



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

OBTENCIÓN DE UNA ALEACIÓN Cu – Zn LIBRE DE PLOMO MEDIANTE SIMULACIÓN Y VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

TRABAJO DE TESIS PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE MAGISTER EN MATERIALES

HEREDIA SIMBAÑA JOAO RODRIGO
joao.heredia@epn.edu.ec

DIRECTOR:
ING. DÍAZ CAMPOVERDE CARLOS WIME, M.Sc.
carlos.diaz@epn.edu.ec

Abril, 2024

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **JOAO RODRIGO HEREDIA SIMBAÑA**, bajo mi supervisión.

Ing. Carlos Diaz M.Sc.

DIRECTOR DE PROYECTO

DECLARACIÓN

Yo, **Joao Rodrigo Heredia Simbaña**, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Joao Rodrigo Heredia Simbaña

DEDICATORIA

Es un honor para mí dedicar este escrito a mi familia. Me gustaría expresar mi más sincero agradecimiento y gratitud a dos personas que han sido los pilares de mi vida: mi padre, Sr. Marco Heredia, y mi madre, Sra. María Simbaña. A lo largo de los años, su apoyo inquebrantable y su amor incondicional han sido la fuente de mi fortaleza y motivación para lograr mis objetivos personales y profesionales.

Desde mi infancia hasta la actualidad, mis padres han sido modelos de integridad, sacrificio y dedicación. Su arduo trabajo, resiliencia, tenacidad y valores sólidos han sido mi ejemplo a seguir. Me enseñaron la importancia de la honestidad, el respeto por los demás y la búsqueda incesante de la excelencia en todos los aspectos de la vida.

No puedo dejar de mencionar a mis queridas hermanas, Alexandra Heredia y Grace Heredia, quienes me han acompañado en cada etapa de mi vida. Su constante apoyo y amor desinteresado han sido un faro de luz en tiempos oscuros. Mis hermanas siempre han estado dispuestas a ayudarme, escucharme y apoyarme.

A lo largo de mi formación personal y profesional, he vivido momentos de alegría y éxito, pero también he enfrentado obstáculos y desafíos. Sin embargo, cada triunfo que he logrado ha sido posible gracias al apoyo de mi familia.

AGRADECIMIENTO

A Dios, quien me ha permitido continuar mi travesía en este mundo, brindándome las oportunidades y fuerzas necesarias para afrontar los desafíos que me depara la vida.

A mis Padres, les debo una deuda de gratitud que va más allá de lo que se puede expresar con palabras. En los momentos más difíciles de mi vida, su amor y apoyo incondicional han sido un pilar de fortaleza. Estoy profundamente agradecido por todo lo que han hecho por mí, ya que su sacrificio y dedicación hicieron posible esta meta.

A mis hermanas, merecen un lugar especial en mi corazón por el apoyo y motivación que me han brindado a lo largo de mi vida. Siempre estuvieron ahí para mí, dispuestas a ofrecerme un consejo y fortaleza en los momentos difíciles.

Al Ing. Carlos Díaz, cuya experta orientación, dedicación y consideración al compartir sus conocimientos fueron cruciales para el desarrollo exitoso de esta investigación.

Al grupo de trabajo multidisciplinario que contribuyó con sus habilidades, conocimientos y compromiso a este proyecto, lo que permitió avanzar y alcanzar nuestro objetivo común.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	20
Pregunta de Investigación	22
Objetivo general	22
Objetivos específicos	22
Alcance del proyecto	23
Justificación	24
1. MARCO TEÓRICO	26
1.1. Generalidades	26
1.1.1. Proceso de fundición.....	26
1.1.2. Solidificación	35
1.1.3. Nucleación	43
1.1.4. Crecimiento.....	47
1.1.5. Elementos aleantes.....	53
1.2. Simulación del proceso de fundición.....	54
1.2.1. Software Altair Inspire Cast.....	55
1.3. Técnicas de caracterización de las aleaciones de Cu.....	57
1.3.1. Microscopia electrónica.....	57
2. METODOLOGÍA	62
2.1. Materiales	62
2.1.1. Selección de la aleación Cu – Zn – FeSi.....	62
2.1.2. Cargas para el proceso de fundición	63
2.2. Simulación del proceso de fundición de la aleación Cu – Zn – Si para el colado de probetas en posición vertical y horizontal.....	65
2.2.1. Simulación por computadora.....	65
2.3. Proceso experimental de fundición	73
2.3.1. Proceso de fundición.....	73
2.3.2. Sistema de alimentación	79

2.3.3.	Horno y elementos	84
2.3.4.	Parámetros de colado	89
2.3.5.	Proceso de fundición.....	91
2.4.	Caracterización de la aleación	92
2.4.1.	Ensayos mecánicos	92
2.4.2.	Ensayo metalográfico.....	95
2.4.3.	Ensayo morfológico.....	100
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	102
3.1.	Resultados.....	102
3.1.1.	Fundición empírica.....	102
3.1.2.	Ensayo de dureza	104
3.1.3.	Ensayo de microdureza.....	105
3.1.4.	Tamaño de silicio	105
3.1.5.	Comparación (Dureza, Microdureza y Tamaño de silicio)	106
3.1.6.	Ensayo de metalografía	107
3.1.7.	Matriz comparativa – Ensayos de caracterización.....	110
3.1.8.	Simulación	111
3.1.9.	Comparativa del proceso de fundición por gravedad experimental con la simulación	119
3.1.10.	Microscopía electrónica de barrido.....	122
3.2.	Discusión	128
3.2.1.	Resultados de la caracterización de las muestras de la aleación de Cu – Zn – FeSi coladas en posición vertical	128
3.2.2.	Resultados de la simulación de las probetas coladas en posición horizontal y vertical de la aleación de Cu – Zn – FeSi	131
3.2.3.	Resultados del proceso de fundición experimental y teórico del proceso de fundición por gravedad de la aleación de Cu – Zn – FeSi	134
3.2.4.	Resultados de la caracterización por microscopía de las muestras coladas en posición vertical y horizontal de la aleación de Cu – Zn – FeSi	136

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	138
4.1. Conclusiones.....	138
4.2. Recomendaciones.....	139
Referencias Bibliográficas	141
ANEXOS	154

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Descripción de los pasos de producción en una operación de fundición.	27
Figura 1.2	Descripción del proceso esquemático para llevar a cabo la fundición en arena.	28
Figura 1.3	Representación gráfica de una fundición con sus elementos más característicos.	29
Figura 1.4	Diagrama de un molde elaborado con arena que exhibe diversas particularidades.	29
Figura 1.5	Cambios en el tamaño en función de la variación de temperatura. a) Material metálico en su estado puro, b) Mezcla de componentes metálicos (aleación).	32
Figura 1.6	Casos ilustrativos de fisuras o fracturas producidas en las piezas fundidas.	34
Figura 1.7	Ejemplificaciones de imperfecciones habituales en las piezas fundidas. Estos fallos pueden ser reducidos o eliminados a través de una planificación de diseño apropiado, la adecuada preparación de los moldes y la supervisión de los procesos de vertido.	35
Figura 1.8	Ilustración gráfica que muestra la variación de la energía libre (G) en función de la temperatura para la fase sólida (S) y líquida (L).	36
Figura 1.9	Representación que muestra la relación entre la temperatura y el tiempo en el análisis térmico de un metal puro que exhibe un fenómeno denominado subenfriamiento (ΔT) que precede a la formación inicial de la fase sólida, conocida como nucleación.	37
Figura 1.10	Patrón térmico en la región donde la pared del molde y el metal líquido se encuentran, mientras ocurre el proceso de solidificación de los metales durante el proceso de fundición.	37
Figura 1.11	(a) Representación gráfica que muestra cómo varía la temperatura a lo largo del tiempo durante el proceso de solidificación de metales puros (Es importante notar que la solidificación se lleva a cabo a una temperatura constante). (b) Gráfico que ilustra cómo cambia la densidad a medida que avanza el tiempo.	38

Figura 1.12	Representación gráfica del proceso de solidificación en una aleación y la disposición de la temperatura en el metal que está experimentando solidificación.	39
Figura 1.13	Configuración de un lingote con tres regiones distintas.	40
Figura 1.14	La disposición dendrítica en el frente de crecimiento de los granos en una estructura columnar.	40
Figura 1.15	a) Flujo convectivo en el metal fundido vertido en un molde, b) Representación gráfica de una dendrita que ilustra la disminución del ancho de las ramas laterales en su base.	41
Figura 1.16	Representación gráfica de la solidificación que progresa desde la superficie del molde hacia el centro de la pieza fundida. a) la formación de capa, b) una situación intermedia y c) la formación dispersa.	42
Figura 1.17	Proceso de solidificación transición de líquido a sólido.	43
Figura 1.18	a) Una interfaz se forma cuando un sólido se genera a partir del estado líquido, b) La energía total del sistema compuesto por el sólido y el líquido varía en función del tamaño del sólido.	44
Figura 1.19	Diagrama de enfriamiento de un metal puro que no ha sido adecuadamente tratado para eliminar impurezas.	45
Figura 1.20	Comparación de las energías necesarias para iniciar el proceso de nucleación en los casos de nucleación homogénea y nucleación heterogénea cuando se tiene un radio crítico idéntico.	46
Figura 1.21	Representación gráfica de un embrión que se forma en la superficie de otro material sólido.	47
Figura 1.22	Representación de la formación y crecimiento de una dendrita.	48
Figura 1.23	Diagrama de fases cobre - cinc (Cu – Zn).	50
Figura 1.24	Microestructuras típicas de aleaciones de Cu-40Zn enfriadas rápidamente desde la región β hasta 20 °C.	52
Figura 1.25	Simulación del proceso de llenado.	55
Figura 1.26	Cuadro de herramientas software Altair Inspire Cast.	55
Figura 1.27	Software Altair Inspire Cast. a) Diseño de molde en 3D, b) Modelo ensamblado, c) Fracción sólida y d) Temperatura del molde.	56
Figura 1.28	El límite de resolución de microscopía en los instrumentos ópticos y electrónicos.	57

Figura 1.29	En el proceso de interacción de los electrones del haz primario con el espécimen, algunos electrones inducen múltiples tipos de respuestas señales (electrones secundarios, retrodispersión, Auger, rayos X, cátodo-luminiscencia, entre otros).	58
Figura 1.30	Imagen y representación de un microscopio electrónico de barrido, detallando sus elementos clave.	59
Figura 1.31	Información que se obtiene de un microscopio electrónico de barrido. a) Electrones secundarios (SE) - Topografía, b) visualización tridimensional, c) Mapeo de Rayos X (EDS) - composición química (EDS), d) Electrones retrodispersados (BSE) – número atómico y e) EBSD - cristalografía.	61
Figura 2.1	Esquema preproceso de fundición.	64
Figura 2.2	Descripción del procedimiento utilizado en el proceso de fundición en molde de arena.	65
Figura 2.3	Pasos para la configuración de la simulación del proceso de fundición con el software Altair Inspire Cast.	66
Figura 2.4	Pantalla de inicio software Altair Inspire Cast. a) diseño probetas en posición horizontal y b) diseño de probetas en posición vertical.	67
Figura 2.5	Determinar la orientación de la gravedad. a) Probetas en posición horizontal y b) Probetas en posición vertical.	68
Figura 2.6	Entrada metal líquido. a) Probetas en posición horizontal y b) Probetas en posición vertical.	68
Figura 2.7	Componentes del sistema de alimentación y molde.	69
Figura 2.8	Molde. a) Probetas en posición horizontal y b) Probetas en posición vertical.	70
Figura 2.9	Parámetros de vertido. a) Probetas en posición horizontal y b) Probetas en posición vertical.	70
Figura 2.10	Configuración de análisis y mallado.	71
Figura 2.11	Malla. a) Probetas en posición horizontal y b) Probetas en posición vertical.	72
Figura 2.12	Cajas de moldeo probetas en posición horizontal. a) Diseño caja de moldeo, b) Caja de moldeo en madera.	74
Figura 2.13	Dimensiones caja de moldeo probetas en posición horizontal.	74
Figura 2.14	Modelo deslizante probetas en posición horizontal.	75

Figura 2.15	Dimensiones del modelo deslizante para probetas en posición horizontal.	75
Figura 2.16	Configuración del modelo.	76
Figura 2.17	Diseño caja de moldeo probetas en posición vertical.	76
Figura 2.18	Dimensiones caja de moldeo probetas en posición vertical.	77
Figura 2.19	Mezcladora. Escuela Politécnica Nacional – Facultad de Ingeniería Mecánica (Laboratorio de Fundición).	79
Figura 2.20	Configuración óptima del bebedero.	80
Figura 2.21	Determinación de las dimensiones apropiadas de la taza para el proceso de colado.	81
Figura 2.22	Cálculo de las dimensiones adecuadas del pozo de colado.	81
Figura 2.23	Proporción de dimensiones en los conductos de alimentación.	82
Figura 2.24	Sistema de alimentación probetas en posición horizontal.	83
Figura 2.25	Sistema de alimentación probetas en posición vertical.	84
Figura 2.26	Horno a diésel fijo de crisol móvil.	85
Figura 2.27	Crisol de grafito.	85
Figura 2.28	Maneral.	86
Figura 2.29	Escoreador.	86
Figura 2.30	Pinzas.	87
Figura 2.31	Antorcha de gas licuado de petróleo (GLP).	87
Figura 2.32	Pirómetro.	88
Figura 2.33	Esquema proceso de fundición aleación Cu – Zn.	92
Figura 2.34	Proceso de preparación de la muestra para el ensayo de metalografía. a) conformado de la forma con resina, b) desbaste grueso y c) pulido.	98
Figura 2.35	Cuadro de herramientas software ImageJ.	99
Figura 2.36	Cuantificación de partículas y área empleando el software ImageJ.	100
Figura 3.1	Fundición. a) Colado de probetas en posición horizontal, b) Colado de probetas en posición vertical.	102
Figura 3.2	Acabado superficial. a) Resina furánica, b) Resina fenólica.	104
Figura 3.3	Valores promedio de la dureza en las probetas coladas en posición vertical.	104
Figura 3.4	Microdureza en las probetas coladas en posición vertical (Fase α y Fase β').	105
Figura 3.5	Tamaño de silicio en las probetas coladas en posición vertical.	106

Figura 3.6	Gráfico comparativo de dureza, microdureza y tamaño de silicio de las probetas coladas en posición vertical.	106
Figura 3.7	Temperatura de colado probetas en posición horizontal.	111
Figura 3.8	Temperatura de colado probetas en posición vertical.	112
Figura 3.9	Temperatura final de colado. a) Colado probetas en posición horizontal, b) Colado probetas en posición vertical.	112
Figura 3.10	Velocidad metal líquido probetas en posición horizontal.	113
Figura 3.11	Velocidad metal líquido probetas en posición vertical.	114
Figura 3.12	Tiempo de llenado. a) Colado probetas en posición horizontal, b) Colado probetas en posición vertical.	114
Figura 3.13	Aire atrapado probetas en posición horizontal.	115
Figura 3.14	Aire atrapado probetas en posición vertical.	115
Figura 3.15	Erosión molde probetas en posición horizontal.	116
Figura 3.16	Erosión molde probetas en posición vertical.	116
Figura 3.17	Uniones frías probetas en posición horizontal.	117
Figura 3.18	Uniones frías probetas en posición vertical.	117
Figura 3.19	Presión de llenado. a) Colado probetas en posición horizontal, b) Colado probetas en posición vertical.	118
Figura 3.20	Temperatura del molde. a) Colado probetas en posición horizontal, b) Colado probetas en posición vertical.	118
Figura 3.21	Probeta de tracción de aleación Cu – Zn con adición de 1,5 % de ferro-silicio, elaborada por colado de las probetas en posición horizontal. a) Macrografía con un aumento de 0,5X, b) y c) Imágenes de microscopía electrónica de barrido de electrones secundarios con un aumento de 30X y 100X, respectivamente.	123
Figura 3.22	Imágenes de microscopía electrónica de barrido de electrones secundarios con un aumento de 30X de la probeta con 1.5 % de ferro-silicio, elaborada por colado de las probetas en posición horizontal.	123
Figura 3.23	Análisis de la zona de fractura mediante la técnica de espectrometría por dispersión de energía de rayos X (EDS) de la probeta con un contenido de 1,5 % de ferro-silicio, elaborada por colado de las probetas en posición horizontal. a) – e) mapeo de rayos x de los diferentes elementos que contiene la muestra y f) espectro de rayos X característicos.	124

Figura 3.24	Probeta de tracción de aleación Cu – Zn con adición de 1,5 % de ferro-silicio, elaborada por colado de las probetas en posición vertical. a) Macrografía con un aumento de 0,5X, b) y c) Imágenes de microscopía electrónica de barrido de electrones secundarios con un aumento de 100X y 300X, respectivamente.	126
Figura 3.25	Análisis de la zona de fractura mediante la técnica de espectrometría por dispersión de energía de rayos X (EDS) de la probeta con un contenido de 1,5 % de ferro-silicio, elaborada por colado de las probetas en posición vertical. a) – f) mapeo de rayos x de los diferentes elementos que contiene la muestra y g) espectro de rayos X característicos.....	127

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1	Contracción o dilatación volumétrica por solidificación.....	32
Tabla 2.1	Porcentaje de los elementos cobre (Cu) y cinc (Zn) en combinación con ferro-silicio en una aleación.	62
Tabla 2.2	Aleación de cobre (C38500).....	63
Tabla 2.3	Cantidad de sustancias necesarias para obtener 16 kg de una aleación compuesta por cobre y cinc, junto con la adición de ferro-silicio.	64
Tabla 2.4	Especificaciones arena de moldeo.....	78
Tabla 2.5	Tiempo de llenado, tanto para el colado de probetas en orientación horizontal como vertical.	89
Tabla 2.6	Velocidad de vertido, tanto para el colado de probetas en orientación horizontal como vertical.....	89
Tabla 2.7	Temperaturas del proceso de colado.	90
Tabla 2.8	Altura efectiva, tanto para el colado de probetas en orientación horizontal como vertical.	91
Tabla 2.9	Especificaciones técnicas del equipo para el ensayo de dureza.	93
Tabla 2.10	Especificaciones técnicas del equipo para el ensayo de microdureza.	94
Tabla 2.11	Dimensiones probeta de ensayo.	95
Tabla 2.12	Especificaciones técnicas de la máquina desbastadora de disco.....	96
Tabla 2.13	Especificaciones técnicas del equipo para preparación y pulido de muestras.....	96
Tabla 2.14	Características del reactivo químico para aleaciones de Cu.	97
Tabla 2.15	Especificaciones técnicas microscopio metalográfico.	97
Tabla 2.16	Especificaciones técnicas del microscopio electrónico de barrido (SEM).	101
Tabla 3.1	Defectos.....	103
Tabla 3.2	Microestructuras de las muestras con adición de ferro-silicio en su composición química de las probetas coladas en posición vertical.	107
Tabla 3.3	Matriz comparativa de caracterización de las probetas en posición vertical con adición de ferro-silicio en su composición química.....	110

Tabla 3.4	Defectos identificados en la simulación (aire atrapado y juntas frías) comparados con los resultados obtenidos experimentalmente en el colado de probetas en posición vertical.	119
Tabla 3.5	Defectos identificados en la simulación (aire atrapado y juntas frías) comparados con los resultados obtenidos experimentalmente en el colado de probetas en posición horizontal.	121
Tabla 3.6	Composición química obtenida de la técnica de espectrometría por dispersión de energía de rayos X (EDS) de la probeta con un contenido de 1,5 % de ferro-silicio, elaborada por colado de las probetas en posición horizontal.	125
Tabla 3.7	Composición química obtenida de la técnica de espectrometría por dispersión de energía de rayos X (EDS) de la probeta con un contenido de 1,5 % de ferro-silicio, elaborada por colado de las probetas en posición vertical.	128

ANEXOS

ANEXOS I: Resultados ensayo de dureza aleación Cu-Zn-FeSi.	155
ANEXOS II: Resultados ensayo de microdureza aleación Cu – Zn – FeSi.	156
ANEXOS III: Tamaño de Silicio (Si).	172
ANEXOS IV: Velocidad del metal líquido.	173
ANEXOS V: Cuantificación del porcentaje de fases.	177
ANEXOS VI: Microscopía electrónica de barrido.	186

RESUMEN

La fundición es un proceso fundamental en la industria de manufactura por su capacidad para producir una amplia variedad de componentes mediante diversos procedimientos. En este estudio, se evaluó la viabilidad de utilizar un software especializado para simular la fundición por gravedad en moldes de arena para la producción de aleaciones de Cu – Zn con la adición de ferro-silicio en diferentes proporciones (0.5 %, 1 %, 1.5 % y 2 % en peso). Además, se varió la orientación de las muestras de prueba (horizontal y vertical) para prevenir y mitigar posibles defectos en el proceso, comparando los resultados experimentales con los obtenidos mediante simulación por computadora utilizando el software Altair Inspire Cast. La inclusión de ferro-silicio en la composición fue motivada por la necesidad de encontrar una alternativa al plomo en aleaciones (C38500) utilizadas en productos de grifería, debido a los riesgos para la salud y el medio ambiente asociados con el plomo. Por lo tanto, la investigación pretende no solo optimizar el proceso de fundición, sino también contribuir a la sustitución de materiales nocivos. El proceso experimental comenzó con la elaboración de probetas en condiciones controladas y variando la cantidad de ferro-silicio, así como la orientación de las probetas. Los parámetros de operación determinados en el proceso experimental se utilizaron como punto de referencia para validar y ajustar la simulación realizada con el software Altair Inspire Cast. Los resultados de la simulación manifestaron que las probetas en posición vertical mostraron un rendimiento óptimo en comparación con las probetas en posición horizontal. Esto se debió a la configuración del sistema de alimentación utilizado en la fundición. Para ello, se evaluaron parámetros como la temperatura, la velocidad del metal líquido, el tiempo de llenado y la presencia de aire atrapado, entre otros. Además, se realizó un análisis de caracterización de las muestras fundidas en posición vertical, considerando el contenido de ferro-silicio en su composición, a través de ensayos de dureza, microdureza, metalografía y microscopía electrónica de barrido (SEM). A partir de los análisis cualitativos y cuantitativos de estos ensayos, se concluyó que la dureza del material está directamente relacionada con la cantidad de silicio en la composición y el porcentaje de la fase β' .

Palabras clave: Fundición por gravedad, simulación, Altair Inspire Cast, C38500, ferro-silicio, silicio, colado posición vertical, dureza.

ABSTRACT

Casting is a fundamental process in the manufacturing industry due to its capability to produce a wide variety of components through various procedures. In this study, the feasibility of using specialized software to simulate gravity casting in sand molds for the production of Cu-Zn alloys with the addition of ferro-silicon in different proportions (0.5 %, 1 %, 1.5 %, and 2 % by weight) was evaluated. Furthermore, the orientation of the test samples (horizontal and vertical) was varied to prevent and mitigate potential defects in the process, comparing the experimental results with those obtained through computer simulation using Altair Inspire Cast software. The inclusion of ferro-silicon in the composition was motivated by the need to find an alternative to lead in alloys (C38500) used in plumbing products, due to the health and environmental risks associated with lead. Therefore, the research aims not only to optimize the casting process but also to contribute to the replacement of harmful materials. The experimental process began with the preparation of specimens under controlled conditions, varying the amount of ferro-silicon, as well as the orientation of the specimens. The operating parameters determined in the experimental process were used as a reference point to validate and adjust the simulation performed with Altair Inspire Cast software. The simulation results indicated that the vertically positioned specimens exhibited optimal performance compared to horizontally positioned specimens. This was attributed to the configuration of the feeding system used in the casting. To achieve this, parameters such as temperature, liquid metal velocity, filling time, and the presence of trapped air, among others, were evaluated. Additionally, a characterization analysis of the vertically cast samples was conducted, considering the ferro-silicon content in their composition, through hardness tests, microhardness, metallography, and scanning electron microscopy (SEM). Based on the qualitative and quantitative analysis of these tests, it was concluded that the material's hardness is directly related to the amount of silicon in the composition and the percentage of the β' phase.

