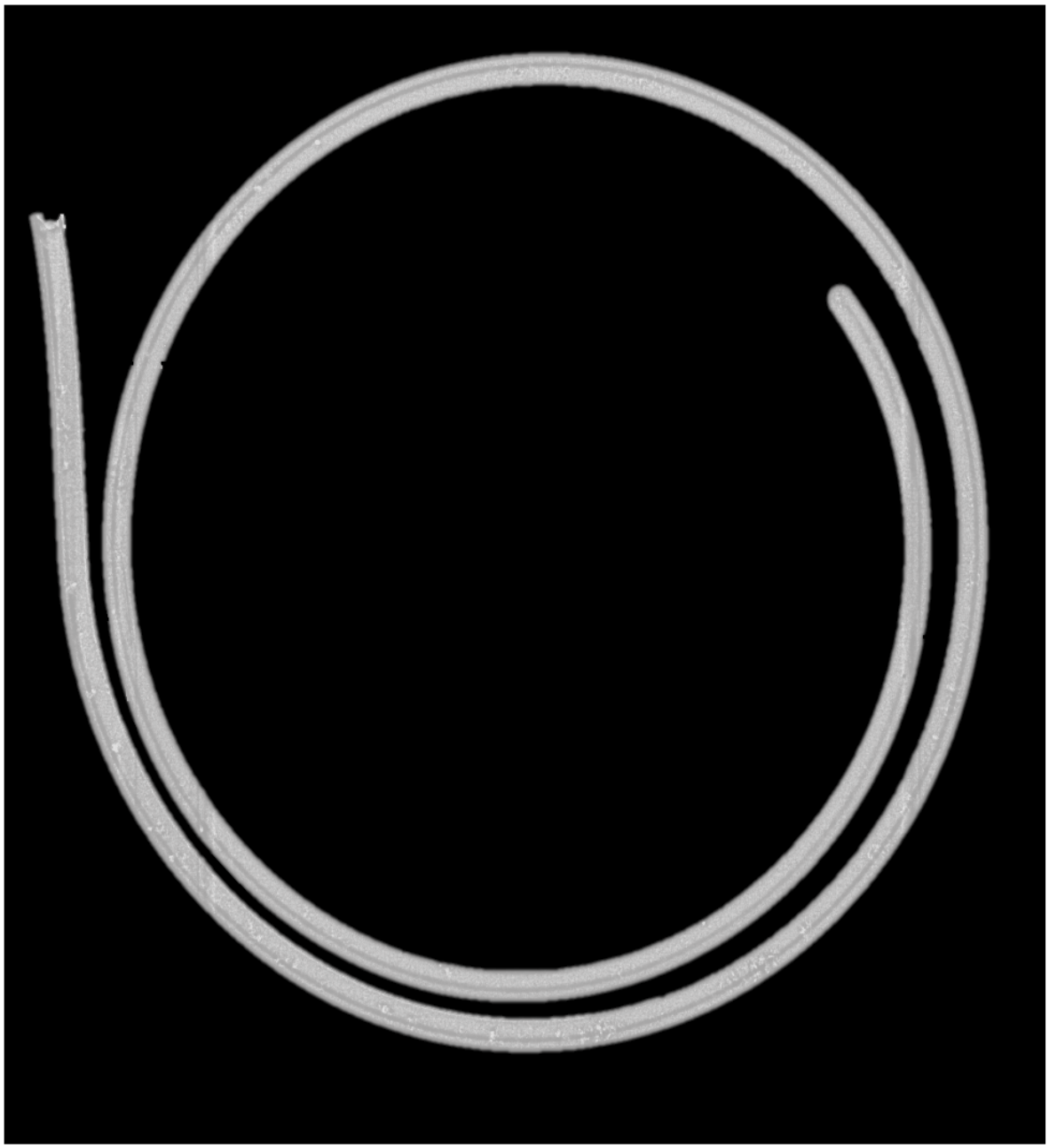
Rayos X			
ID	Aleación	Temperatura del metal	Limpieza de metal
1	356	710°C	SD



Rayos X			
ID	Aleación	Temperatura del metal	Limpieza de metal
1	356	690°C	D



Rayos X			
ID	Aleación	Temperatura del metal	Limpieza de metal
1	356	690°C	SD









We deliver the present ATTESTATION to:

Peñaloza Sandoval Alexander, Martínez Gallegos María Sonia, Valtierra Gallardo Salvador, Álvarez Aispuro Gaspar, García Ibarra Carlos, Rosas Velázquez Mario

For their participation with the POSTER presentation entitled:

"Evaluation of a modified spiral steel mould for different flow tests with al-si alloys of the 356 and 332 series, determining the flow path as a function of their different chemical compositions."

in the

International Conference on Polymers and Advanced Materials "Polymat-2024"
Huatulco, Mexico. October 20-25, 2024.

Prof. Ernesto Rivera Garcia
President of the Organizing Committee

5. Recomendaciones

- A. Karney y E. L. Rooy; “Aluminum Foundry Products”; de ASM Handbook; (1990); Volume 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, ASM International, pp. 123-151.
- American Society for Metals; “Metals handbook”; ASM International; (1988); (9th ed., Vol 15, 2nd printing, 1992).
- Arnberg L., Bäckerud L. y Chai G.; “Características de solidificación de aleaciones de aluminio”; vol. 3: Coherencia dendrítica; AFS, Des Plaines, IL; (1996).
- Bastien, P., Armbruster, J. C., & Azov, P.; “Effect of casting parameters on the fluidity of aluminum alloys”; AFS Transactions; (1962); 70; 400–409.
- Bericht von Ricchard Franzmann; “Informe de prácticas de Richard Franzmann: Base de datos experimental de aleaciones de fundición de aluminio de uso interno” ;grupo Bocar ; (2013) 1-69.
- Bonollo y S Odorizzi; “Simulación numérica de procesos de fundición”; Editado por F.; SGE Ed. Padua; (2001).
- Brown Schultz Sheridan & Fritz and LEA Global release 2022-2023; “Manufacturing outlook survey and insights report”; (2023, marzo 16).
- Caluguillin Achina, J. G., & Lema Quishpe, A. P.; “Estudio y obtención de una aleación liviana para la fabricación de un bloque de motor de combustión interna de dos tiempos”; (Bachelor's thesis, Quito, 2016.); pp. 13-14.
- CR Loper Jr., AFS Trans.; “Fluidity of aluminum-silicon casting alloys”; AFS Transactions; (1992), 533–538.
- D. Apelian, G. K. Sigworth, K. R. Whaler.; “Assessment of Grain Refinement and Modification of Al-Si Foundry Alloys by Thermal Analysis”; AFS Transactions, (1984), Vol. 92 pp. 297-307.
- Di Sabatino M. y Arnberg L.; “Una revisión sobre la fluidez de las aleaciones de Al”; Met Carolina del Sur. y Tech., Teksid; (2004) ; vol.22 no.1; 9-15.