Keywords: Gravity casting, simulation, Altair Inspire Cast, C38500, ferro-silicon, silicon, vertical casting, hardness.

INTRODUCCIÓN

La fundición es uno de los procesos de conformado más antiguos, según evidencia histórica, se utilizó por primera vez hace aproximadamente 4000 a.C para la elaboración de puntas de cobre, ornamentos, entre otros [1]. En la actualidad, se continúa utilizando para la producción de una serie de elementos mediante el uso de metal en estado líquido, el cual fluye a través de un sistema de alimentación localizado en el interior de un molde por gravedad u otra fuerza externa, donde se enfría y solidifica, adoptando la forma de la cavidad deseada [2].

Este proceso presenta un alto grado de complejidad debido al número de variables involucradas, a pesar de la continua investigación para lograr una mayor eficiencia. Estas configuraciones determinan el éxito o el fracaso de la calidad de los elementos manufacturados. Debido a la presión provocada por la competencia global y la demanda de disminuir los costos y el tiempo, las fundiciones se han visto obligadas a producir de forma más eficiente con un mayor valor agregado [3].

Las técnicas de prueba y error han sido los factores fundamentales para obtener piezas sin defectos, ni desperdicios de material. Sin embargo, la tecnología actual ayuda a los ingenieros que trabajan en esta área a obtener una comprensión técnica del proceso a fin de prevenir fallas, optimizar el material y mantener el proceso dentro de los costos de producción razonables [4].

La mecanización y automatización del proceso de fundición han conducido a cambios en el uso de equipos y mano de obra. Los equipos y los sistemas de control de los procesos automatizados han reemplazado los métodos de fundición tradicionales [5]. En virtud de la cantidad de material requerido, el número de piezas procesadas en la producción a gran escala, la complejidad de su configuración geométrica es de vital importancia entender y controlar el proceso. Debido al alto coste económico y al tiempo necesario para producir una pieza, las técnicas de prueba y error ya no se utilizan en la producción de elementos más complejos, sino que se sustituyen por la implementación de simulaciones por computadora [6]. Este cambio tiene como objetivo crear elementos de alta calidad en un menor tiempo basándose en el análisis de las variables de operación en las diferentes etapas del proceso [7].

La simulación por computadora del proceso de fundición por gravedad permite predecir el avance del metal durante el llenado y la solidificación, la predicción cuantitativa de las propiedades mecánicas, esfuerzos térmicos, la estimación de la contracción y la porosidad

en las piezas. Los resultados obtenidos de la simulación tienen una alta precisión, ya que corresponden con los que se obtendrían en una planta de fundición real [5, 8].

Debido a sus diversas propiedades mecánicas, físicas y químicas, en el proceso de fundición se puede obtener una amplia variedad de metales y aleaciones, puesto que son los materiales más utilizados en la ingeniería [1].

La utilización de plomo en las aleaciones mejora la maquinabilidad y la colabilidad en las aleaciones de cobre. Por ello es importante definir los parámetros de operación más adecuados para realizar de forma óptima la sustitución y así minimizar los defectos en el producto final al ser sustituido por silicio en la aleación [9].

El latón (Cu – Zn) es una de las aleaciones más utilizadas en la industria de fontanería para la fabricación de accesorios y tuberías que están en contacto directo con el agua potable [10 - 12]. Las aleaciones que contienen Cu – Zn – Pb suelen contener hasta un 3 % de plomo en su composición debido a las propiedades mecánicas que proporciona al material al momento de su mecanizado [13]. No obstante, investigaciones han revelado casos de una elevada concentración de plomo en la sangre debido al desprendimiento del material por corrosión, causando daños al cerebro y sistema nervioso, así como el deterioro de la función de múltiples órganos y tejidos [14 - 19].

Las aleaciones cuya composición química no contiene plomo se denominan aleaciones libres de plomo [20]. Una de las alternativas viables para producir aleaciones de Cu – Zn libre de plomo es la sustitución de plomo por ferro-silicio (Cu – Zn – FeSi) [21]. El silicio y hierro son materiales que otorgan similares características al plomo en el latón, mejorando las propiedades mecánicas y una mayor resistencia a la corrosión por descincificación [22, 23 - 26].

La propuesta de este trabajo de titulación es realizar un modelo de simulación numérico, validado experimentalmente para el proceso de fundición por gravedad, utilizando moldes de arena para el colado de la aleación Cu – Zn – FeSi libre de plomo en función de la posición de las probetas (vertical y horizontal), con el objetivo de evaluar el comportamiento del flujo de calor durante la solidificación, la microestructura y el comportamiento mecánico, utilizando como criterio de análisis, la normativa para el uso de plomo en las aleaciones Cu – Zn en el Ecuador.

Pregunta de Investigación

¿La simulación por computadora del proceso de fundición por gravedad de la aleación Cu – Zn libre de plomo con diferentes porcentajes de ferro-silicio en su composición química mediante el software Altair Inspire Cast permite la mejora y optimización del proceso para obtener elementos de alta calidad?

Objetivo general

Obtener una aleación Cu – Zn libre de plomo mediante simulación y validarla experimentalmente

Objetivos específicos

- Simular el proceso de fundición por gravedad con molde de arena para obtener una aleación Cu – Zn – Si para el colado de probetas.
- Validar los resultados de la simulación mediante la obtención experimental de la aleación
- Definir los parámetros de operación más adecuados en el proceso de fundición de la aleación para obtener piezas con el menor número de defectos.
- Determinar las propiedades mecánicas y microestructurales de la aleación a partir de un análisis termodinámico.

Alcance del proyecto

Simular el proceso de fundición por gravedad en un molde de arena para obtener una aleación Cu – Zn libre de plomo con el software Altair Inspire Cast. Para ello, la fundición de la aleación Cu – Zn – FeSi se realiza variando el porcentaje de ferro-silicio (0.5 %, 1 %, 1.5 % y 2 % en peso) y la posición de las probetas durante el colado (vertical y horizontal) para obtener los parámetros experimentales de cada etapa del proceso y utilizarlos en la simulación por computadora. A continuación, se analiza la microestructura de las fases presentes mediante ensayos de caracterización y se compara con los resultados de la simulación basada en el análisis de las fluctuaciones de temperatura que se producen durante el proceso de solidificación del metal y el llenado de las cavidades con metal líquido. Posteriormente, validar los resultados de las simulaciones a partir de la información recopilada de manera experimental. Finalmente, los defectos identificados en la fundición se utilizan como criterio de análisis para evaluar el comportamiento del flujo de calor, la microestructura y el comportamiento mecánico durante la solidificación y obtener los parámetros más eficientes para optimizar el proceso para producir piezas de alta calidad en un menor tiempo.

Justificación

La fundición es una técnica ancestral que ha evolucionado junto con los avances tecnológicos. Este proceso implica darle al metal en estado líquido la forma deseada vertiéndolo en un molde, donde posteriormente se solidifica adoptando la forma del modelo replicado en el interior. Se empezó a utilizar las simulaciones por computadora, para explorar y analizar más a fondo este proceso, revelando las complejas interacciones que tienen lugar dentro del molde y el metal líquido.

Actualmente, existen tendencias de desarrollo tecnológico en el campo de la fundición, como es el uso de diferentes tipos de moldes (desechables, permanentes y compuestos). Estas mejoras tienen como objetivo lograr piezas de alta calidad con tolerancias dimensionales reducidas mediante una optimización del proceso [27 - 28].

La simulación por computadora del proceso de fundición para mejorar el rendimiento y la calidad de la fundición durante el proceso de desarrollo y diseño de productos, se considera una herramienta útil para la industria manufacturera [29]. Uno de los aspectos más destacado de la simulación del proceso de fundición es su capacidad para evaluar y ajustar con precisión los parámetros de cada una de las etapas que lo conforman. Estos incluyen factores críticos como la temperatura de fundición, la tasa de llenado del molde, la geometría del canal de alimentación, la distribución de temperatura y otros factores inherentes al proceso de fundición. Al analizar virtualmente estos aspectos, se pueden ajustar y optimizar el proceso de fundición para garantizar un flujo de material constante, reducir las tensiones internas y minimizar los defectos [30].

La implementación de la ingeniería asistida por computadora se ha convertido en una herramienta útil para evitar y predecir defectos en elementos producidos mediante el proceso de fundición [31]. El desarrollo de tecnologías de simulación y diseño posibilita reducir el proceso de prueba y error en la elaboración de piezas fundidas, permitiendo a las empresas invertir menos tiempo en el proceso de diseño y ahorrar dinero al disminuir el costo de fabricación de moldes y piezas desechadas.

La simulación por computadora de la solidificación en el proceso de fundición ha evolucionado hasta el punto de ser útil en aplicaciones industriales, ya que permite la predicción, análisis y cuantificación de los defectos más comunes en las diferentes fases del proceso [5]. Parámetros clave como la velocidad de vertido, la temperatura del metal y la orientación del molde se pueden optimizar mediante el diseño de procesos de fundición basado en simulación, lo que permite la detección de problemas potenciales de manera temprana. Estas mejoras pueden reducir los costos, el tiempo de producción y la calidad

del producto. Esto hace que el ciclo de desarrollo sea más eficiente, reduce los desperdicios y minimiza los riesgos asociados con la producción en serie.

De acuerdo con lo establecido en la sección correspondiente de la Norma Técnica Ecuatoriana (NTE - INEN 3123) referentes a las especificaciones de componentes de grifería, el contenido máximo permitido de plomo en aleaciones de Cu – Zn es actualmente del 3 % y el contenido mínimo de cobre es del 57 % [13]. Sin embargo, organismos internacionales de salud han emitido nuevas regulaciones que restringen por completo el uso de este elemento, independientemente de su aplicación. Estudios han demostrado que producto de la corrosión por descincificación se han encontrado partículas de plomo en el agua potable, lo que ha provocado un aumento de los incidentes de intoxicación en niños y adultos [32 - 33].

En este contexto, se busca activamente un sustituto del plomo en las aleaciones con base de cobre (Cu). El objetivo de esta investigación es reducir los riesgos para la salud humana asociados al uso de plomo en procesos de fundición. El propósito principal es encontrar un sustituto que no solo conserve las propiedades beneficiosas del plomo para estas aleaciones, sino que también sea económico para la producción a largo plazo [34].

Una de las alternativas que se están estudiando es agregar silicio a la aleación en una proporción del 0,25 % al 5,5 %. Sin embargo, es importante señalar que investigaciones anteriores han demostrado resultados significativos en un rango más limitado, específicamente entre el 0,25 % y el 2 %. En este rango, las propiedades de la aleación mejoraron notablemente [22].

La incorporación de silicio en aleaciones de Cu – Zn es particularmente destacable, ya que mejora la fluidez del material durante el proceso de fundición. Esta característica es crucial en la producción de piezas y componentes porque una mejor fluidez facilita el llenado de moldes y reduce la incidencia de defectos. Es importante señalar que esta ventaja conlleva un valor agregado en términos de costos de producción [35 - 36].

El aumento de los costos de producción se debe principalmente al contenido de silicio en la aleación, provocando desgaste de las herramientas utilizadas durante el proceso de mecanizado [37 - 38]. Aunque el silicio mejora la fluidez del material, es abrasivo, lo que aumenta el desgaste de las herramientas de corte y conformado [39 - 40]. Este desgaste aumenta los costos de producción porque las herramientas necesitan mantenimiento y reemplazo con más frecuencia [41].

1. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se revisan los conceptos, fases y principales defectos involucrados en el proceso de fundición por gravedad utilizando moldes de arena con resina. Los aspectos generales de la simulación por computadora utilizando el software Altair Inspire Cast. Finalmente, se describen las características, propiedades y aplicaciones de las aleaciones Cu – Zn – Pb y Cu – Zn libres de plomo, adicionando ferro-silicio en su composición química.

1.1. Generalidades

1.1.1. Proceso de fundición

El proceso de fundición se remonta hace seis mil años aproximadamente y utiliza metal para fundir cobre en moldes de piedra [1]. Este proceso de conformado ha sido utilizado en el transcurso de la historia del ser humano para producir objetos metálicos. El ser humano ha utilizado la fundición para convertir minerales en objetos útiles y decorativos desde hace mucho tiempo.

En la fundición, un material sólido es convertido a estado líquido mediante una fuente que genera energía térmica, de modo que toma su forma final luego de solidificarse a través de un molde [42]. Los elementos obtenidos de este proceso también se conocen como fundición [2].

El acabado superficial requerido y la precisión de las dimensiones se controlan mediante la selección del proceso. Permitir formas complejas a la hora de elaborar modelos permite combinar piezas, minimizando o eliminando el ensamblaje posterior, reduciendo hasta en un 50 % los costos respecto a las piezas obtenidas mediante procesos de mecanizado. En la actualidad, los componentes obtenidos mediante procesos de fundición se emplean en diversas aplicaciones en diferentes sectores industriales. La industria de producción de equipos pesados (agricultura, construcción, minería, entre otros) y de transporte representan aproximadamente el 50 % de las fundiciones [43].

El proceso más común es la fundición en arena porque ofrece ventajas y versatilidad como: empleo de casi cualquier tipo de metal y no metal, tamaño variable, sin límite de forma o peso, bajo costo en comparación con otro tipo de procesos. Las desventajas incluyen: acabado superficial irregular, tolerancias amplias y, por lo general, requiere un procesamiento posterior [44]. La Figura 1.1 muestra la secuencia de pasos a seguir para obtener una pieza mediante el proceso de fundición por gravedad utilizando un molde de arena (sílice).

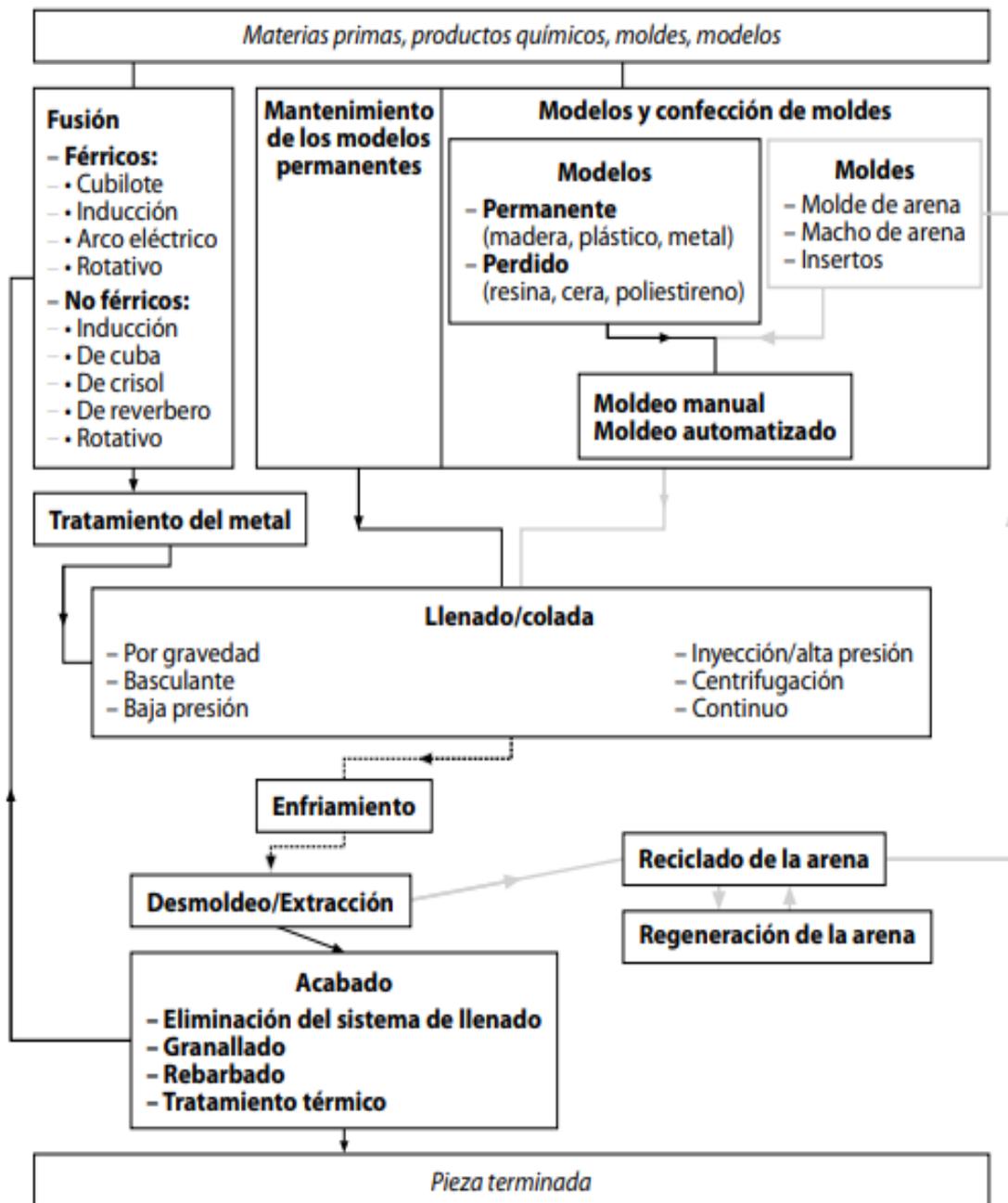


Figura 1.1 Descripción de los pasos de producción en una operación de fundición.
(Fuente: [45])

En la fundición en arena y otros procesos de moldes desechables, la forma interna del molde se crea utilizando objetos hechos de madera, metal, plástico u otros materiales que adopten la morfología del elemento que se va a fundir. Esta forma de la pieza a replicar se conoce como modelo [45]. Para dejar un espacio vacío con la forma exacta de la pieza a fundir, este modelo se cubre por igual con arena en ambas mitades de un molde. Para tener en cuenta la contracción del metal a medida que se solidifica y se enfría, el modelo suele ser ligeramente más grande que la pieza final, dependiendo del material utilizado. La

arena utilizada en el molde está húmeda y contiene un aglomerante que ayuda a mantener la forma durante el proceso, el cual se destruye al extraer la pieza fundida [46]. La Figura 1.2 muestra gráficamente los pasos necesarios para realizar el proceso de fundición por gravedad utilizando un molde de arena.

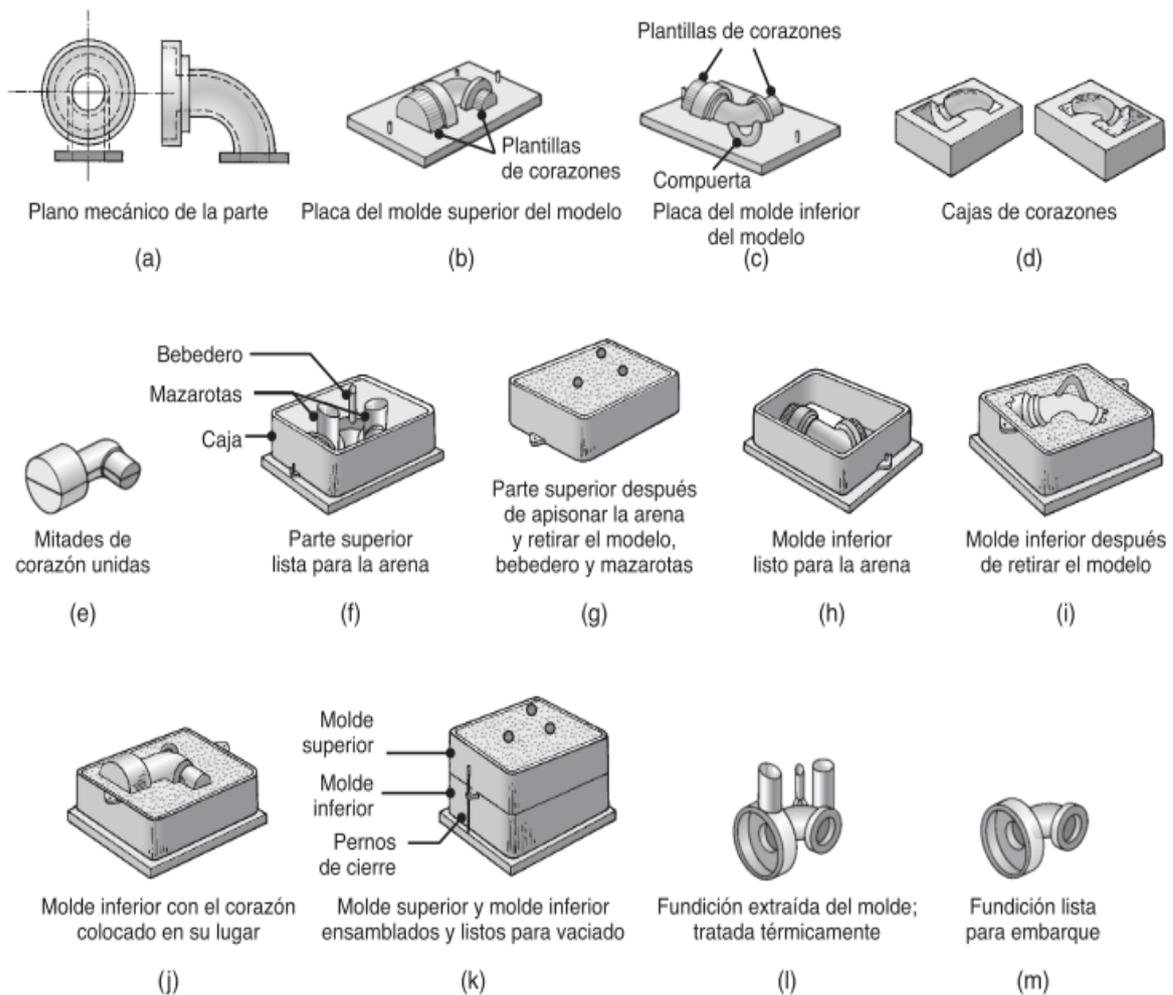


Figura 1.2 Descripción del proceso esquemático para llevar a cabo la fundición en arena. (Fuente:[1])

El método más común para llenar moldes es mediante gravedad [47]. El metal líquido se vierte en el molde a través de un canal en la parte superior. Este canal está conectado a un canal cónico denominado como "bebedero". La compuerta dirige el material al interior del molde donde se forma la pieza deseada o hacia el sistema de canales que alimenta el molde (Figura 1.3) [48 - 49].