- Di Sabatino, M., Arnberg, L., & Apelian, D.; “Progress on the understanding of fluidity of aluminium foundry alloys”, International Journal of Metalcasting; (2008); 2; 17-27.
- Di Sabatino, M., Arnberg, L., Brusethaug, S., & Apelian, D.; “Fluidity evaluation methods for Al–Mg–Si alloys”. International Journal of Cast Metals Research; (2006a); 19(2); 94-97.
- Di Sabatino, M., Brusethaug, S., Apelian, D., & Arnberg, L.; “Fluidity of aluminium foundry alloys”; International Journal of Cast Metals Research; (julio de 2005).
- Di Sabatino, M., Syvertsen, F., Arnberg, L., & Nordmark, A.; “An improved method for fluidity measurement by gravity casting of spirals in sand moulds”; International Journal of Cast Metals Research; (2005); 18(1); 59–62.
- El instituto de metales fundidos de la sociedad americana de fundidores; “Basic Principles of Gating & Risering” ;(1979) Printing.
- Flemings, M. C., Conrad, H.F., and Taylor, H, F.; “Aluminum Alloys Fluidity Test”; Modern Castings; (1959); Vol. 36(2); pp.110-115.
- Flemings, M. C., Mollard, F. R., & Taylor, H. F.; Mold variables influence on fluidity of aluminum: Doubling ductility by fluidity control; AFS Transactions;(1961); 566–576.
- Garrido Meneses, A. R., & Sánchez Taco, V. H.; “Determinación de la metodología para la obtención de aleaciones de aluminio de fundición maquinables sin porosidades”; Bachelor's thesis; QUITO/EPN; (2011).
- Grande, M. A., & Forno, I.; “Innovation and optimization of the investment casting of precious alloys”; Acta Metallurgica Slovaca; (2014); 20(3); 341-351.
- J. Gilbert Kaufman y E. L. Rooy; “Capítulo 4. The Effects of Microstructure on Properties”; de Aluminum Alloy Castings: Properties, Processes, and Applications; United States of America, ASM International; (2004), pp. 39-45.
- John Campbell and Richard A. Harding; “The Fluidity of Molten Metals” ; TALAT Lecture 3205; (1994) ; 1-19.
- John E. Gruzleski and Bernard M. Closett.; “The Treatment of Liquid Aluminum-Silicon Alloys”; American Foundrymen’s Society, Illinois; (1990).

- Kazanas, H. C., Baker, G. E., & Gregor, T.; “Procesos básicos de manufactura”; McGraw-Hill Interamericana; (2000).
- Kim, J. M., & Loper, C. R., Jr.; “Fluidity of aluminum alloys as influenced by casting variables”; AFS Transactions;(1995); 103, 521–529.
- Kolsgaard A.; “Características de fundición de partículas de SiC reforzadasCompuestos de matriz de aluminio AlSi7Mg”; tesis doctoral Universidad Noruega de Ciencia y Tecnología, Trondheim, Noruega; (1993).
- Krynitsky, A. I.; “Fluidity of aluminum alloys. AFS Transactions”; (1953) 61, 399–411.
- Kwon, Y.-D., & Lee, Z.-H; “The effect of grain refining and oxide inclusion on the fluidity of al–4.5cu–0.6mn and A356 Alloys”; Materials Science and Engineering: A, 360(1–2) ;(2003); 372–376.
- M. Di Sabatino, F. Syvertsen, L. Arnberg, A. Nordmark; “UN MÉTODO MEJORADO PARA LA FLUIDEZ MEDICIÓN POR FUNDICIÓN POR GRAVEDAD DE ESPIRALES EN MOLDES DE ARENA”; Revista internacional de investigación de metales fundidos; (2005); vol.18, 59-62.
- M. Di Sabatino, L. Arnberg, F. Bonollo; “SIMULACIÓN DE FLUIDEZ EN ALEACIONES Al-Si”; Ed. por Teksid Aluminium” julio de 2005; 121-141.
- M.J. Schulz, A.S. Naser, S.K. Thyagarajan, T. Mickens and P.F. Pai,; “Proc. 16th International Modal Analysis Conference — IMAC”, (1998); Vol. 1, pp. 760-766.
- Maldini, C., Cruchaga, M., Celetano, D., & Bustos, O.; “Estudio Experimental Y Numérico Del Ensayo De Fluidez En Espiral”; Mecánica Computacional; (2004); pp. 1633-1644.
- Mantilla Castañeda, J. E., & Torres Rivas Plata, T. A.; “Efecto de la temperatura de colada sobre la dureza, desgaste y fluidez de la aleación asm 356, colada en molde de arena en forma de espiral”; (2016); pp. 1-74.
- Martin, B. Taylor STAS Inc.; “Molten Metal Fluxing/Treatment: How best to achieve the desired quality requirements”, (2006); 1-12.
- MC Flemings; “Procesamiento de solidificación”; McGraw-Hill Inc., Londres; (1974).