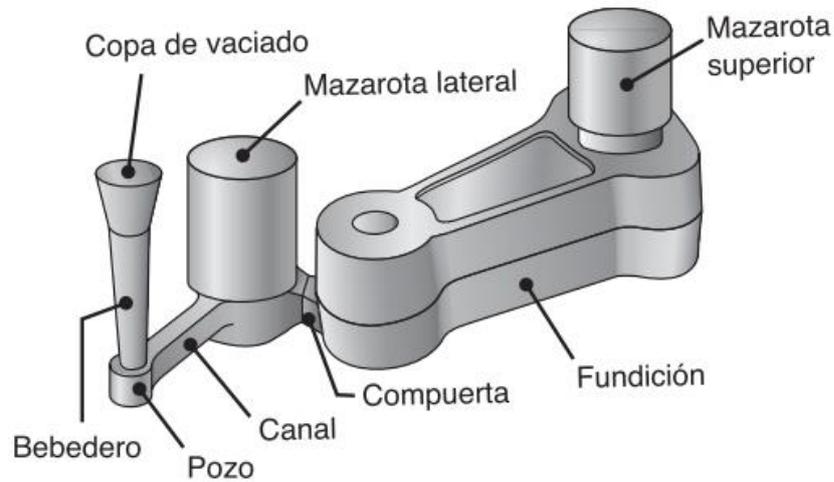


Figura 1.3 Representación gráfica de una fundición con sus elementos más característicos. (Fuente: [1])

Los componentes principales del sistema de alimentación en el proceso de fundición en arena se pueden ver en la Figura 1.4 [50]. Además, se presenta una línea que separa la fundición en dos partes, indicando que la caja se compone de dos segmentos. Esto indica que se debe usar un molde en la parte superior y otro en la parte inferior. La ubicación de ambos moldes dentro de una caja aumenta la seguridad del procedimiento [46].

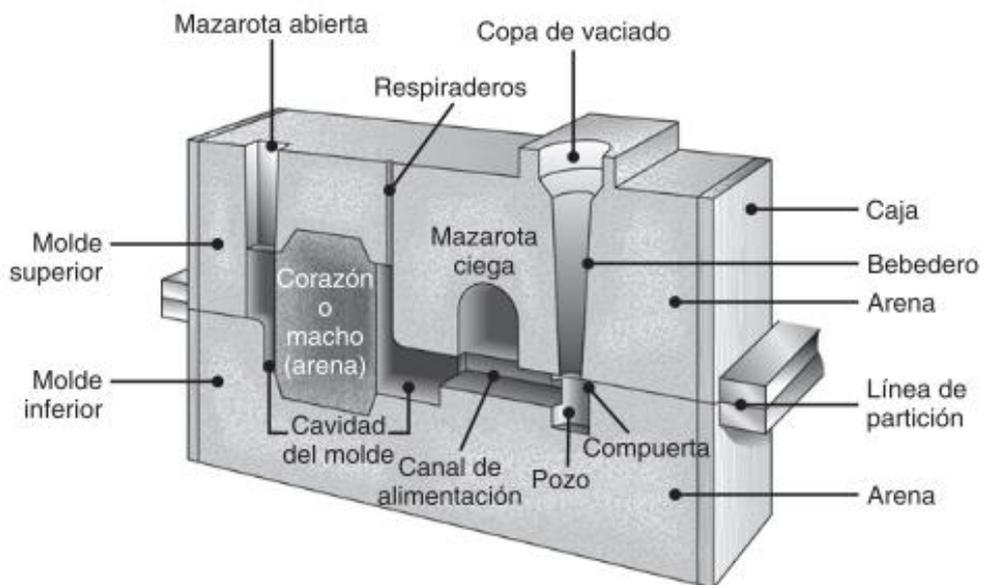


Figura 1.4 Diagrama de un molde elaborado con arena que exhibe diversas particularidades. (Fuente:[46])

A la hora de diseñar sistemas de alimentación se deben tomar en consideración los siguientes conceptos: el teorema de Bernoulli y la ley de la conservación de la masa [1].

Teorema de Bernoulli. Este teorema se deriva de la ley de conservación de la energía y relaciona la fuerza ejercida por un fluido con su velocidad, altura y pérdidas causadas por la resistencia del flujo en un sistema lleno de líquido (Ecuación 1 y 2) [1].

$$h + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} = \text{constante} \quad 1$$

$$h_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = h_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + f \quad 2$$

Continuidad de masa. La ley de conservación de la masa establece que para líquidos que no están comprimidos y se encuentran en un sistema con barreras impermeables, la velocidad del flujo permanece uniforme (Ecuación 3) [1].

$$Q = A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad 3$$

I. Consideraciones generales de diseño

En el campo del diseño de procesos de fundición se pueden distinguir los tipos de dificultades que es necesario tener en cuenta: las relacionadas con las características geométricas, tolerancias del objeto que se debe incorporar y los aspectos que se deben tener en cuenta en la preparación del molde para obtener la fundición deseada [1 - 2].

- **Esquinas, ángulos y espesores de sección:** Se deben evitar en la medida de lo posible las esquinas, ángulos y curvas pronunciadas, ya que tienden a concentrar tensiones y pueden provocar que el metal se fracture o agriete durante el proceso de solidificación.
- **Áreas planas:** Se recomienda evitar zonas extensas de superficies planas o lisas, porque estas áreas podrían experimentar deformaciones durante el enfriamiento debido a fluctuaciones de temperatura o causar problemas de calidad del acabado superficial debido a la distribución desigual del metal durante el proceso de vertido.
- **Contracción:** Para evitar que se formen grietas en la pieza fundida a medida que se enfría, es importante tener en cuenta la contracción que se produce durante la solidificación.
- **Ángulo de salida:** En la mayoría de los casos, los patrones utilizados para crear moldes de arena incluyen una pequeña inclinación conocida como conicidad. Esto hace más sencillo extraer el modelo sin dañar el molde.
- **Tolerancias dimensionales:** Varían en función del procedimiento de fundición, el tamaño y el tipo de modelo utilizado.

- **Letreros y marcas:** Es usual incluir algún tipo de distintivo o marca en las piezas que se funden, como por ejemplo letras o logotipos de identificación.
- **Operaciones de acabado:** En la planificación del diseño de una fundición, es necesario tener en cuenta las etapas posteriores de mecanizado y de terminación.

II. Propiedades del proceso de fundición

Las propiedades del proceso de fundición son aquellas que se presentan durante el llenado del molde, la cristalización y la solidificación [51]. Las principales propiedades son: contracción (lineal y volumétrica), fluidez, tensión superficial, segregación y viscosidad.

- **Fluidez:** Capacidad del metal líquido para ocupar todas las cavidades del molde. Esta propiedad comprende dos aspectos principales: las propiedades del metal en estado líquido y las variables controladas durante el proceso de fundición [50]. La capacidad del metal para fluir suavemente garantiza la producción de piezas fundidas sólidas de excelente calidad.
- **Viscosidad:** Es una propiedad intrínseca de los fluidos que cuantifica la resistencia interna al flujo laminar y está relacionada con la fricción entre capas adyacentes de un fluido en movimiento [50]. La temperatura, la presencia de impurezas y la composición tienen un impacto en la viscosidad del metal líquido. Si el metal fundido tiene una viscosidad alta, puede causar problemas con la calidad del producto final porque tiende a no llenar completamente las cavidades del molde, lo que provoca imperfecciones en la forma y estructura de la pieza.
- **Tensión superficial:** Es una propiedad física de los fluidos que se basa en fuerzas intermoleculares dentro del entorno del líquido. Durante el proceso de fundición, la tensión superficial afecta la forma en que el metal fluye y se distribuye en el molde, así como su capacidad para llenar la cavidad del molde y los canales de alimentación de manera uniforme [52].
- **Contracción:** A medida que el metal cambia de un estado líquido a sólido, el tamaño de la pieza disminuye. Durante la transición los átomos se reorganizan y se empaquetan en la estructura metálica, lo que resulta en una reducción de volumen. El grado de contracción depende del metal seleccionado, la composición de la aleación y el entorno de enfriamiento [50]. El proceso de enfriamiento y solidificación de la Figura 1.5 provoca el cambio de volumen específico en las aleaciones, mientras que en los metales puros la transición de líquido a sólido genera la mayor diferencia.

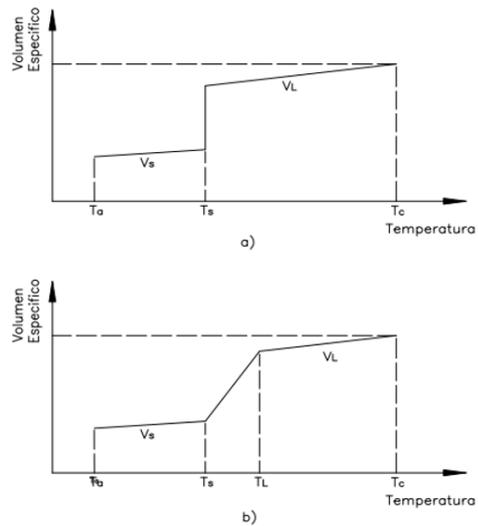


Figura 1.5 Cambios en el tamaño en función de la variación de temperatura. a) Material metálico en su estado puro, b) Mezcla de componentes metálicos (aleación).
(Fuente: [53])

Donde, T_a representa la temperatura ambiente, T_s la temperatura a la que comienza la solidificación (Sólidos), T_L la temperatura a la que finaliza la solidificación (Líquidos), y T_C la temperatura de colado del metal líquido. Para contrarrestar el efecto de contracción durante la solidificación, es importante implementar un sistema de alimentación adicional, denominado mazarota. La mazarota debe diseñarse de modo que su proceso de solidificación se produzca después de que se haya solidificado la pieza principal [53]. La Tabla 1.1 muestra el grado de contracción que experimentan varios metales durante el proceso de solidificación, mientras que otros metales se expanden.

Tabla 1.1 Contracción o dilatación volumétrica por solidificación.

Contracción (%)		Dilatación (%)	
Aluminio	7,1	Bismuto	3,3
Cinc	6,5	Silicio	2,9
Al - 4,5 % de Cu	6,3	Hierro gris	2,5
Oro	5,5		
Hierro blanco	4-5,5		
Cobre	4,9		
Bronce (70-30)	4,5		
Magnesio	4,2		
90 % de Cu - 10 % de Al	4		
Aceros al carbono	2,5-4		
Al - 12 % de Si	3,8		
Plomo	3,2		

(Fuente: [1])

- **Segregación:** se refiere a la distribución desigual de elementos químicos en la aleación, lo que resulta en cambios en diferentes regiones de la composición. Esto se debe a diferencias en la solubilidad de elementos líquidos y sólidos, así como a cambios en sus velocidades de enfriamiento durante la solidificación. La segregación puede afectar las propiedades mecánicas y la calidad final de la pieza fundida, ya que ciertas áreas pueden tener una composición química diferente a la esperada [54].

III. Defectos

La generación de defectos en las piezas obtenidas a partir del proceso de fundición es uno de los puntos clave de análisis para obtener componentes de alta calidad. El control de los parámetros de operación y de los factores que intervienen en cada etapa del proceso es fundamental para comprender las posibles causas de su formación [55].

Dependiendo de aspectos como los materiales utilizados, el diseño de la pieza y las técnicas de producción, se pueden producir diversos defectos durante el proceso de fabricación. Si bien algunos de estos defectos solo afectan la apariencia de la superficie de una pieza final, otros pueden tener un impacto significativo en su resistencia y estructura general [56].

Los defectos en una pieza fundida pueden no afectar la funcionalidad o la durabilidad de la pieza, pero pueden hacer que no sea estéticamente agradable o aumentar el costo de mecanizado. Muchos de estos defectos se pueden corregir fácilmente mediante procedimientos de granallado o rectificado. Sin embargo, hay otros defectos que pueden ser más difíciles de eliminar, pero que pueden ser aceptables en algunos casos. El diseñador de piezas fundidas debe entender estas diferencias y crear especificaciones que se adapten a la aplicación real [7].

Debido a que históricamente se han utilizado diferentes términos para describir el mismo tipo de defecto, el International Committee of Foundry Technical Associations ha desarrollado una terminología estandarizada que consta de siete categorías básicas de defectos de fundición, indicados con letras mayúsculas en negrita [57].

- **A: Proyecciones metálicas:** Engloban aletas, rebabas y otros salientes indeseados, como formaciones de ampollas y superficies rugosas.
- **B: Cavidades:** Comprende la presencia de hendiduras, ya sean internas o visibles, de forma redondeada o rugosa, incluyendo porosidades, puntas afiladas y cavidades por contracción.

- C: Discontinuidades:** Grietas, fisuras por altas y bajas temperaturas, denominados frentes fríos. Si permitimos que el metal no se contraiga de forma natural durante el proceso de solidificación, existe la posibilidad de que se produzcan grietas y fisuras. En la formación de estas grietas intervienen varios factores, como el tamaño de los granos y la presencia de segregaciones de elementos de bajo punto de fusión en los límites entre los granos (intergranulares). Por otro lado, los frentes fríos indican un área en la fundición donde no se ha producido una fusión completa debido a la interacción de dos corrientes de metal líquido provenientes de diferentes entradas. La Figura 1.6 muestra un ejemplo de diferentes tipos de discontinuidades en piezas que surgen del proceso de fundición.

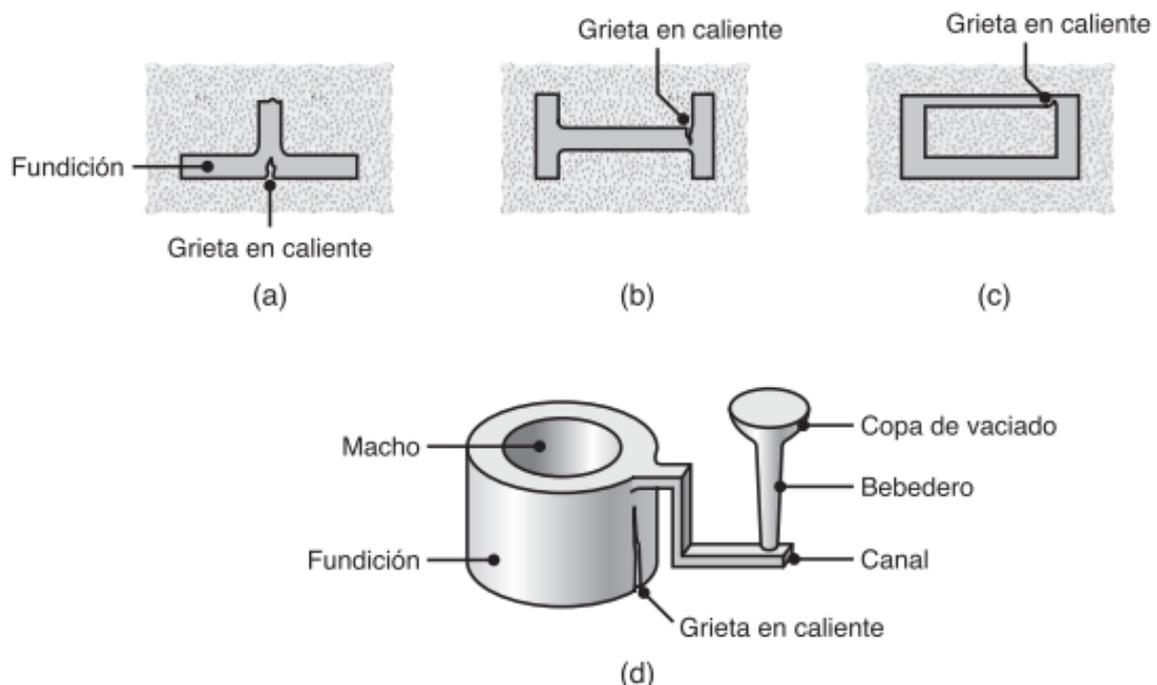


Figura 1.6 Casos ilustrativos de fisuras o fracturas producidas en las piezas fundidas.
(Fuente:[1])

- D: Superficie defectuosa:** Pliegues, solapamientos, marcas superficiales, adherencia de capas de arena y escamas de óxido. La Figura 1.7 muestran varios tipos de defectos que se pueden presentar en la superficie de las piezas.

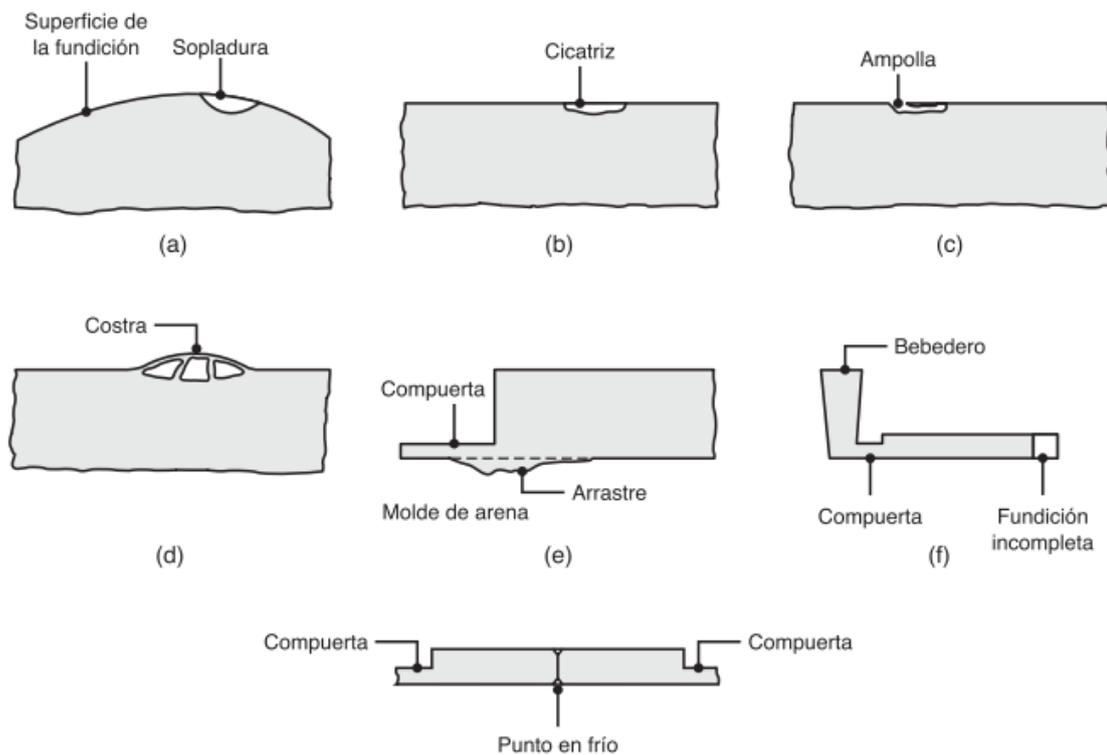


Figura 1.7 Ejemplificaciones de imperfecciones habituales en las piezas fundidas. Estos fallos pueden ser reducidos o eliminados a través de una planificación de diseño apropiado, la adecuada preparación de los moldes y la supervisión de los procesos de vertido.

(Fuente:[1])

- **E: Fundición incompleta:** Solidificación prematura, metal fundido insuficiente y pérdida de metal del molde después de su vertido. Estos defectos también pueden ser causados por temperaturas demasiado bajas o por verter el metal fundido muy lento.
- **F: Dimensiones o formas incorrectas:** Surge por diversas causas como: Por ejemplo, tolerancia inadecuada a la contracción, errores de ensamblaje del modelo, contracción irregular, deterioro del modelo o deformación de la fundición.
- **G: Inclusiones:** Se pueden formar durante la fusión cuando el metal reacciona con el entorno, como con el oxígeno, el crisol o el material del molde. Pueden surgir de reacciones químicas entre los componentes del metal fundido o de escoria y otros elementos extraños atrapados en el metal. Se consideran nocivos porque multiplican los esfuerzos, reduciendo la resistencia de la fundición.

1.1.2. Solidificación

Una vez que el metal en estado líquido se introduce en el molde, este comienza a solidificarse y enfriarse hasta alcanzar la temperatura ambiente. El tamaño, la forma, la uniformidad y las propiedades químicas de los cristales que se forman en la fundición se

ven afectados por una serie de eventos que ocurren durante este proceso. La configuración del molde, la relación entre volumen. La superficie expuesta, las propiedades térmicas del metal y del molde son factores que influyen en estos casos [58].

La solidificación es un proceso que se produce cuando las fases sólida y líquida coexisten simultáneamente, generalmente a una presión constante, como la presión atmosférica. Este fenómeno surge de la nucleación y crecimiento de un sólido en un medio líquido. La representación gráfica, en la Figura 1.8, muestra la variación de la energía libre en función de la temperatura para ambas fases: sólida y líquida [59].

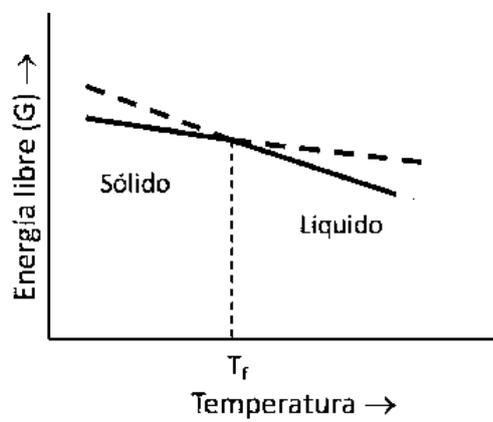


Figura 1.8 Ilustración gráfica que muestra la variación de la energía libre (G) en función de la temperatura para la fase sólida (S) y líquida (L).
(Fuente: [59])

La fase líquida (L) es más estable que la fase sólida (S) cuando la temperatura está por encima de la temperatura de fusión (T_f). Por otro lado, la fase sólida (S) es más estable en comparación con la fase líquida (L) cuando la temperatura desciende por debajo de la temperatura de fusión. La temperatura de fusión es el punto en el que las energías libres de las fases sólida y líquida son iguales ($G_S = G_L$). Como resultado, la intersección de las dos curvas indica la temperatura de fusión que ocurre durante el proceso de solidificación [60].

La temperatura de solidificación se alcanza en la sustancia líquida durante la fase de enfriamiento y la transición a la fase sólida no se produce automáticamente. Para lograr esto, el líquido debe someterse a un proceso de enfriamiento adicional conocido como subenfriamiento o sobre enfriamiento, como se muestra en la Figura 1.9. El proceso de nucleación del sólido comienza a esta temperatura, que está por debajo de la temperatura de solidificación [61]. El cambio de fase libera una cantidad de calor latente durante este proceso, lo que hace que la temperatura del sistema aumente hasta alcanzar la

temperatura de solidificación (T_f). Una vez completada la solidificación, no se produce intercambio de calor latente y la temperatura del sólido disminuye gradualmente [62].

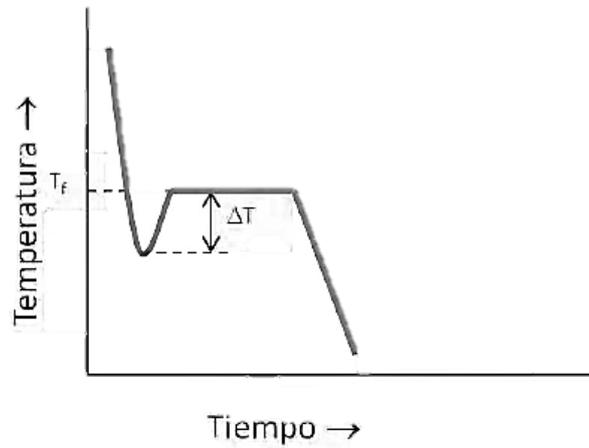


Figura 1.9 Representación que muestra la relación entre la temperatura y el tiempo en el análisis térmico de un metal puro que exhibe un fenómeno denominado subenfriamiento (ΔT) que precede a la formación inicial de la fase sólida, conocida como nucleación.
(Fuente: [59])

En las primeras etapas de solidificación, comienza a formarse una fina capa sólida en la superficie de las paredes del molde que se vuelve cada vez más gruesa con el tiempo [1]. La Figura 1.10 muestra una representación gráfica del fenómeno de solidificación en función de la temperatura y la distancia, teniendo en cuenta los factores que afectan a este proceso.

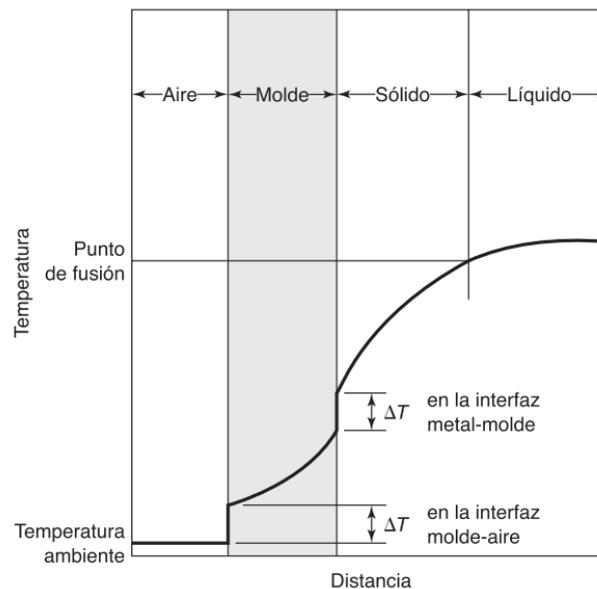


Figura 1.10 Patrón térmico en la región donde la pared del molde y el metal líquido se encuentran, mientras ocurre el proceso de solidificación de los metales durante el proceso de fundición.
(Fuente:[1])

I. Metales puros

El punto en el cual un metal puro cambia de estado (fusión o solidificación) está bien establecido. Durante el proceso de solidificación, este cambio ocurre a una temperatura constante para liberar la energía térmica almacenada, conocida como calor latente de fusión [1], tal como se ilustra en la Figura 1.11.

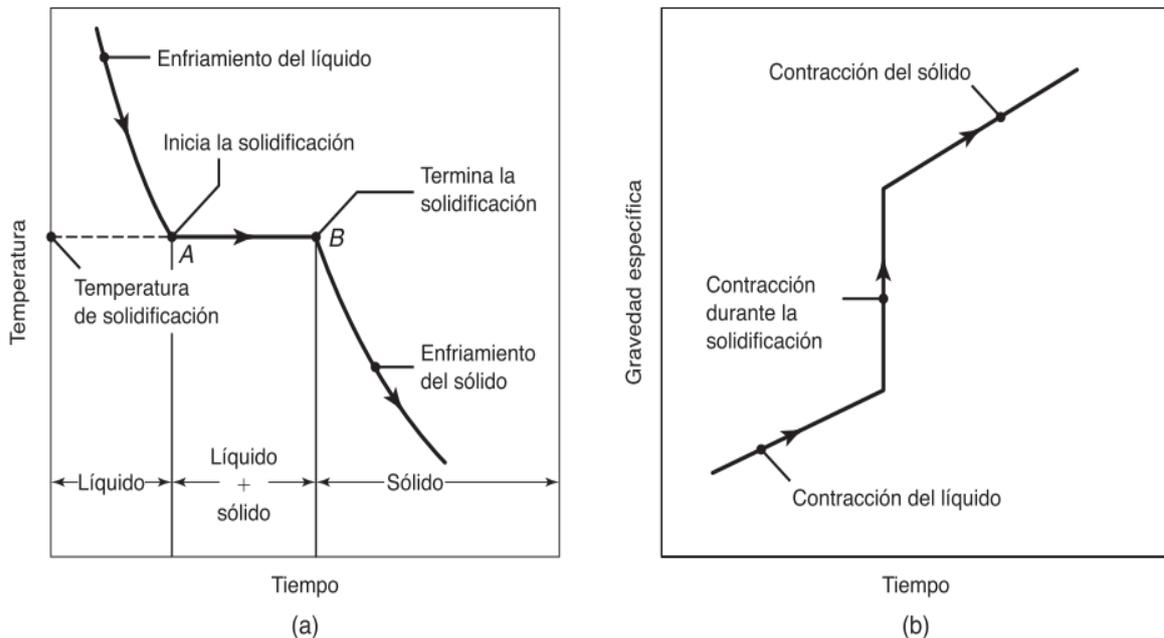


Figura 1.11 (a) Representación gráfica que muestra cómo varía la temperatura a lo largo del tiempo durante el proceso de solidificación de metales puros (Es importante notar que la solidificación se lleva a cabo a una temperatura constante). (b) Gráfico que ilustra cómo cambia la densidad a medida que avanza el tiempo.

(Fuente:[1])

II. Aleaciones

El procedimiento de solidificación en aleaciones es distinto al de los metales puros. En la Figura 1.12, se muestra que el procedimiento empieza en el momento en que la temperatura baja por debajo del punto de solidificación (T_L) y acaba en el momento en que llega al punto de solidificación (T_S). Dentro de este rango de temperatura, la aleación se encuentra en una fase intermedia y adopta una textura pastosa, formando estructuras en forma de columnas llamadas dendritas columnares [1].

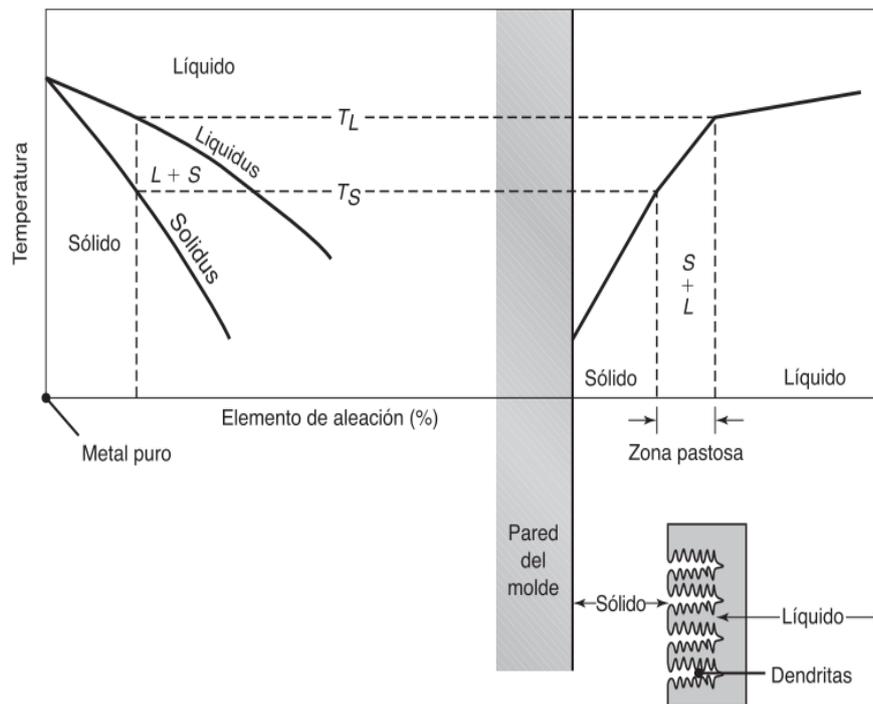


Figura 1.12 Representación gráfica del proceso de solidificación en una aleación y la disposición de la temperatura en el metal que está experimentando solidificación.
(Fuente: [1])

III. Dendritas

El proceso de solidificación en la fundición de metales es una etapa crítica que influye en las propiedades finales de los materiales. En concreto, tres propiedades de los metales fundidos: la segregación de elementos aleantes, la microestructura (tamaño de grano y las fases presentes) y la resistencia, que se refleja en la porosidad en el material [62 - 63].

Uno de los fenómenos que se produce durante la solidificación de las aleaciones es la formación de estructuras dendríticas. Este tipo de estructura es predominante en la mayoría de las aleaciones durante su proceso de enfriamiento y solidificación. Las estructuras dendríticas están ramificadas y recuerdan a la forma de un árbol [2]. Surgen cuando el material cambia de estado líquido a sólido durante el proceso de enfriamiento.

Para comprender los efectos de la solidificación de un elemento elaborado por el proceso de fundición, es fundamental entender su estructura interna. La Figura 1.13 muestra la disposición de la estructura que presenta un lingote formado durante la fundición con tres zonas diferenciadas [62].

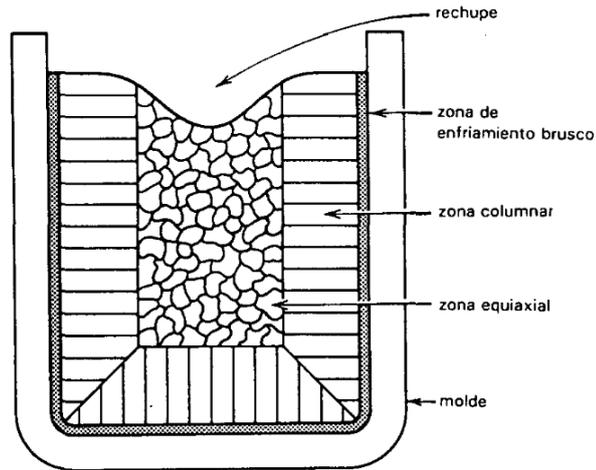


Figura 1.13 Configuración de un lingote con tres regiones distintas.
(Fuente: [62])

- Zona de solidificación rápida:** Se forman granos pequeños y casi equiaxiales. La nucleación suele comenzar a lo largo de las paredes del molde y conduce a una estructura de grano fino [62]. Sin embargo, esta estructura no tiene la oportunidad de crecer mucho antes de que se forme la estructura columnar.
- Zona columnar:** Los granos de la zona de enfriamiento brusco tienen una estructura dendrítica. Algunos granos tienen dendritas orientadas perpendicularmente a la pared del molde, mientras que otras dendritas están orientadas en ángulo con respecto a la pared del molde (Figura 1.14). El crecimiento competitivo de los granos tiende a presionarse entre sí, lo que da como resultado granos largos y columnas con direcciones dendríticas paralelas a la dirección del flujo de calor [62]. Estos granos columnares se extienden hacia el centro del lingote detrás de una interfaz dendrítica que avanza.

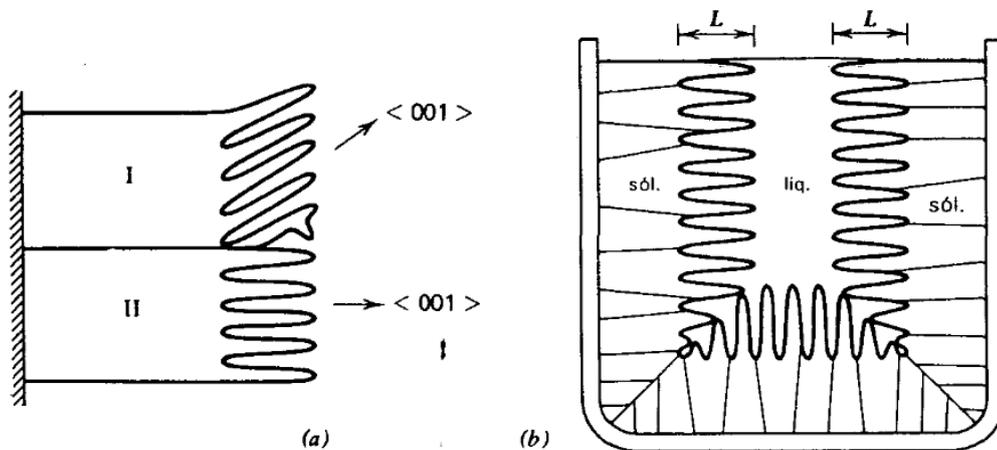


Figura 1.14 La disposición dendrítica en el frente de crecimiento de los granos en una estructura columnar.
(Fuente: [62])

- **Zona equiaxial:** En el centro del lingote, suele haber numerosos granos pequeños y equiaxiales suspendidos en el líquido. A medida que avanza la solidificación, estos granos equiaxiales comienzan a fusionarse, bloqueando el movimiento hacia el interior de los granos columnares. A esto se le conoce como transición de la zona columnar a la zona equiaxial [62]. Nuevamente, las interfases sólido – líquido de estos granos equiaxiales son dendríticas.

Para obtener granos totalmente equiaxiales, es fundamental que se formen en el centro del lingote y no se fundan en la región central más caliente. Esto se logra aprovechando la convección natural que ocurre cuando se vierte metal líquido en un molde, como se muestra en la Figura 1.15. El metal líquido cercano a las paredes del molde se enfría rápidamente, se vuelve más denso y tiende a hundirse, mientras que el metal más caliente en el centro del lingote se eleva. Esto crea corrientes de convección que desprenden las dendritas de los granos en la zona de enfriamiento y las transportan al centro del lingote, donde forman una fuente de granos equiaxiales [62].

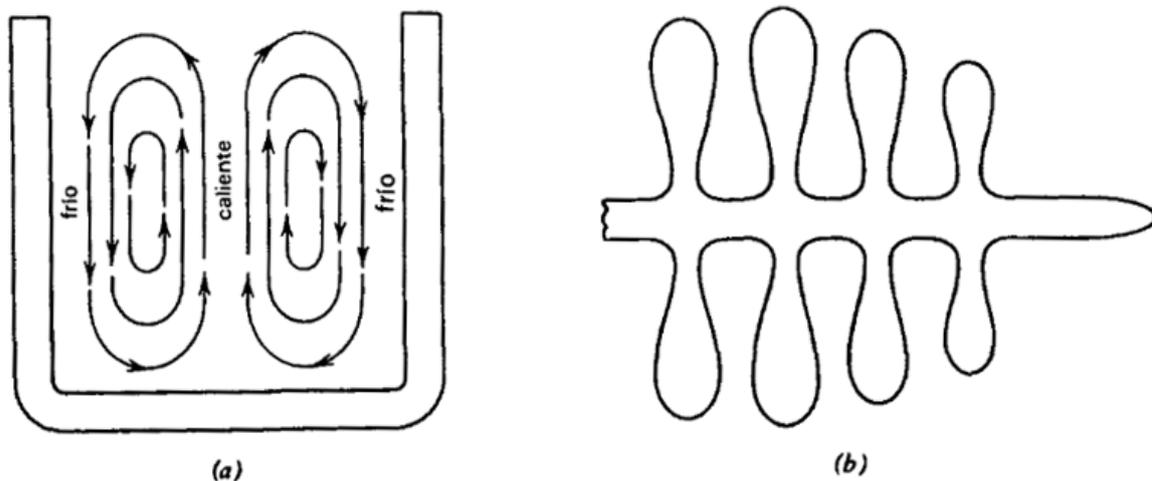


Figura 1.15 a) Flujo convectivo en el metal fundido vertido en un molde, b) Representación gráfica de una dendrita que ilustra la disminución del ancho de las ramas laterales en su base.
(Fuente: [62])

La clasificación de la solidificación que avanza desde la superficie de las paredes del molde hasta el centro de la pieza fundida se divide en tres configuraciones. Estos tres arreglos son: la formación de capa, la formación dispersa y una formación intermedia, las cuales se pueden observar en la Figura 1.16.

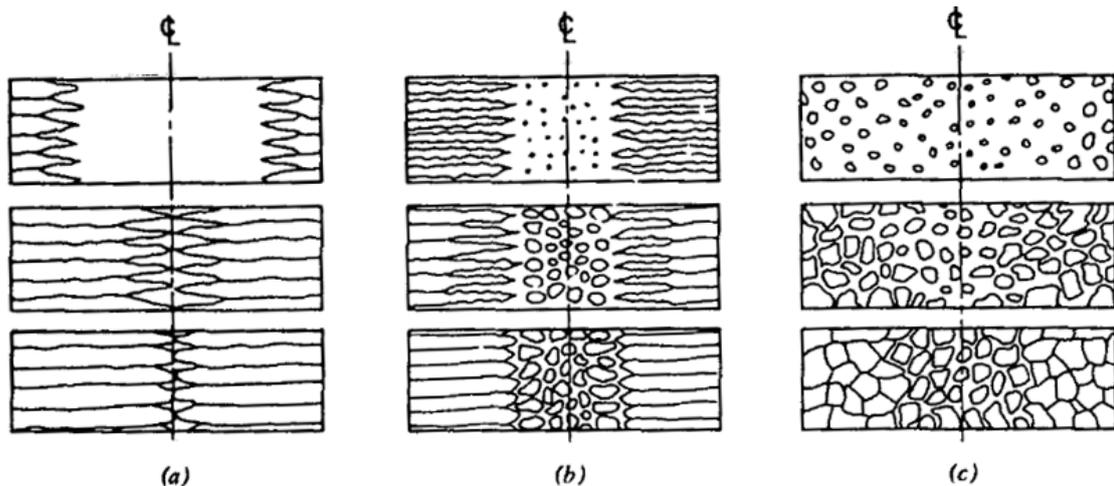


Figura 1.16 Representación gráfica de la solidificación que progresa desde la superficie del molde hacia el centro de la pieza fundida. a) la formación de capa, b) una situación intermedia y c) la formación dispersa.
(Fuente: [62])

Las aleaciones que siguen el patrón de "formación de capa" se caracterizan por una longitud de dendrita relativamente corta durante su proceso de solidificación. Esto significa que la estructura resultante en el material se organiza en una capa característica en la que las dendritas se agrupan en una disposición más o menos uniforme. La formación de capas se produce frecuentemente en aleaciones con una velocidad de enfriamiento moderada [62].

Por otro lado, las aleaciones que experimentan una formación dispersa durante la solidificación muestran un patrón diferente. En este caso, no se observa ni una capa sustancial en la pared, ni una disposición progresiva de las dendritas. La transición de granos columnares a granos equiaxiales ocurre inmediatamente en la pared del molde, dando como resultado una estructura más heterogénea y distribuida en el material. Este tipo de solidificación suele ser característico en aleaciones que producen dendritas largas y ocurre cuando la tasa de enfriamiento es más alta [62].

Es importante tener en cuenta que el hecho de que una aleación adopte el modo de solidificación en capas o dispersa depende de varios factores. El factor más relevante es el rango de solidificación de la aleación y las condiciones de transferencia de calor durante el proceso de fundición [62]. Esto muestra que la aleación puede solidificarse en forma de capas en moldes metálicos bajo ciertas condiciones y de forma dispersa en moldes de arena bajo diferentes condiciones de enfriamiento y solidificación.

1.1.3. Nucleación

La progresión de la transición de fase se puede dividir en dos etapas: nucleación y crecimiento (Figura 1.17). La nucleación es la formación de núcleos, partículas muy pequeñas que pueden aumentar de tamaño. En la etapa de crecimiento, estos núcleos incrementan de tamaño, provocando la desaparición de parte o de la totalidad de la fase inicial. La transformación se considera completa cuando la tasa de crecimiento de estas partículas de la nueva fase continúa hasta que se alcanza una proporción de equilibrio [60].

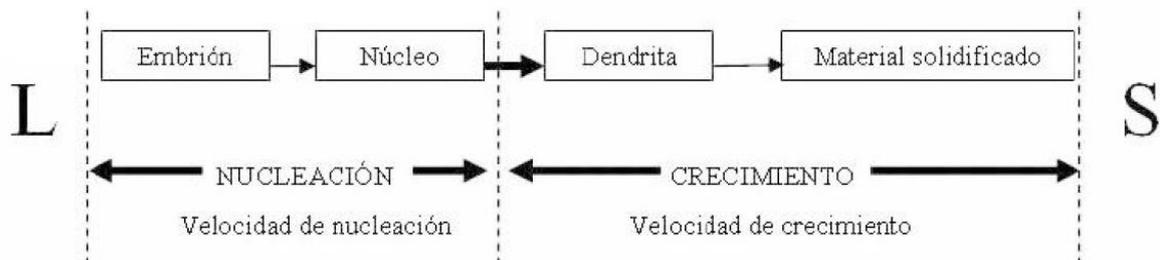


Figura 1.17 Proceso de solidificación transición de líquido a sólido.
(Fuente:[59])

Cuando el material se enfría por debajo de su temperatura de fusión, se espera que se solidifique y pase a un estado sólido. Esto se debe a que la energía asociada con la estructura cristalina del sólido es menor que la del líquido. Esta diferencia de energía se denomina cambio de energía libre de volumen (ΔG_v) e incrementa a medida que aumenta el tamaño del sólido [64].

A medida que se forma el sólido, se crea una interfaz entre él y el líquido circundante. Conforme el sólido aumenta de tamaño, esta interfaz se asocia con una mayor energía libre de superficie (σ). En consecuencia, la variación total de energía (ΔG) se expresa en la Ecuación 4 de la siguiente manera [64]:

$$\Delta G = \frac{4}{3}\pi r^3 \Delta G_v + 4\pi r^2 \sigma \quad 4$$

Donde, $(\frac{4}{3}\pi r^3)$ representa el volumen de un embrión esférico con radio 'r', mientras que $(4\pi r^2)$ representa su área de superficie. Además, σ se refiere a la energía libre de superficie asociada con la interfaz sólido – líquido y ΔG_v representa el cambio negativo en la energía libre volumétrica del sistema [65].

Si el tamaño del sólido es menor que el valor del radio crítico (r^*) en la Figura 1.18, cualquier intento de aumentar su tamaño incrementa la energía libre en lugar de disminuirla. En esta

situación, el sólido ya no se expande, sino que se vuelve a fundir, haciendo que su energía libre disminuya, quedando el material en estado líquido [63].

Por el contrario, cuando el tamaño del sólido supera el valor crítico, cualquier aumento de su tamaño conlleva una disminución de la energía total del sistema, lo que estabiliza el sólido formado. En este punto, la nucleación ha tenido éxito y el núcleo de la partícula sólida comienza a crecer de manera constante y estable.

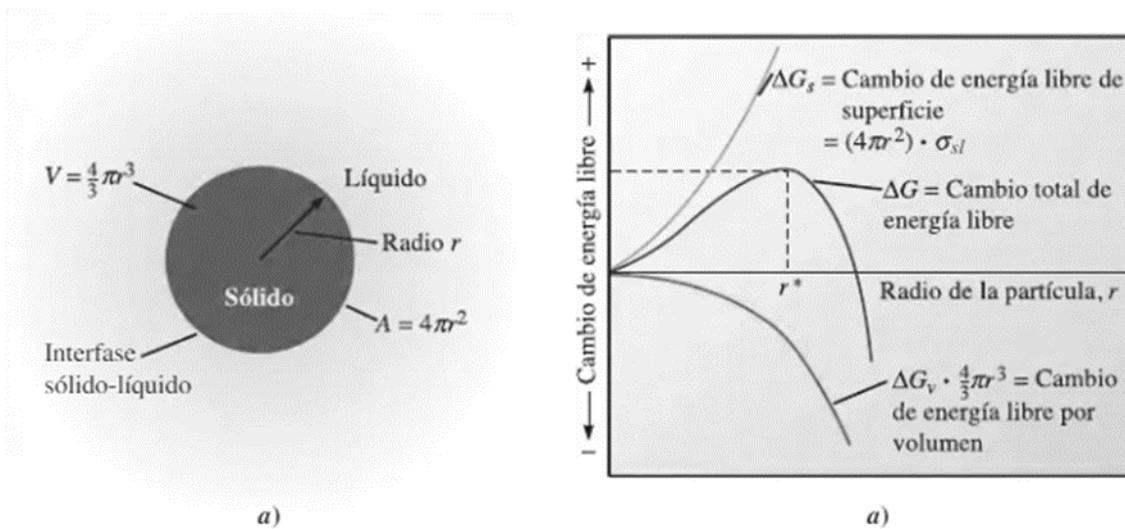


Figura 1.18 a) Una interfaz se forma cuando un sólido se genera a partir del estado líquido, b) La energía total del sistema compuesto por el sólido y el líquido varía en función del tamaño del sólido.