- Mollard, F. R., Flemings, M. C., & Niyama, E. F.; “Understanding aluminum fluidity: The key to advanced cast products”. AFS Trans; (1987); 95, 647-652.
- Moreno, A.; “Estudio del efecto de la modificación con estroncio en la microestructura y propiedades mecánicas de aleaciones Al-Si-Mg”; Universitat Politecnica de Catalunya, Escola d’Enginyeria de Barcelona Est.; (2020).
- N. Kayama; “Control de calidad de aleaciones de ingeniería y el papel de los metales”; Ciencia, Universidad Tecnológica de Delft; (1978) 103-119.
- Ndaliman, M., & Akpan, P.; “Behavior of Aluminum Alloy Castings under Different Pouring Temperatures and Speeds”; Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies; (2007), 6,71-80.
- Ned Tenekedjiev, Hasim Mulazimoglu, Bernard Closett and John Gruzleski; “Microstructures and Thermal Analysis of Strontium-Treated Aluminum-Silicon Alloys”; American Foundrymen’s Society, Illin; (1995).
- Pehlke R., Marrone RE y Wilkes JO; “Simulación por computadora de solidificación”; AFS, Des Plaines, IL, (1976).
- Peñaloza S. A., Gallardo V. S. Martínez Gallegos S. & cols.; “Fluidity analysis using a spiral steel mold in A356 Al-Si alloys, a Foundry approach”; [Article: American Foundry Society] (2025),
- Peñaloza S. A., Gallardo V. S. Martínez Gallegos S. & cols.; “Evaluation and comparison of alloy 332 based on its fluidity in a spiral mold applied to foundry”; [Article: American Foundry Society]; (2025).
- Riverin, G., Bilodeau, J. F., & Dupuis, C.; “A novel crucible metal treatment process for impurity removal in secondary aluminium”; Light Metals, (2006), 4.
- Sabatino M., Shankar S., Apelian D. y Arnberg L.; “Shape Casting: El Simposio de John Campbell, Ed. por M. Tiryakioglu y PN Crepeau”, TMS 2005, San Francisco, (13-17 de febrero de 2005), 193-202.
- Syvertsen, F.; “Fluidity of aluminum alloys: Influence of oxide inclusions and melt treatment”; AFS Transactions; (2005); 113; 1–8.

- Tiryakioglu, M., Askeland, D. R., & Ramsay, C. W.; “Effect of casting variables on the fluidity of aluminum alloys”; AFS Transactions; (1994); 102; 17–25.
- Tiryakioglu, M., Askeland, D. R., & Ramsay, C. W.; “Fluidity of 319 and A356: an experimental design approach”; Transactions-American Foundrymens Society;(1995a); 17-26.
- Tiryakioglu, M., Askeland, D. R., & Ramsay, C. W.; “Relationship between metal fluidity and optimum pouring time: a literature review”. Transactions-american foundrymens society; (2006) 685-685.
- Torres González, R.; “Índice de calidad de una aleación de aluminio tipo A319” (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León); (2007)
- Veldman NLM, Dahle AK, StJohn DH y Arnberg L.; “Coherencia dendrita de aleaciones Al-SiCu”; Met. y Mat. Trans. A, 32 A; (2001), 147-155.
- Venkateswaran, S., Mallya, R. M., & Seshadri, M. R.; “Effect of trace elements on the fluidity of eutectic aluminum-silicon alloy using the vacuum suction technique; Transactions of the American Foundrymen's Society, (2007); 94; 701-708.
- WD Griffiths, D. Whitworth; “Proc. 12º Congreso Internacional de Metalurgia y Materiales”, Estambul, Turquía, (28 de septiembre al 2 de octubre de 2005), en prensa. 20.