(Fuente: [64])

El término "embrión" se aplica a un sólido cuyo radio es menor que el valor crítico, mientras que el término "núcleo" se refiere a un sólido cuyo radio es mayor que el valor crítico [65].

Se pueden distinguir dos tipos de nucleación: homogénea y heterogénea. La diferencia depende del lugar donde tiene lugar los procesos de nucleación. En la nucleación homogénea, los núcleos de la nueva fase se desarrollan uniformemente a lo largo de toda la fase original. Por otro lado, en la nucleación heterogénea los núcleos se forman preferentemente en áreas de la estructura que presentan irregularidades, como la superficie del molde, impurezas insolubles, límites de grano, dislocaciones, entre otros [66].

a) Nucleación homogénea

La nucleación homogénea ocurre cuando la probabilidad de que aparezca un núcleo en todas partes del metal fundido es la misma. Sin embargo, lograr esta forma de nucleación resulta ser un desafío considerable [51]. En la mayoría de las situaciones prácticas, ciertas

áreas tienen una ventaja en la nucleación sobre otras porque la energía requerida para iniciar el proceso es menor en estas áreas específicas [67 - 68].

Cuando el líquido se enfría por debajo de su temperatura de solidificación se observan dos efectos que favorecen la aparición de núcleos sólidos. En primer lugar, debido a la pérdida progresiva de energía térmica de los átomos, aumenta la probabilidad de que se combinen y formen embriones más grandes [65]. En segundo lugar, la diferencia en la energía libre por unidad de volumen entre los estados líquido y sólido reduce el tamaño crítico (r^*) requerido para formar un núcleo sólido.

La nucleación homogénea tiene lugar cuando el grado de subenfriamiento alcanza un valor suficiente para inducir la formación de núcleos sólidos estables (Figura 1.19). El valor del radio crítico r^* asociado con la nucleación homogénea se puede calcular mediante la siguiente expresión (Ecuación 5) [64]:

$$r^* = \frac{2\sigma T_f}{\Delta H_f \Delta T} \quad 5$$

Donde, ΔH_f representa la cantidad de calor liberado por unidad de volumen durante el proceso de fusión, T_f la temperatura de solidificación en equilibrio medida en Kelvin, ΔT representa la diferencia entre la temperatura de solidificación y la temperatura del líquido en ese instante.

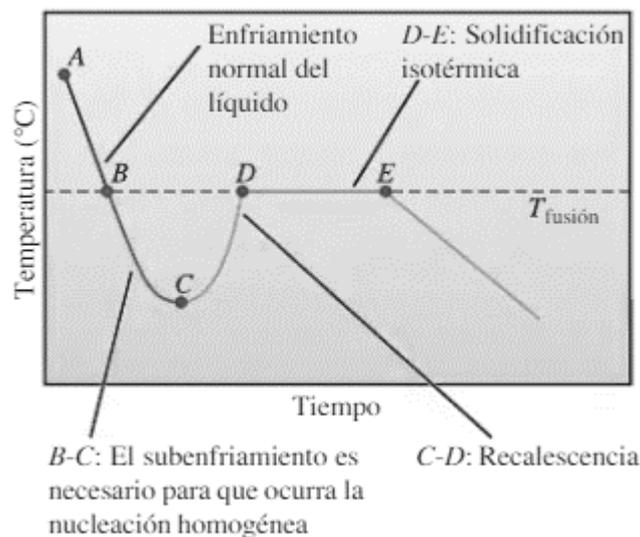


Figura 1.19 Diagrama de enfriamiento de un metal puro que no ha sido adecuadamente tratado para eliminar impurezas.
(Fuente: [64])

b) Nucleación heterogénea

A diferencia de la nucleación homogénea, donde la formación de un sólido comienza en el interior del líquido sin un punto de partida previo, la nucleación heterogénea implica que el sólido empieza a formarse a partir de otro sólido ya existente [61]. Este sólido inicial pueden ser las paredes del molde utilizado en el proceso de solidificación, el propio material que solidifica o una impureza que no se ha disuelto en el líquido, denominado agente de nucleación [69].

Cuando el metal líquido se vierte en el molde que presenta una temperatura más baja, se produce un enfriamiento adicional en la región que entra en contacto con la superficie del molde. Esto crea una zona preferencial en la superficie donde la nucleación comienza rápidamente. Además, en la fase líquida a menudo se encuentran partículas en suspensión (impurezas o inclusiones no metálicas), que contribuyen a la formación de núcleos. Dado que ya existe una interfaz sólido – líquido en la nucleación heterogénea, la energía requerida para formar la superficie de nucleación es menor en comparación con la nucleación homogénea [70]. Esto significa que se requiere menos energía de activación para alcanzar un tamaño crítico equivalente, como se muestra en la Figura 1.20.

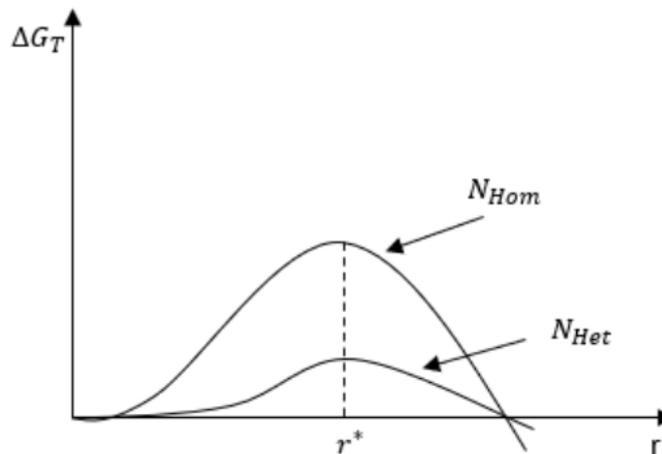


Figura 1.20 Comparación de las energías necesarias para iniciar el proceso de nucleación en los casos de nucleación homogénea y nucleación heterogénea cuando se tiene un radio crítico idéntico.
(Fuente: [70])

A medida que el sólido comienza a formarse, el embrión es tan pequeño que las partes del sólido con las que entra en contacto son prácticamente planas. La Figura 1.21, muestra un embrión formándose en la superficie de un sólido (impureza).

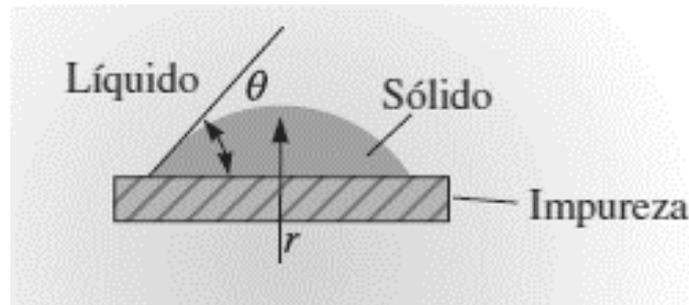


Figura 1.21 Representación gráfica de un embrión que se forma en la superficie de otro material sólido.
(Fuente: [64])

1.1.4. Crecimiento

El proceso de crecimiento cristalino comienza con la formación de núcleos sólidos durante la solidificación del material fundido. La etapa en la que los átomos o moléculas forman una estructura sólida se denomina nucleación. La velocidad y eficiencia del proceso se ven afectadas por varios factores: temperatura, composición química del material y condiciones de enfriamiento [64].

Una vez formados los núcleos sólidos, comienza el proceso de crecimiento cristalino. La cinética de este crecimiento está determinada por la difusión de átomos en el material fundido y las fuerzas intermoleculares que actúan en la interfaz sólido – líquido. Es importante señalar que el mecanismo de crecimiento de los núcleos sólidos varía según cómo se elimina el calor del material fundido durante el proceso de solidificación. Hay dos tipos de calor que se deben disipar: el calor latente de fusión y el calor específico del líquido [64].

El calor específico de un líquido es la cantidad de energía térmica que se requiere para elevar la temperatura de una sustancia un grado Celsius por unidad de peso. Durante el proceso de solidificación, primero se debe eliminar este calor para enfriar el líquido a su temperatura de solidificación [64]. Esto se puede lograr transfiriendo calor a través de radiación o conducción a la atmósfera circundante por medio del molde que rodea el material.

La cantidad de calor liberado o absorbido cuando una unidad de masa de un material cambia de sólido a líquido o viceversa se conoce como calor latente de fusión [64]. A medida que se forma un núcleo sólido a partir del líquido durante la solidificación, se libera calor latente de fusión. Los problemas como la segregación de impurezas y la formación de defectos en las estructuras cristalinas pueden evitarse mediante la disipación de calor.

La fase de crecimiento de transición de fase comienza cuando un pequeño sólido, llamado embrión, excede un cierto tamaño crítico, denotado como r^* . En este punto, el embrión se convierte en un núcleo sólido estable [65]. Es importante que la formación de partículas (nucleación y crecimiento) de la nueva fase pueda ocurrir simultáneamente [61].

A partir de los múltiples puntos de formación iniciales que surgen en las paredes del molde, solo algunos de ellos se desarrollan desde las paredes hacia el interior del líquido. El proceso de transformación del fluido en sólido normalmente genera una estructura que se asemeja a la apariencia de un árbol. Estas estructuras reciben el nombre de dendritas y se caracterizan por tener un tronco largo del que se originan otras ramificaciones más cortas. Las dendritas primarias son el tallo principal y las dendritas secundarias son las ramificaciones [62].

Los puntos iniciales de nucleación en las paredes del molde, que han crecido favorablemente en una dirección perpendicular a la pared y opuesta al flujo de calor de la pared, son donde se originan las dendritas primarias. La velocidad de enfriamiento puede ajustar el tamaño y la distancia entre las dendritas primarias y secundarias [64]. Como se muestra en la Figura 1.22, un enfriamiento más brusco provoca la formación de un mayor número de puntos iniciales, lo que reduce el tamaño de las dendritas y la distancia entre ellas.

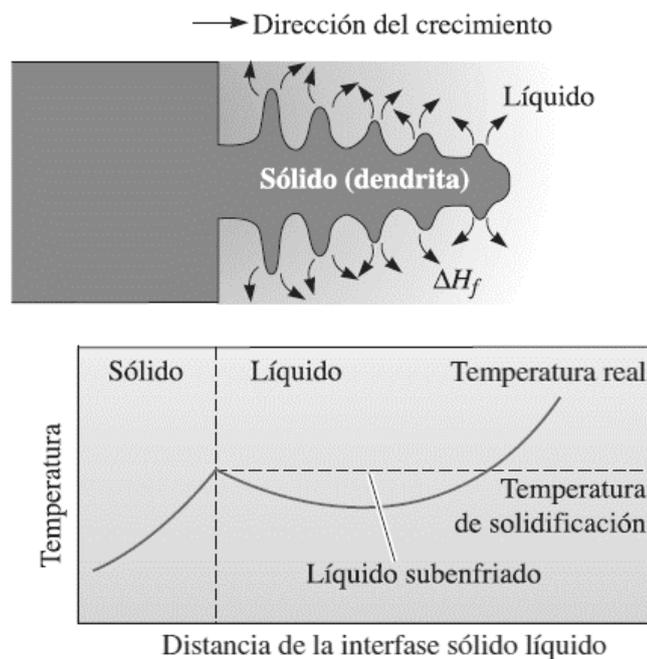


Figura 1.22 Representación de la formación y crecimiento de una dendrita. (Fuente: [64])

a) Aleaciones Cu – Zn

Las aleaciones de cobre tienen una amplia gama de usos en diferentes sectores industriales. Se utilizan en diversos ámbitos, desde productos de fontanería hasta componentes electrónicos de alta precisión. Estas aleaciones poseen propiedades favorables que a menudo se combinan de manera útil, cuando el producto debe cumplir varios requisitos al mismo tiempo [71 - 73].

En América del Norte, las convenciones aceptadas para la identificación del cobre y sus aleaciones están contempladas en el Sistema de Numeración Unificada (UNS), que abarca tanto metales como aleaciones [74]. En colaboración con la Sociedad Estadounidense para Ensayos de Materiales (ASTM, por sus siglas en inglés) y la Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE, por sus siglas en inglés). El sistema UNS consta de un número de cinco dígitos precedido por la letra "C" para describir los diversos tipos de cobre y sus aleaciones.

Las aleaciones que combinan cobre y cinc en una solución sólida son probablemente las más utilizadas entre las aleaciones con base de Cu. Aunque conservan la capacidad del cobre para resistir la corrosión y su maleabilidad, estas aleaciones son más resistentes [75 - 77]. Debido a que el cinc tiene una estructura hexagonal, su capacidad para combinarse completamente con el cobre es limitada. Sin embargo, el cobre tiene una estructura cúbica centrada en las caras y la diferencia de tamaño entre sus átomos y los de cinc es solo del 4 %, lo que sugiere que es posible una solubilidad considerable entre ellos [72].

La estructura interna de la aleación de latón, que contiene 40 % de cinc en peso, consta de dos tipos de soluciones sólidas: una solución sólida final que contiene más cobre denominado α y una solución sólida intermedia conocida como β' . En el diagrama de fases de la aleación Cu – Zn (Figura 1.23), los rangos de composición aproximados de la aleación analizada en este estudio (60Cu – 40Zn) están delineados con una banda violeta. La banda de color ilustra cómo cambian las fases en función de las fluctuaciones de temperatura. Esta transición abarca desde el estado líquido hasta las fases ($\alpha+\beta'$) que se establece a temperatura ambiente, revelando una serie de transformaciones y equilibrios entre fases en el proceso de solidificación y enfriamiento de la aleación [78].

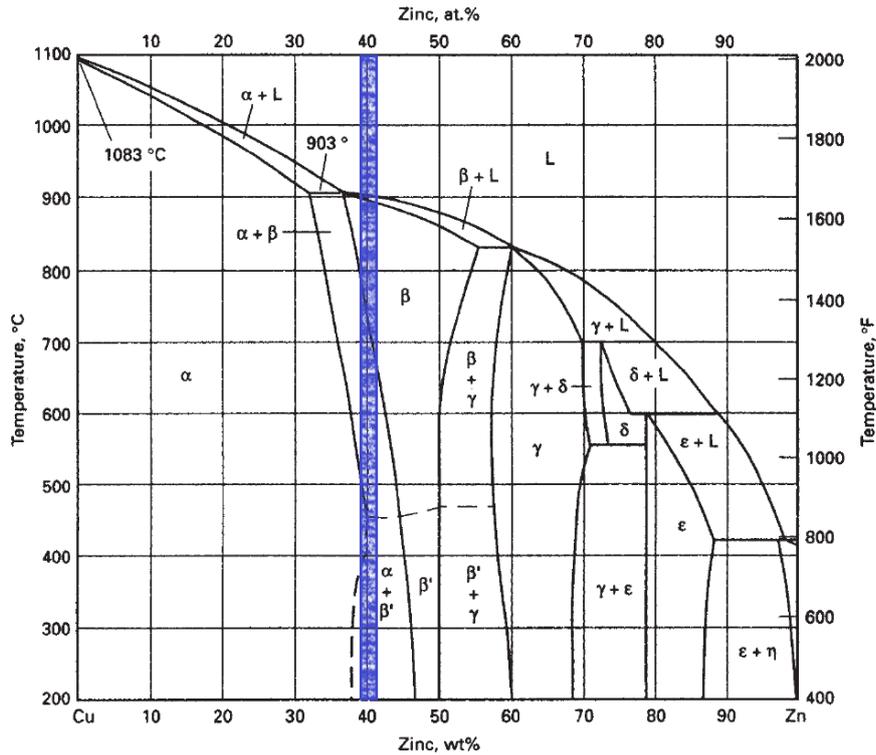


Figura 1.23 Diagrama de fases cobre - cinc (Cu – Zn).
(Fuente: [79])

i. Características

Las propiedades y características distintivas de los latones los convierten en materiales versátiles en la industria. Su adaptabilidad y variedad de propiedades mecánicas y físicas los hacen esenciales en muchas aplicaciones. La selección del tipo de latón en función de requerimientos establecidos es fundamental para garantizar el rendimiento y la calidad de los productos manufacturados [80 - 81].

- El latón ofrece versatilidad en su manufactura a través de diversos métodos de fundición que permite el uso de moldes perdidos o moldes metálicos, utilizando tanto la gravedad como la presión controlada.
- Su resistencia es considerable, pero se puede aumentar mediante el uso de técnicas de trabajo en frío, como el laminado o trefilado.
- Cuando el contenido de cobre en el latón es alto y supera el 63 %, muestra una excelente ductilidad, lo que lo convierte en una aleación factible para aplicaciones que requieren capacidad de conformado en frío.
- Presenta un alto grado de maquinabilidad, esta propiedad aumenta cuando se agrega a la composición plomo, alrededor del 3 %.
- Por su resistencia a la corrosión, se utiliza en ambientes expuestos a la corrosión atmosférica, agua de mar y otros fluidos.

- Posee cualidades térmicas y características eléctricas aceptables, lo que lo convierte en un material adecuado para la fabricación de equipos eléctricos, tanto a nivel doméstico como industrial.
- Su resistencia al desgaste lo hace adecuado para aplicaciones como piñones, rodamientos y engranajes, entre otros.
- Se destaca por sus propiedades favorables en cuanto a soldabilidad, pudiendo ser unido mediante soldadura con otras aleaciones de cobre o diferentes metales.
- El color dorado y su brillo, así como la amplia gama de colores posibles, lo convierten en un material estéticamente atractivo. Por lo tanto, es utilizado en aplicaciones de carácter decorativo.
- La naturaleza reciclable del latón permite que los subproductos sean reciclados o fundidos para obtener nuevamente latón.
- La presencia de cobre en la aleación ejerce un efecto inhibitor en el crecimiento de microorganismos, otorgándole propiedades antibacterianas destacables.

ii. Microestructura

En el análisis microestructural, identificar las fases presentes en una aleación es crucial para predecir su comportamiento bajo diversas condiciones de procesamiento y aplicaciones posteriores [82]. La Figura 1.24 muestra las fases β' y α presentes en una aleación Cu – Zn dúplex.

La fase β' es una fase sólida que se forma a partir del estado líquido de la aleación durante el proceso de enfriamiento [83]. Los parámetros de fundición, como la velocidad de enfriamiento y la composición química, varían la cantidad, distribución y morfología de esta fase.

Por otro lado, la fase alfa (α) es otro componente microestructural importante de esta aleación. Esta fase sólida tiene diferentes propiedades en cuanto a dureza, resistencia y conductividad eléctrica. Su presencia y distribución influyen en la capacidad de la aleación para resistir la deformación y cargas mecánicas [79].

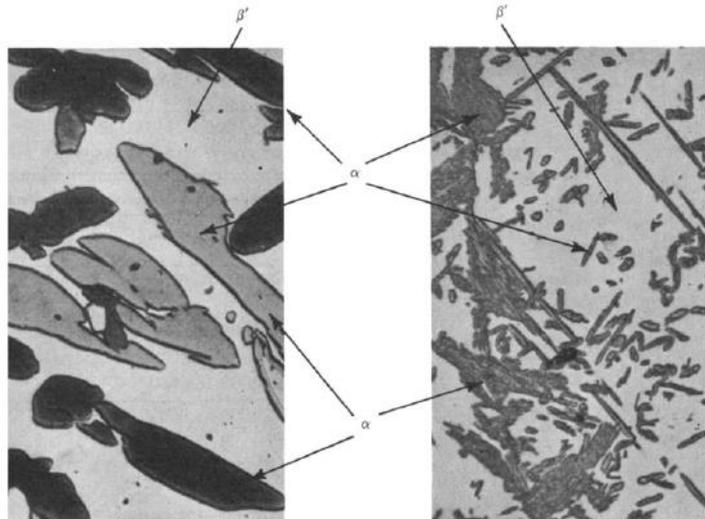


Figura 1.24 Microestructuras típicas de aleaciones de Cu-40Zn enfriadas rápidamente desde la región β hasta 20 °C.
(Fuente: [79])

b) Tipo de latones

El latón es una aleación compuesta principalmente de cobre (Cu) y cinc (Zn). Los latones se diferencian principalmente en las proporciones relativas de cobre y cinc, así como por la posibilidad de agregar otros elementos a la aleación para modificar sus propiedades. Estas variaciones pueden cambiar propiedades como resistencia mecánica, conductividad eléctrica, resistencia a la corrosión, maleabilidad, entre otras [84 - 85].

- **Latón Alpha (α):** Diseñado para aplicaciones donde son sometidos a procesos de conformado en frío. Estos latones pueden tener un contenido de cinc de hasta el 39%. Esta aleación presenta una ductilidad significativa a temperatura ambiente, lo que facilita su manipulación en condiciones de frío. Además, exhibe una mayor resistencia a la corrosión en comparación con otras aleaciones con mayor contenido de cinc [86].
- **Latón Beta (β):** El rango de composición en el que el latón adopta una fase beta se sitúa entre el 46 % y el 50 % de contenido de cinc. En este estado, la estructura cristalina en su forma β – Cristalizada asume una configuración centrada en el cuerpo (BCC), la que, a temperaturas superiores a 470 °C, los átomos de cinc ocupan posiciones aleatorias dentro de la estructura. Cuando la temperatura desciende por debajo de los puntos críticos, estos átomos comienzan a ordenarse preferentemente, dependiendo de la composición del material. La fase beta alcanza un estado de orden cuando se forma una súper-red, conocida como β' [84].
- **Latón Alpha – Beta ($\alpha+\beta$):** Muestran una combinación de fases α y β se denominan "dúplex" o destinados a "trabajo en caliente". Suelen tener un contenido de cinc que

varía entre 39 % al 45 %. La fase β' se caracteriza por ser más rígida y frágil a temperatura ambiente en comparación con la fase α [79].

- **Latones Especiales:** Estas variantes especiales de latón se producen con el propósito de aumentar la resistencia mecánica. Para conseguir este objetivo se incorporan pequeñas adiciones de otros elementos como aluminio, estaño, hierro, manganeso o níquel [86].

1.1.5. Elementos aleantes

Debido a la amplia gama de usos del latón mecanizado, se han llevado a cabo varios estudios para investigar la microestructura de esta aleación [87 - 89]. En el proceso de mecanizado, se añade plomo a la aleación de Cu – Zn para que actúe como lubricante y mejorar su maquinabilidad. Sin embargo, el plomo en el latón tiene una solvencia limitada y se presenta en la microestructura en forma de partículas. Actualmente, el plomo es considerado un elemento peligroso para la salud humana, por lo que es necesario buscar alternativas para su sustitución [90 - 91]. En investigaciones enfocadas en latones de maquinado libre, se ha recurrido al uso de bismuto (Bi) y silicio (Si) como sustitutos del plomo [92 - 94].

El plomo es un elemento que se incorpora en cantidades de hasta un 3 % en las aleaciones de latón $\alpha + \beta$ para facilitar un proceso de mecanizado libre. Aunque, el plomo no se disuelve completamente en el latón, se encuentra presente en forma de una fase discontinua distribuida por toda la aleación [95]. Asimismo, esta adición puede conducir a una reducción de la ductilidad, pero no tiene ningún efecto sobre la resistencia a la tracción o la resistencia a la corrosión.

El silicio juega un papel importante en la mejora de la resistencia al desgaste de las aleaciones de latón [96 - 97]. Se utiliza en piezas de fundición a presión y diversas aleaciones de relleno para soldadura con gas, con el objetivo de reducir la oxidación del cinc y mejorar la fluidez. También se utiliza para aumentar la resistencia a la corrosión. Para ello es necesario aumentar la presencia de la fase α en la aleación. La incorporación de silicio ayuda a reducir el riesgo de fisuras por corrosión bajo tensión y prevenir el proceso de descincificación [98].

Ferro – Silicio

El ferro-silicio se obtiene mediante un proceso en el que se reduce el dióxido de silicio utilizando carbón de coque. Este proceso tiene lugar en altos hornos, que también

contienen mineral de hierro. La interacción en condiciones de altas temperaturas y reacciones químicas entre estos componentes crea la mezcla de ferro-silicio [99].

El ferro-silicio se utiliza como desoxidante en la producción de acero [99]. En la elaboración de fundición gris, se utiliza como agente grafitizante, lo que fomenta la formación de grafito en la estructura de la fundición. Además, se puede usar en aleaciones como Cu – Zn. El comportamiento de este componente se ve afectado por su adición en condiciones adversas como corrosión y altas temperaturas.

1.2. Simulación del proceso de fundición

El proceso de fundición ha evolucionado a lo largo de los siglos, desde técnicas simples hasta métodos modernos muy sofisticados. La simulación por computadora ha revolucionado la forma en que los ingenieros metalúrgicos abordan el proceso de fundición. La aplicación de técnicas de simulación al proceso de fundición tuvo sus inicios en instituciones universitarias a principios de los años 1970, con un enfoque predominante en Europa y Estados Unidos [100]. Este enfoque se considera un punto de referencia para el progreso de la tecnología de fundición durante las últimas cinco décadas. Los componentes principales que respaldan el software de simulación para el proceso de fundición son la representación tridimensional de la configuración geométrica de la cavidad del molde, incluido el sistema de entrada y canalización, así como las propiedades termo-físicas tanto del molde como del material de fundición [101 - 102].

La simulación por computadora del proceso de fundición implica el modelado matemático de los fenómenos físicos y térmicos involucrados en la solidificación de los metales. Este enfoque permite predecir cómo se comportará el metal líquido en diferentes condiciones y cómo se forman diversos defectos potenciales [103 - 105]. El uso de software especializados permite la creación de representaciones virtuales del proceso de fundición, ahorrando así tiempo y recursos en comparación con los experimentos convencionales de prueba y error [106].

Desde esta perspectiva, la Ingeniería Asistida por Computadora (CAE, por sus siglas en inglés) se ha convertido en una herramienta eficaz para predecir y prevenir posibles defectos en piezas durante el proceso de fundición [107]. Altair Inspire Cast, es un software que proporciona simulaciones avanzadas de modelado y análisis del proceso de fundición.

A través de la simulación, los sistemas y procesos se pueden evaluar virtualmente antes de ejecutarlos en el mundo físico [108 - 109]. Esta herramienta proporciona una manera efectiva de estudiar y optimizar fenómenos complejos en el proceso de fundición, donde

factores como la solidificación, la distribución del flujo de metal y la formación de defectos pueden influir en la calidad del producto final [110 - 111].

La Figura 1.25 muestra una secuencia de imágenes de los resultados de la simulación del proceso de llenado de las cavidades que conforman el modelo. Esta secuencia ilustra la trayectoria que toma el metal líquido desde su vertido inicial hasta alcanzar la saturación total de las cavidades predefinidas en el diseño del modelo requerido [101, 112 - 113].

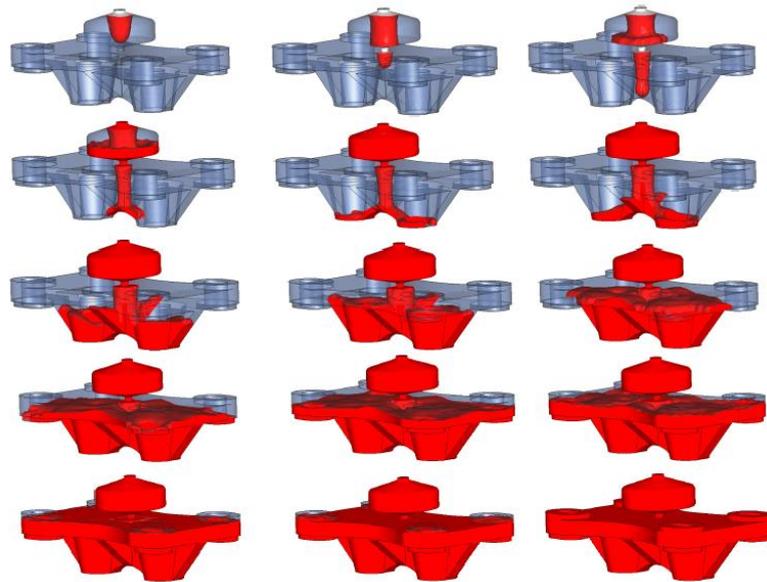


Figura 1.25 Simulación del proceso de llenado.
(Fuente: modificado de [114])

1.2.1. Software Altair Inspire Cast

Altair Inspire Cast es un software de simulación de fundición que proporciona un escenario completo para modelar y analizar el proceso de llenado y solidificación de metal. Su interfaz intuitiva y amigable con el usuario (Figura 1.26) permite la definición de parámetros de materiales, condiciones de proceso y geometría del molde, facilitando la creación de modelos realistas y detallados [115].

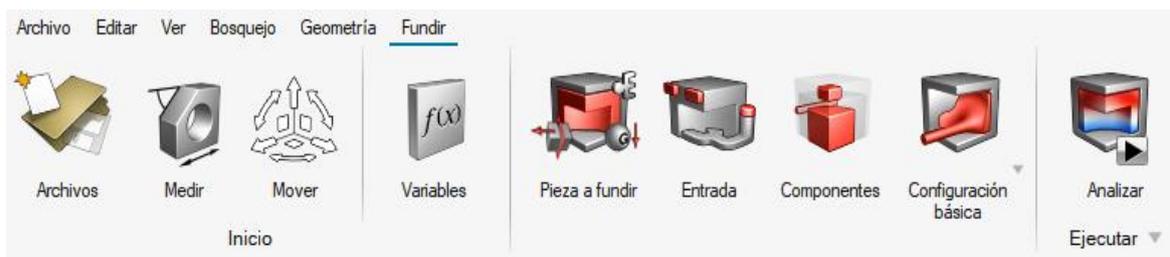


Figura 1.26 Cuadro de herramientas software Altair Inspire Cast.
(Fuente: Propia)

El software permite simular diferentes escenarios y condiciones, lo que facilita la optimización del proceso de fundición. A través de la optimización puede reducir los defectos, aumentar la eficiencia y ahorrar costos. Cambiando variables como velocidad de llenado, temperatura del material fundido y geometría del molde. Al cambiar los valores de estas variables, podemos evaluar cómo afectan la calidad e integridad de la fundición, como se muestra en la Figura 1.27.

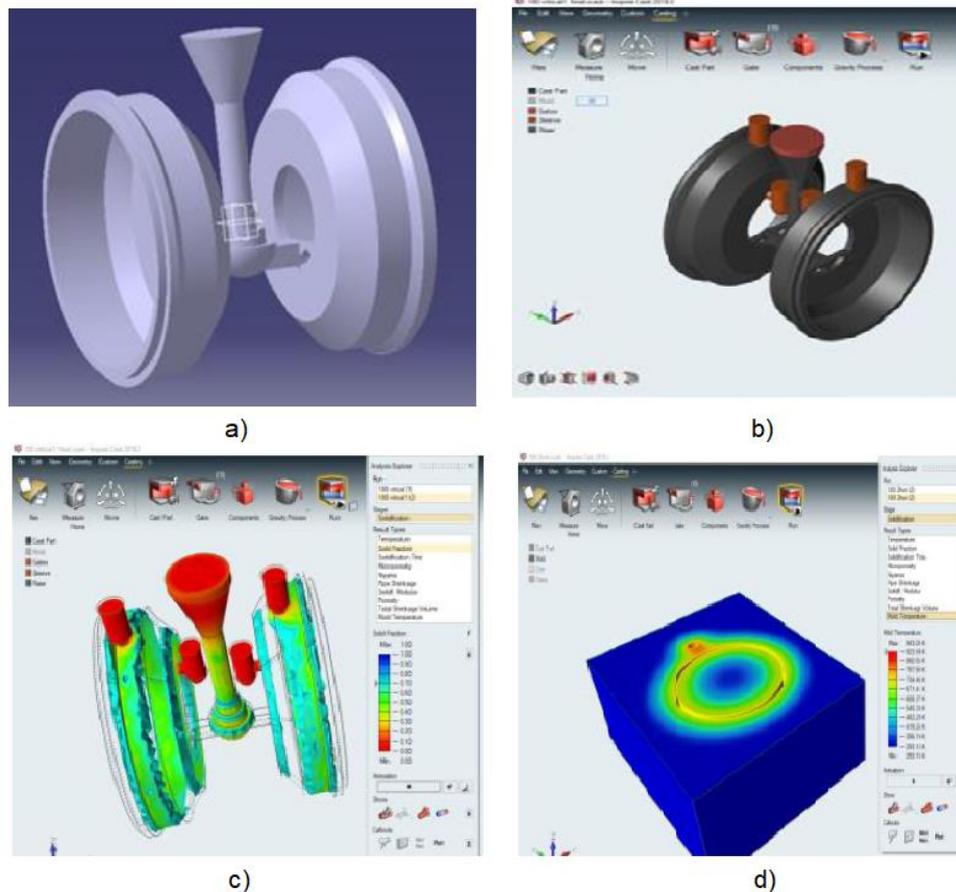


Figura 1.27 Software Altair Inspire Cast. a) Diseño de molde en 3D, b) Modelo ensamblado, c) Fracción sólida y d) Temperatura del molde.
 (Fuente: modificado de [100])

Este software de simulación por computadora puede simular el proceso de solidificación y detectar posibles defectos, como la formación de poros o inclusiones. Esto se logra mediante el uso de mecanismos de visualización como gráficos de solidificación y análisis de flujo de metales. Se pueden identificar áreas críticas donde pueden ocurrir defectos y ajustar las condiciones del proceso para mitigarlos [116]. Permite el modelado y análisis detallados de los procesos de llenado y solidificación del molde y ofrece la oportunidad de mejorar la calidad de la fundición, reducir defectos y optimizar la eficiencia del proceso.

1.3. Técnicas de caracterización de las aleaciones de Cu

1.3.1. Microscopía electrónica

El microscopio electrónico de barrido (SEM, por sus siglas en inglés) permite observar y caracterizar materiales orgánicos e inorgánicos a niveles nanométricos (nm) y micrométricos (μm) como se muestra en la Figura 1.28. Su popularidad se debe a su capacidad para generar imágenes tridimensionales de la superficie de una amplia gama de materiales y proporcionar información sobre su tamaño, forma, composición, estructura cristalina y otras propiedades físicas y químicas [117].

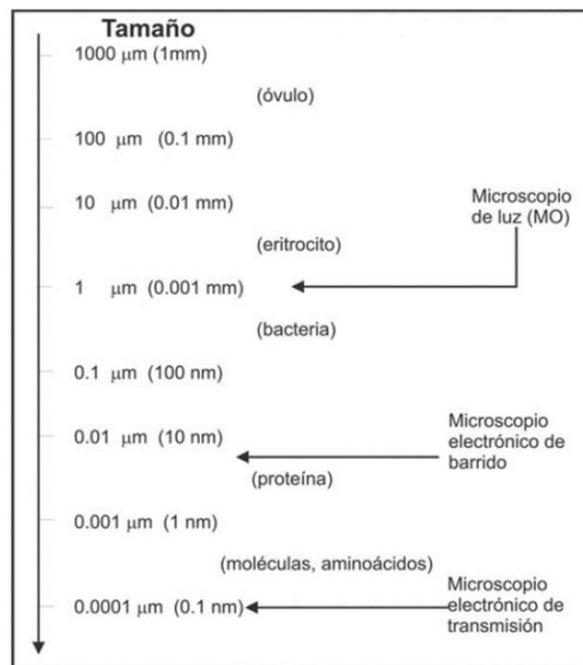


Figura 1.28 El límite de resolución de microscopía en los instrumentos ópticos y electrónicos. (Fuente: [118])

La operación del SEM se caracteriza por utilizar un haz de electrones enfocado para irradiar el área de interés en la muestra. Este haz de electrones puede barrerse sobre la superficie de la muestra en forma de cuadrícula para generar imágenes detalladas o permanecer estático en una posición específica para el análisis [119]. La interacción entre la muestra y el haz de electrones produce diversas señales, incluidos electrones secundarios, electrones retrodispersados, rayos X característicos y otros fotones de diferentes energías, como se muestra en la Figura 1.29 [118].

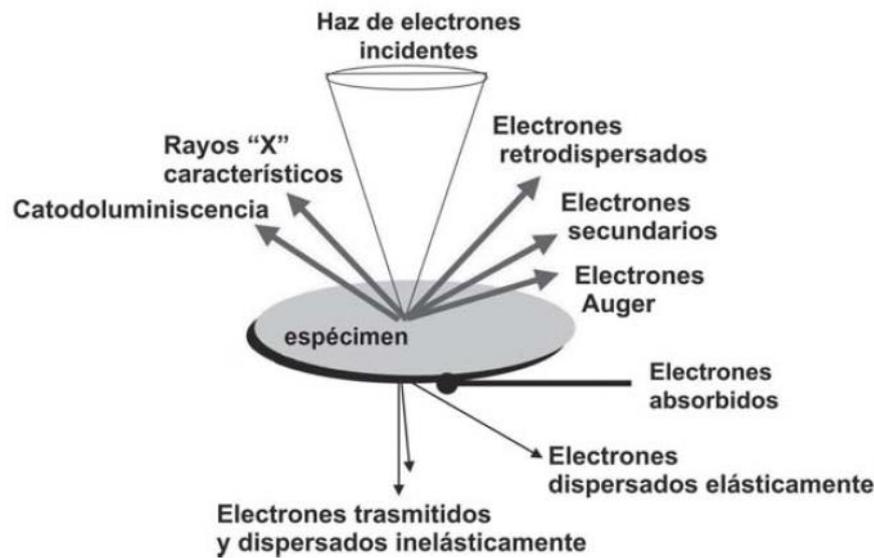


Figura 1.29 En el proceso de interacción de los electrones del haz primario con el espécimen, algunos electrones inducen múltiples tipos de respuestas señales (electrones secundarios, retrodispersión, Auger, rayos X, cátodo-luminiscencia, entre otros).
(Fuente: [118])

Las señales más importantes para la obtención de imágenes son los electrones secundarios y retrodispersados porque su variación está relacionada con diferencias en la topografía de la superficie. Los electrones secundarios se emiten desde un volumen muy cercano al punto de impacto del haz de electrones, lo que permite obtener imágenes con una resolución cercana al tamaño del haz de electrones enfocado. La percepción tridimensional de las imágenes se debe a la profundidad de campo del SEM y al efecto de sombra producido por los electrones secundarios y retrodispersados [120].

Además de los electrones secundarios y retrodispersados, el SEM también emite rayos X característicos debido a la interacción de los e^- del haz con la muestra. El análisis de estos rayos X proporciona información cualitativa sobre la composición de la muestra, así como datos cuantitativos sobre los elementos presentes en una región en específico [118].

El principio de funcionamiento del SEM es generar un fino haz de electrones a partir de una fuente. La energía de estos electrones suele estar en un rango de 0.1 a 30 keV. Se controla y modifica mediante la apertura de lentes magnéticas, lentes electrostáticas y bobinas electromagnéticas (Figura 1.30). Estos elementos se utilizan para reducir gradualmente el diámetro del haz y para escanearlo en un patrón de barrido (x-y) sobre la muestra, posicionándolo secuencialmente en múltiples ubicaciones discretas [121].

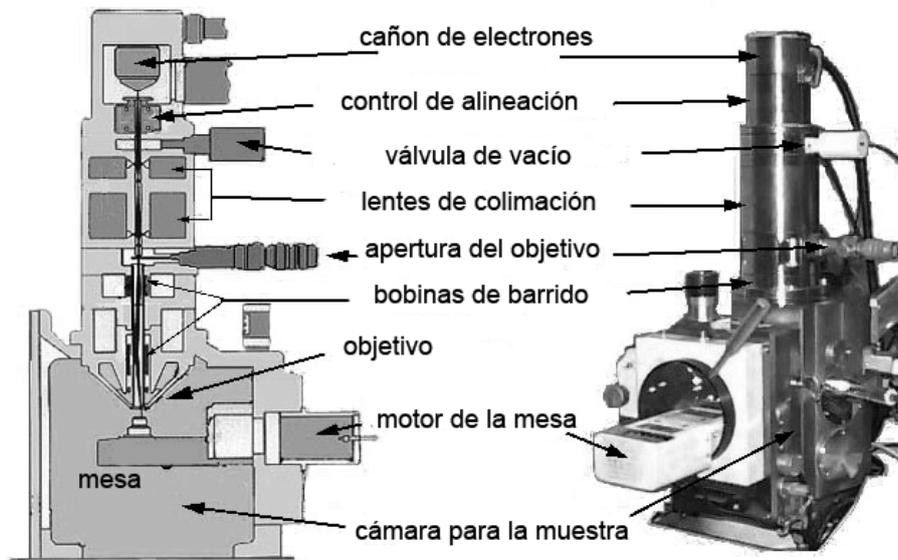


Figura 1.30 Imagen y representación de un microscopio electrónico de barrido, detallando sus elementos clave.
(Fuente: [122])

Cada ubicación en el patrón de exploración produce dos tipos de electrones salientes: los electrones retrodispersados (BSE, por sus siglas en inglés), que conservan gran parte de su energía incidente, y los electrones secundarios (SE), que son proyectados de la superficie de la muestra por los electrones del haz [123 - 124].

En un SEM convencional, es importante mencionar que la columna de electrones y la cámara deben operar en condiciones de alto vacío ($< 10^{-4} Pa$) para evitar la dispersión no deseada de los electrones del haz, los electrones retrodispersados y los electrones secundarios al interactuar con átomos y moléculas de gases atmosféricos. Además, las muestras aislantes tienden a acumular carga eléctrica debido al impacto de los electrones del haz, por lo que se requiere un recubrimiento conductor conectado a tierra para permitir una descarga eléctrica adecuada [125].

La microscopía SEM permite el uso de múltiples modos de operación para optimizar la adquisición de imágenes y la caracterización de muestras. Estos modos de funcionamiento se seleccionan en función de los objetivos específicos del estudio [118].

- **Selección del diámetro de haz:** La elección del diámetro del haz de electrones es crucial para obtener imágenes con alta resolución espacial. Para visualizar características de alta resolución, se pueden utilizar estrategias de imágenes con alta energía del haz. La energía del haz influye en la capacidad de penetración y en la resolución de la imagen.

- **Corriente del haz y contraste:** Una alta corriente del haz es beneficiosa para mejorar la visibilidad de objetos de bajo contraste. Sin embargo, es importante tener presente que existe un umbral de contraste por debajo del cual las características de la muestra pueden no ser visibles dependiendo de la combinación de la corriente del haz, el tiempo de permanencia de los píxeles y la eficiencia del detector.
- **Ángulo de divergencia del haz:** Minimizar el ángulo de divergencia del haz ayuda a aumentar la profundidad de campo. Seleccionando cuidadosamente el tamaño de apertura y la distancia de trabajo, es posible lograr pequeños ángulos de convergencia del haz, lo que da como resultado un enfoque eficaz a lo largo del eje del haz.

El software proporcionado por el fabricante del SEM es fundamental para la adquisición, procesamiento y análisis de imágenes. Además, herramientas de código abierto como ImageJ-Fiji amplían las capacidades de procesamiento digital de imágenes y brindan a los usuarios acceso a una comunidad de microscopía que respalda el procesamiento de las imágenes [121].

En cuanto a las propiedades de las muestras que se pueden obtener de las imágenes SEM, destacan las siguientes, ejemplificadas en la Figura 1.31:

- **Microestructura composicional:** Las variaciones en la composición a nivel atómico (Z) se pueden observar mediante la detección de BSE, lo que permite identificar regiones con diferente composición.
- **Topografía (forma):** Dependiendo del haz incidente y del material de la muestra, la estructura topográfica de la muestra se puede representar con gran detalle, incluida la ubicación de bordes y estructuras en una escala nanométrica.
- **Visualización tridimensional:** Al optimizar la profundidad de campo, es posible visualizar la estructura tridimensional de la muestra, lo que lleva a una comprensión más completa de su morfología.
- **Medición de composición elemental:** La interacción del haz de electrones con la muestra produce emisiones de rayos X característicos, permitiendo la identificación y cuantificación de elementos específicos presentes en la muestra. A excepción del hidrógeno y el helio.
- **Otras propiedades:** Permite el estudio de la estructura cristalina, la microestructura magnética, campos eléctricos aplicados y la emisión óptica estimulada por electrones (cátodo – luminiscencia), que es sensible a estructuras electrónicas de baja energía.

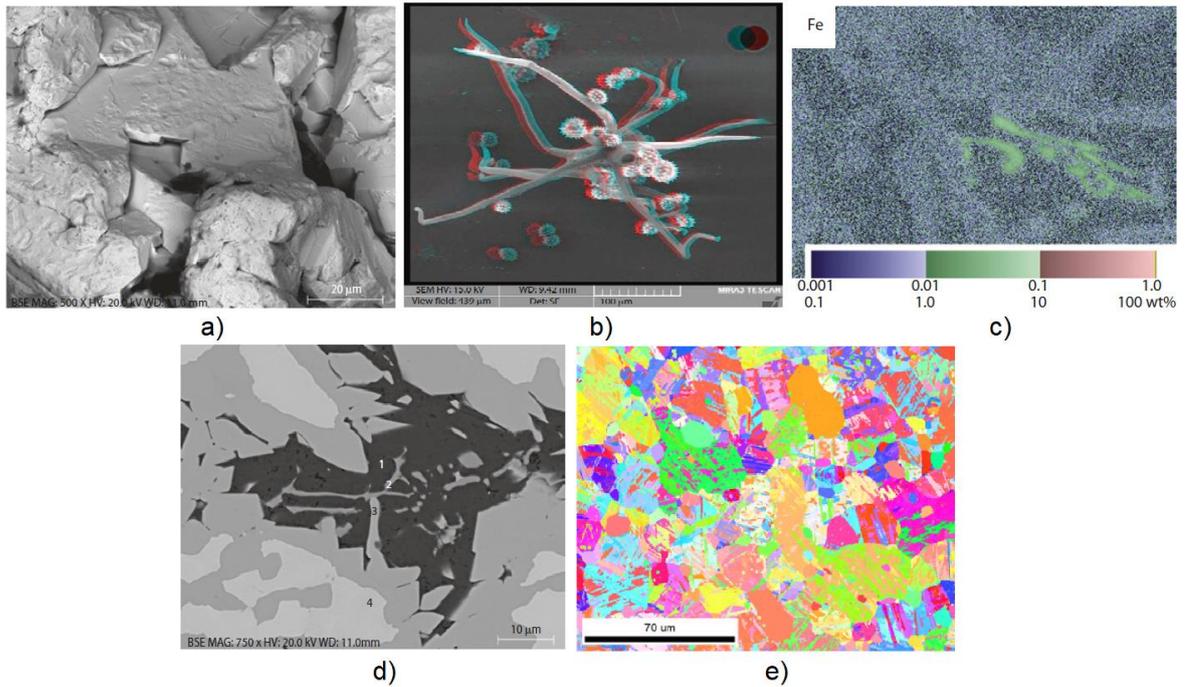


Figura 1.31 Información que se obtiene de un microscopio electrónico de barrido. a) Electrones secundarios (SE) - Topografía, b) visualización tridimensional, c) Mapeo de Rayos X (EDS) - composición química (EDS), d) Electrones retrodispersados (BSE) – número atómico y e) EBSD - cristalografía.
 (Fuente: [121])

2. METODOLOGÍA

En esta sección se proporciona una descripción de los materiales utilizados y los procedimientos realizados en las diferentes etapas del proceso de fundición por gravedad, utilizando un molde de arena con resina. En el apartado de materiales (2.1), se lleva a cabo el análisis de la composición química necesaria para producir una aleación de Cu – Zn – FeSi, variando los porcentajes de ferro-silicio y la posición de las probetas (horizontal y vertical).

Dentro de la sección de métodos (2.3), se detalla el enfoque metodológico adoptado en este estudio. El proceso comienza con la experimentación para obtener las aleaciones de cobre, cinc y ferro-silicio (Cu – Zn – FeSi) de manera experimental, con el objetivo de establecer los parámetros de conformado para cada fase del proceso de fundición. Una vez recopilada esta información, se realiza una simulación por computadora del proceso de fundición utilizando el software Altair Inspire Cast. Además, esta sección describe las diversas técnicas de caracterización implementadas en esta investigación.

2.1. Materiales

2.1.1. Selección de la aleación Cu – Zn – FeSi

Para llevar a cabo la investigación, se optó por emplear aleaciones de cobre - cinc (Cu – Zn) libres de plomo, adicionando ferro-silicio en proporciones predefinidas de 0.5 %, 1 %, 1.5 % y 2 %, actuando como sustituto del plomo [28]. La Tabla 2.1 contiene un desglose detallado de las composiciones químicas porcentuales de cada muestra.

Tabla 2.1 Porcentaje de los elementos cobre (Cu) y cinc (Zn) en combinación con ferro-silicio en una aleación.

Aleación %	Zn (%)	Cu (%)	Si (%)	Fe (%)	Otros (%)	Al (%)	C (%)	P (%)	S (%)
Probeta 1	40,33	59	0,5	0,1615	0,0047	0,0043	0,00025	0,0001	0,00005
Probeta 2	39,66	59	1,0	0,3230	0,0094	0,0086	0,00050	0,0002	0,00010
Probeta 3	38,99	59	1,5	0,4845	0,0141	0,0129	0,00075	0,0003	0,00015
Probeta 4	38,32	59	2,0	0,6460	0,0188	0,0172	0,00100	0,0004	0,00020

(Fuente: [126])

Para ejecutar este proyecto de investigación, se seleccionó como punto de referencia una aleación de cobre denominada latón UNS C38500 [127]. Esta aleación se utiliza para la fabricación de una amplia gama de componentes y elementos para diversas aplicaciones, tales como accesorios para bisagras, mordazas de prensa, secadores eléctricos, puertas

de duchas, pasamanos, juntas de dilatación, tuercas, acoples, accesorios para cerraduras, válvulas, grifos y tornillos, entre otros.

Entre las principales propiedades de esta aleación de cobre, destacan su excelente ductilidad y maquinabilidad, atribuibles a la presencia de plomo en su composición. Estas características lo convierten en una opción ideal para aplicaciones donde se requiere un alto grado de conformabilidad y facilidad de mecanizado [75 - 76]. La composición química de este material se detalla en la Tabla 2.2 como referencia para este estudio.

Tabla 2.2 Aleación de cobre (C38500).

Aleación	Zn	Cu	Pb	Fe
C38500	Resto	(55 – 59) %	(2,5 – 3,5) %	Máx. 0,35 %

(Fuente: [128])

2.1.2. Cargas para el proceso de fundición

La determinación de la carga se basó en establecer proporciones ponderadas de los diferentes elementos que componen la carga general. La mezcla se introdujo en un horno de fusión para crear una aleación que cumpliera con la composición química predeterminada. Fue necesario considerar las pérdidas irreversibles debido a fenómenos como la evaporación, la formación de óxidos y las pérdidas por la interacción de la aleación con el revestimiento del horno de fusión y el crisol [129].

La Figura 2.1 muestra un diagrama de la secuencia de los pasos seguidos para determinar la magnitud de las cargas asociadas a cada elemento que compone la aleación Cu – Zn – FeSi, teniendo en cuenta las características necesarias de las probetas y el diseño del sistema de alimentación requerido.

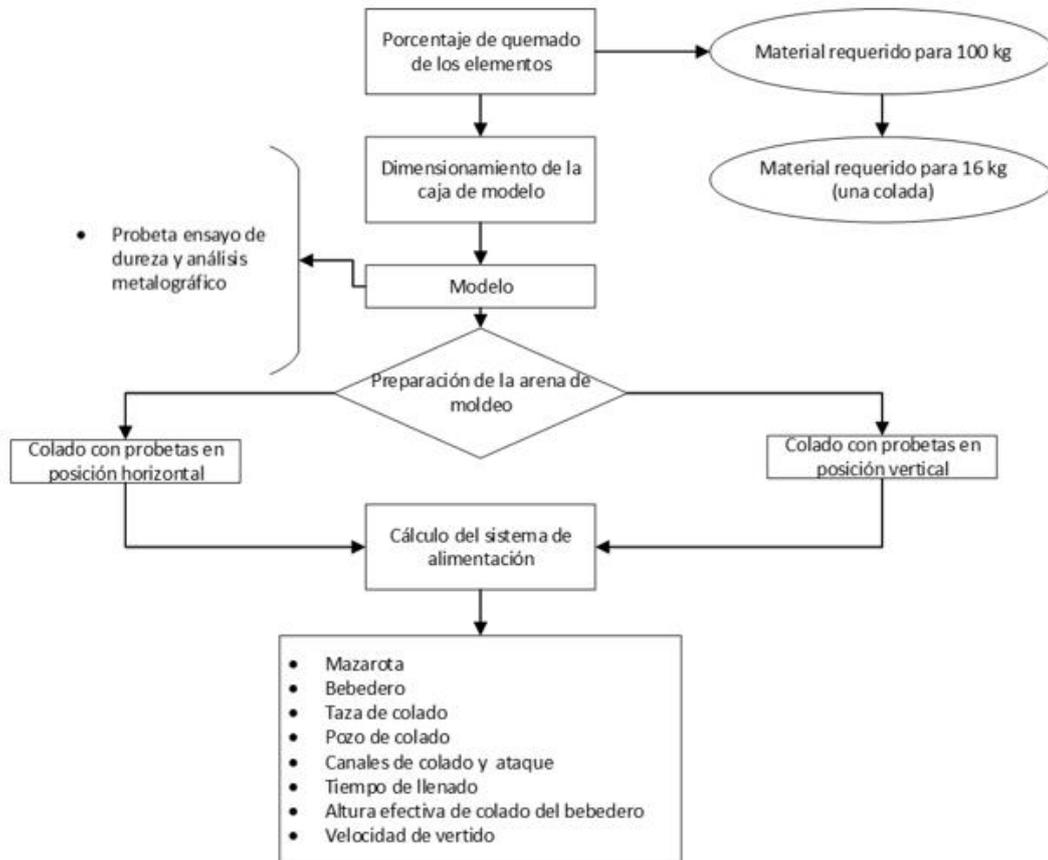


Figura 2.1 Esquema preproceso de fundición.
(Fuente: Propia)

Para lograr conseguir la composición química específica en cada colada, se utilizaron materias primas de alta pureza para garantizar que no se incorporen elementos adicionales a la composición prevista, detallada en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Cantidad de sustancias necesarias para obtener 16 kg de una aleación compuesta por cobre y cinc, junto con la adición de ferro-silicio.

Elementos	% Requerido	Material (Kg)
0.5 % de Ferro – Silicio		
Cobre	59.885	9.6
Cinc	42.525	6.4
Silicio	0.5375	0.085
1 % de Ferro – Silicio		
Cobre	59.885	9.5
Cinc	42	6.2
Silicio	1.075	0.16
1.5 % de Ferro – Silicio		
Cobre	59.885	9.7
Cinc	41.475	6.4
Silicio	1.612	0.25
2 % de Ferro – Silicio		
Cobre	59.885	9.6
Cinc	40.950	6.05
Silicio	2.150	0.325

(Fuente:[126])

2.2. Simulación del proceso de fundición de la aleación Cu – Zn – Si para el colado de probetas en posición vertical y horizontal

2.2.1. Simulación por computadora

La simulación por computadora del proceso de fundición implicó el uso de herramientas para el modelado virtual y el análisis del flujo de material en estado líquido, solidificación y otros fenómenos relevantes [130]. Esto permitió interpretar cómo se comporta el material durante la fundición y cómo interactúa con el molde, las condiciones ambientales y otros factores. La simulación proporcionó información para optimizar el diseño del proceso de fundición, predecir posibles defectos, mejorar la calidad y eficiencia del producto final [131 - 132]. A continuación, se describe detalladamente la forma en que se llevó a cabo el procedimiento de simulación del proceso de fundición (Figura 2.2) y se establecieron las características fundamentales del modelo.

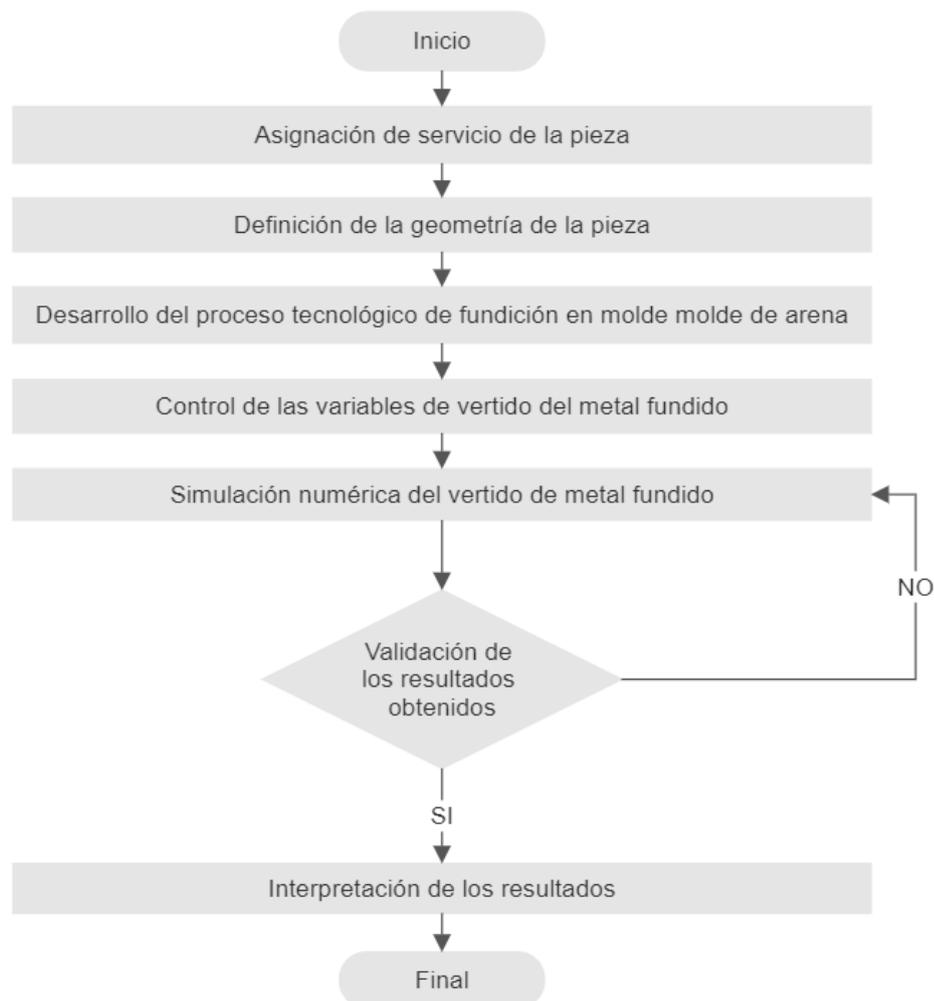


Figura 2.2 Descripción del procedimiento utilizado en el proceso de fundición en molde de arena. (Fuente: modificado de [107])

- Se definió el dominio geométrico en el que se desarrolla el problema.
- Se especificó el tipo de elemento que se utilizará en el análisis.
- Se determinaron las propiedades de los elementos que se componen el modelo.
- Se establecieron las características geométricas de los elementos, incluyendo sus dimensiones y formas.
- La conexión entre elementos se creó a través de un proceso de mallado.
- Se describieron las restricciones físicas, tales como condiciones de borde, que se aplicarán en el análisis.
- Se detallaron las cargas, temperaturas, voltajes u otras magnitudes pertinentes que influyen en el sistema.

Simulación por computadora – Altair Inspire Cast

El software Altair Inspire Cast proporciona una serie de cinco pasos básicos para configurar una simulación de fundición [116]. Estos pasos están agrupados en la definición de las entradas de metal fundido, la especificación de los parámetros involucrados y la ejecución del análisis. Esta secuencia de etapas puede visualizarse de manera ilustrativa en la Figura 2.3.

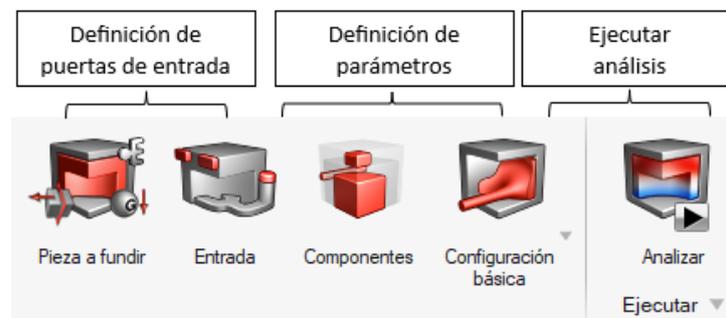


Figura 2.3 Pasos para la configuración de la simulación del proceso de fundición con el software Altair Inspire Cast.
(Fuente: Propia)

- **Pieza a fundir:** Se establecen parámetros para la fundición, incluyendo la selección del material, la temperatura de entrada del metal en estado líquido y la orientación respecto a la gravedad.
- **Entrada:** Se determina la ubicación de los puntos de entrada o superficies que desempeñarán la función de puntos de entrada del metal fundido.
- **Componentes:** Se crean diversos componentes del sistema de alimentación con el propósito de optimizar la eficiencia del proceso de llenado del molde y la consiguiente solidificación del material fundido.

- **Configuración Básica:** Se define el método de fundición a llevar a cabo y se establecen los valores de los parámetros operativos correspondientes.
- **Analizar:** Se definen los análisis necesarios y se procede a la generación de la malla para visualizar la simulación de manera detallada.

a) Definición de la geometría

En esta fase, se determinó la forma, dimensiones y disposición espacial del objeto o estructura en cuestión con el objetivo de describir y caracterizar la geometría del componente o sistema a analizar. Cada aspecto geométrico relevante como longitudes, diámetros, ángulos, áreas y volúmenes deben ser definidos según las especificaciones y requerimientos. Esta definición geométrica sirvió de base para el análisis posterior, permitiendo la creación de modelos matemáticos y numéricos que reflejen la realidad física del sistema en estudio [116].

La fase de modelado comenzó con la definición de la geometría del sistema de fundición. Las herramientas de simulación actuales en el ámbito de las fundiciones permitieron la integración de diseños asistidos por computadora (CAD, por sus siglas en inglés) de otros programas especializados. Es de gran importancia que este proceso de modelado considere todos los componentes del sistema de alimentación que tengan un impacto sustancial en los procesos de llenado y solidificación del material.

La Figura 2.4 muestra una representación visual de la configuración integral de los sistemas de alimentación junto con las probetas de interés a producir. Estos diseños se crearon utilizando el software SolidWorks y posteriormente importados al programa Altair Inspire Cast.

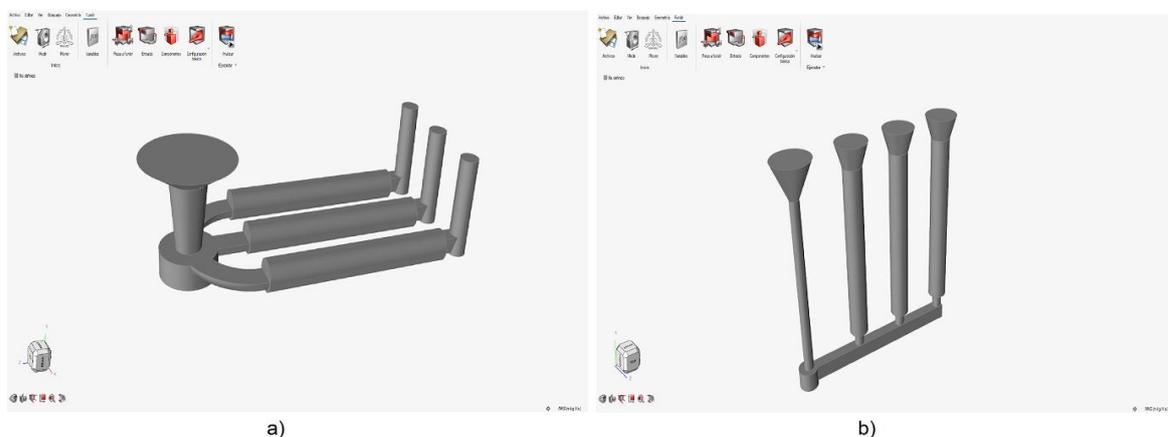


Figura 2.4 Pantalla de inicio software Altair Inspire Cast. a) diseño probetas en posición horizontal y b) diseño de probetas en posición vertical.
(Fuente: Propia)

I. Pieza a fundir

Una vez importado el diseño del sistema de alimentación se definió el tipo de material, así como la temperatura correspondiente al metal líquido que sería vertido al molde. Posteriormente, se determinó la dirección de la gravedad para delimitar la trayectoria de movimiento del material fundido, como se muestra en la Figura 2.5.

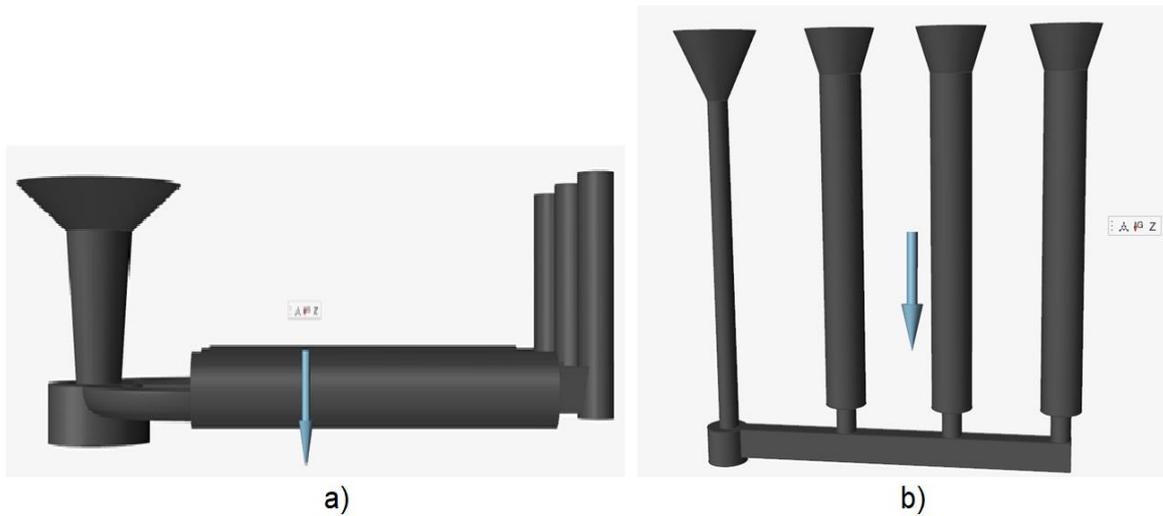


Figura 2.5 Determinar la orientación de la gravedad. a) Probetas en posición horizontal y b) Probetas en posición vertical.
(Fuente: Propia)

II. Entrada

Se identificó el punto de ingreso del metal en estado líquido y se configuró su estructura según el diseño de la taza de colado, como se aprecia en la Figura 2.6.



Figura 2.6 Entrada metal líquido. a) Probetas en posición horizontal y b) Probetas en posición vertical.
(Fuente: Propia)

b) Determinación de los parámetros del material y del proceso

Es importante establecer las definiciones de los parámetros que caracterizan tanto al material utilizado como al proceso de fundición. Estos parámetros tienen un rol relevante en la simulación y el modelado de fundiciones porque afectan la forma en que el material fluye, se solidifica y se comporta durante todo el proceso [116].

Las propiedades del material son propiedades intrínsecas del metal o aleación que se va a fundir. Estos pueden incluir la composición química, propiedades físicas y térmicas, conductividad, densidad y otros factores que determinan cómo el material interactúa con el proceso de fundición [116]. Estos datos son importantes para definir cómo se comportará el material durante la solidificación y el enfriamiento.

Los parámetros de operación, por otro lado, se refieren a las condiciones y variables que caracterizan el proceso de fundición. Esto puede incluir la temperatura de fundición, la velocidad de llenado del molde, la presión aplicada, el tiempo de enfriamiento y otros aspectos específicos del proceso. Estos parámetros del material y procesos se determinan para obtener resultados de simulación consistentes y representativos de la realidad.

III. Componentes

En esta fase se incorporaron diversos elementos para optimizar la eficiencia del sistema de alimentación durante el proceso de fundición, como se muestra en la Figura 2.7. En el diseño del sistema de alimentación para la producción de probetas propuesto en el presente estudio, se incluyeron previamente los componentes necesarios para asegurar el adecuado llenado de las cavidades, teniendo en cuenta la posición horizontal y vertical de las probetas. Por lo tanto, en esta etapa se ajustaron las dimensiones, la temperatura y el tipo de molde a emplear. Además, se generó una representación visual del diseño del sistema de alimentación dentro del molde, como se muestra en la Figura 2.8.



Figura 2.7 Componentes del sistema de alimentación y molde.
(Fuente: Propia)

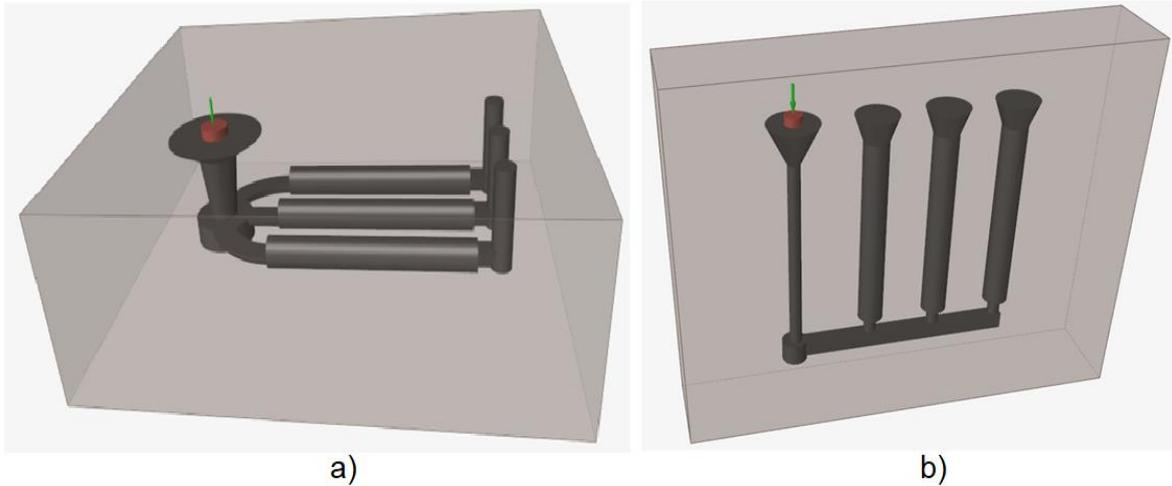


Figura 2.8 Molde. a) Probetas en posición horizontal y b) Probetas en posición vertical.
(Fuente: Propia)

IV. Configuración Básica

Se procedió a elegir el método de fundición que se utilizaría para producir las piezas requeridas. En este contexto, se optó por la fundición por gravedad, que implicaba el ingreso de diversos parámetros para lograr una simulación que reprodujera fielmente las condiciones del proceso de vertido (Figura 2.9). Entre los aspectos de mayor relevancia que debían configurarse para la fundición por gravedad destacan los siguientes parámetros:

- Velocidad de vertido
- Tiempo de llenado
- Altura de la cuchara

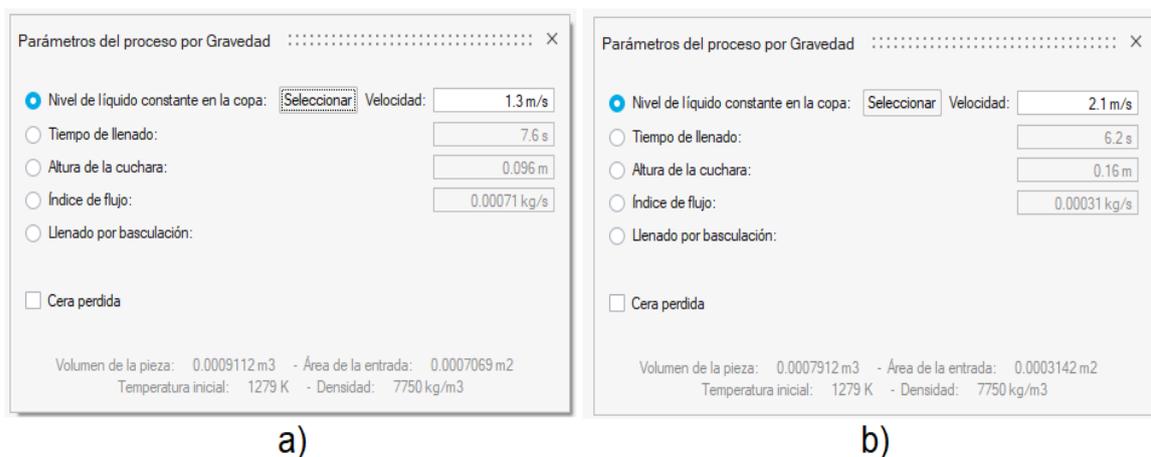


Figura 2.9 Parámetros de vertido. a) Probetas en posición horizontal y b) Probetas en posición vertical.
(Fuente: Propia)

V. Analizar

En este punto se definieron los estudios necesarios para el análisis y los parámetros que acreditan la fiabilidad de los resultados. Por otro lado, se estableció que tipo de mallado se utilizaría para la simulación. Estos aspectos se representan de manera visual en la Figura 2.10 y proporcionan una guía para ejecutar la simulación.

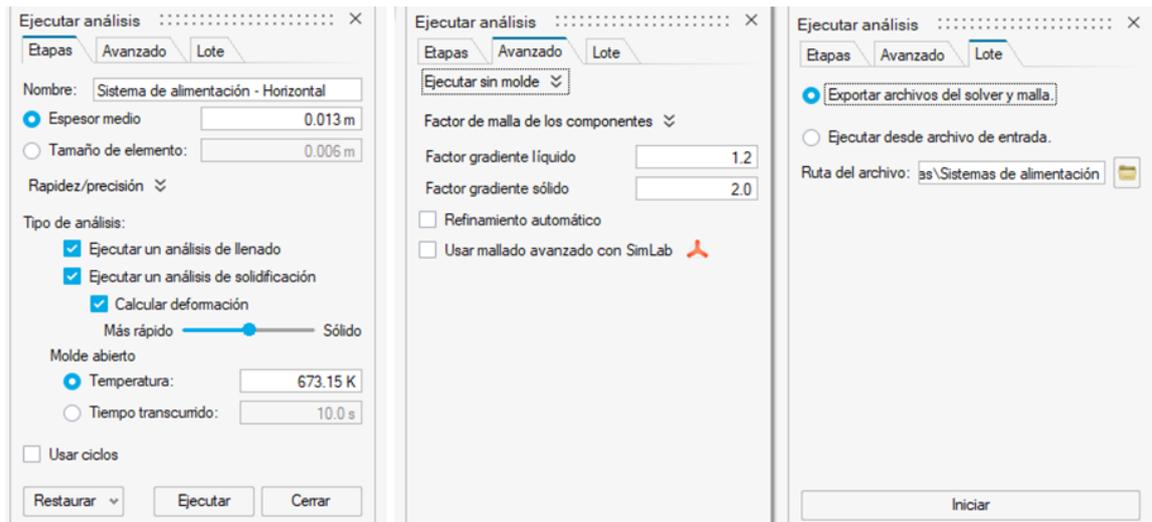


Figura 2.10 Configuración de análisis y mallado.
(Fuente: Propia)

i. Mallado de la geometría

El siguiente paso en el proceso de simulación implicó la generación de una malla para la configuración geométrica previamente definida. El mallado, también denominado discretización, divide la geometría en elementos más pequeños y manejables para facilitar el análisis numérico. Esta división es importante para realizar cálculos de las propiedades y comportamientos del sistema de fundición en cada elemento. Un mallado adecuado es crucial para obtener resultados precisos y confiables.

Los puntos de interés en la malla corresponden a los puntos de la geometría donde se resuelven las ecuaciones para los valores de las variables clave. Las conexiones entre estos puntos, representadas por las líneas de la malla, actúan como vías para interpolar las principales variables en función de sus valores en los nodos [107].

Es importante considerar la finura de la malla, ya que este factor tiene un impacto directo en la precisión de los resultados. Una malla más fina proporciona mayor precisión, pero también incrementa el tiempo de cálculo debido al mayor número de elementos [115].

La Figura 2.11 muestra la malla que ha se estableció para asegurar el comportamiento adecuado del metal líquido durante la ejecución del proceso de fundición. Esta malla cumple la función de garantizar que el material fundido interactúe efectivamente con los diversos componentes del sistema de alimentación.



Figura 2.11 Malla. a) Probetas en posición horizontal y b) Probetas en posición vertical.
(Fuente: Propia)

ii. Simulación

La simulación del proceso de fundición requirió el uso de un software especializado para el modelado y análisis virtual de cada fase. Comprendió desde el vertido inicial del metal fundido en el molde hasta que el material solidifique. Esta representación virtual permitió una representación 3D de la forma en que interactúan los diferentes componentes y factores durante el proceso de fundición. Esto posibilitó la identificación de posibles defectos, la optimización del diseño y la toma de decisiones que tienen como objetivo aumentar la calidad y la eficiencia del producto final.

En esta fase, se procedió a resolver las ecuaciones fundamentales que rigen el comportamiento del proceso de llenado y solidificación del material en una estructura de malla. Esto se logró mediante especificaciones de materiales y parámetros del método. Las ecuaciones se aplicaron en cada punto de la malla para evidenciar cómo se desarrolló el proceso en términos del flujo y enfriamiento del metal fundido, así como la formación y solidificación de la pieza. Este método numérico permitió una comprensión detallada de la interacción de los factores y el proceso en general.

c) Evaluación de los resultados

En esta fase, se analizaron y evaluaron los resultados de la simulación por computadora del proceso de fundición. Los datos generados durante la simulación se analizaron para comprender cómo se comportaba el material durante el llenado y la solidificación. Esto implicó evaluar la distribución de temperatura, velocidades de flujo, patrones de solidificación y otros aspectos relevantes. Los resultados se compararon con las expectativas teóricas y las condiciones de producción experimentales para verificar la efectividad y precisión de la simulación. El análisis de los resultados se utilizó para obtener información sobre el comportamiento del proceso y tomar decisiones para optimizar y mejorar el diseño.

2.3. Proceso experimental de fundición

2.3.1. Proceso de fundición

En la fabricación de materiales metálicos, la fundición es un método metalúrgico versátil e indispensable. Su éxito depende del diseño y parámetros de operación. El sistema de alimentación, la selección del material, el control del llenado, solidificación y la optimización del proceso son factores clave para garantizar la calidad y eficiencia en la producción de piezas fundidas [133].

I. Molde y Modelo

La fase inicial del proceso de fundición implicó la concepción y configuración de los componentes. Las herramientas informáticas de diseño asistido por computadora resultaron de gran utilidad para la concepción de representaciones tridimensionales digitales, lo que permitió la creación de los componentes necesarios para llevar a cabo el proceso.

La Figura 2.12 ilustra el diseño de la caja de moldeo para la obtención de probetas en posición horizontal y la representación de dicha caja en madera. Según esta interpretación, se realizaron ajustes específicos en las conexiones laterales de la caja para facilitar su extracción después de que el molde, confeccionado en resina, experimento el proceso de solidificación. Para llevar a cabo esta tarea se colocaron bisagras en tres lados de la caja, mientras que en el cuarto lado se instalaron tornillos que se pueden retirar para abrir la caja que resguarda el molde. Estas modificaciones a la estructura de la caja de moldeo permitieron un acceso y extracción eficiente, una vez que se ha completado el proceso de solidificación.

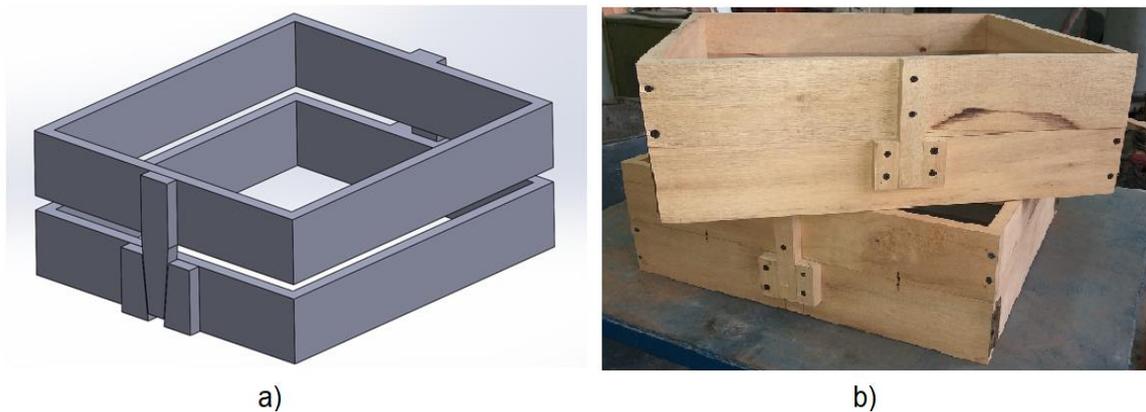


Figura 2.12 Cajas de moldeo probetas en posición horizontal. a) Diseño caja de moldeo, b) Caja de moldeo en madera.
(Fuente: Propia)

La Figura 2.13 proporciona una representación visual que describe las medidas y proporciones predefinidas para fabricar las cajas de moldeo. Estas magnitudes se determinaron teniendo en consideración tanto las dimensiones requeridas para las probetas como la configuración del sistema de alimentación diseñado.

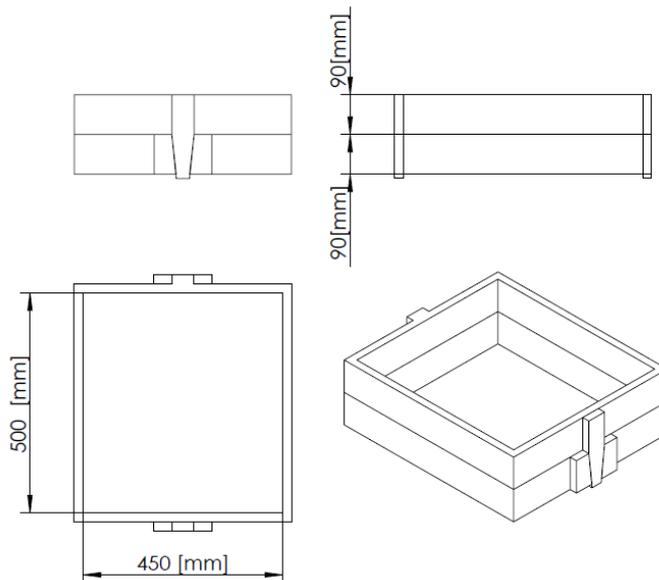


Figura 2.13 Dimensiones caja de moldeo probetas en posición horizontal.
(Fuente: Propia)

El diseño del modelo mostrado en la Figura 2.14 ha sido concebido con el propósito de ser sometido a procesos de mecanizado para obtener una probeta destinada a ensayos de tracción según los lineamientos de la norma ASTM E8 [134]. Adicionalmente, el modelo fue configurado de tal manera que posibilite la obtención de probetas para realizar ensayos, como metalografía, dureza, microdureza, entre otros.



Figura 2.14 Modelo deslizante probetas en posición horizontal.
(Fuente: Propia)

La Figura 2.15 proporciona una representación gráfica que detalla las dimensiones y relaciones geométricas previamente establecidas para crear el modelo en madera. Se puede observar que los modelos fueron equipados con componentes que facilitan su ensamblaje con el propósito de formar una sola pieza. Además, estos modelos incorporan perforaciones estratégicas que cumplen un papel crucial en el proceso de extracción. Estas perforaciones fueron utilizadas en la etapa en la que se retira el modelo una vez que la resina del molde se ha solidificado.

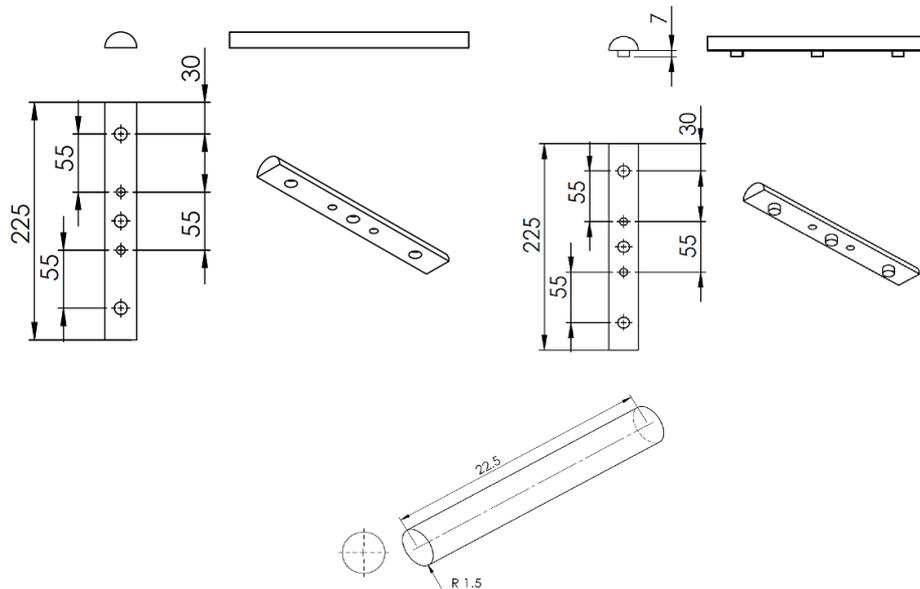


Figura 2.15 Dimensiones del modelo deslizante para probetas en posición horizontal.
(Fuente: Propia)

La Figura 2.16 muestra la configuración definida para el modelo. El modelo ha sido concebido con la finalidad de generar, a partir de él, una probeta que cumpla con los requisitos del ensayo de tracción conforme a la norma ASTM E8 [134]. Asimismo, el diseño del modelo posibilitó la adquisición de probetas cilíndricas que sirvieron para realizar diversos ensayos orientados a la caracterización del material en cuestión.

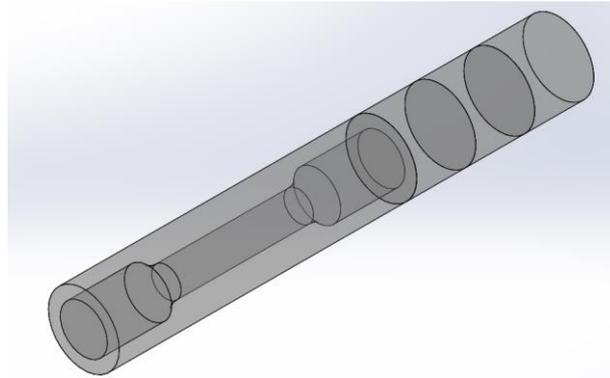


Figura 2.16 Configuración del modelo.
(Fuente: Propia)

Con el objetivo de producir moldes que permitan la obtención de probetas posicionadas con una orientación vertical, se desarrolló una metodología basada en el diseño de moldes con una configuración de capucha – base [2]. Estos moldes fueron diseñados para contener el sistema de alimentación requerido, además del modelo de la pieza a fabricar. Esto se puede observar en la Figura 2.17, donde se muestra la disposición del sistema de alimentación en conjunto con la estructura del molde.

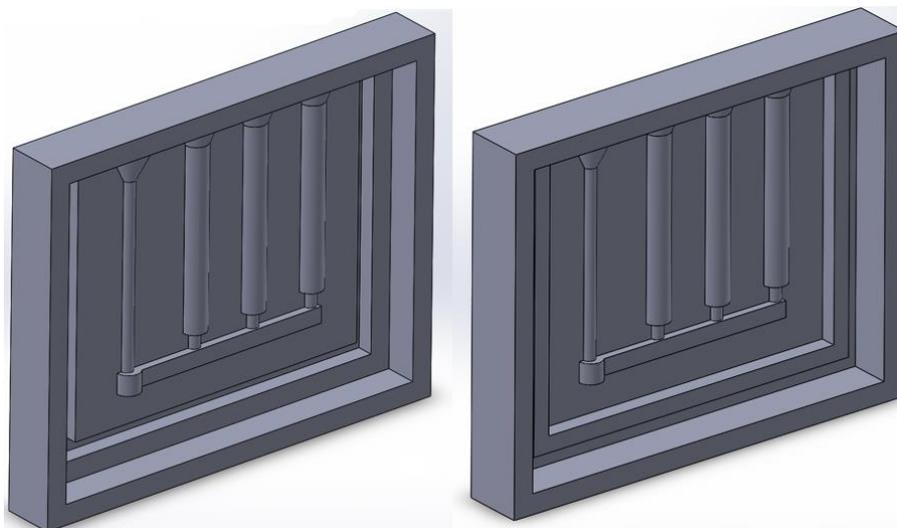


Figura 2.17 Diseño caja de moldeo probetas en posición vertical.
(Fuente: Propia)

La Figura 2.18 proporciona un desglose de la configuración y las dimensiones del modelo capucha – base, considerando todas las especificaciones contempladas en el diseño del sistema de alimentación. Esta representación gráfica detalla las proporciones y elementos esenciales del modelo, asegurando el cumplimiento de las directrices establecidas.

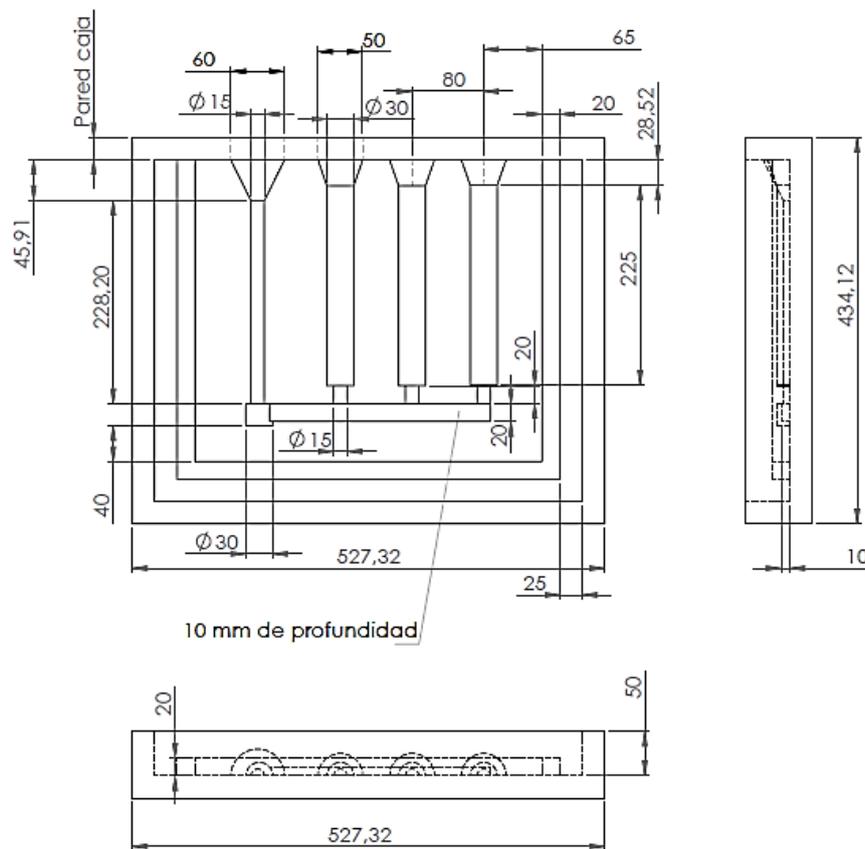


Figura 2.18 Dimensiones caja de moldeo probetas en posición vertical.
(Fuente: Propia)

II. Arena de moldeo

Para llevar a cabo esta investigación, se empleó arena sílice como el material para la elaboración del molde, debido a sus excelentes propiedades refractarias, elevado punto de fusión, costo económico y capacidad de producir un acabado de alta calidad [1].

En este contexto, la arena sílice seleccionada debía cumplir ciertos parámetros que aseguraran la obtención de moldes con características óptimas. Entre estas características se incluyen la permeabilidad, compactabilidad y niveles adecuados de humedad, entre otros factores relevantes. Para conseguir los mejores resultados con estas cualidades mencionadas anteriormente, es importante que el tamaño de grano de la arena se encuentre en un rango entre 0,5 y 2 mm [129].

En este estudio, en particular, se proponen dos configuraciones de arena diferentes en conjunción con la disposición del sistema de alimentación, como se muestra en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4 Especificaciones arena de moldeo.

Molde	Características	Valores		Imagen	
Molde probetas en posición horizontal	- Arena nueva.	Arena	60 kg		
	- Resinas fenólicas de uretano, compuestas por dos variedades de resina y un catalizador.	Resina A	3,5 %	2,1 kg	
		Resina B	1,26 %	0,756 kg	
		Catalizador	3,5 %	2,1 kg	
Molde probetas en posición vertical	- Arena mixta (50 % reciclada y 50 % nueva).	Arena	30 kg		
	- Resinas furánicas compuestas de una resina y un catalizador.	Resina SHENGQUAN	0,8 %	0,24 kg	
		Catalizador SHENGQUAN	0,48 %	0,145 kg	

(Fuente:[126])

III. Equipos para elaboración de moldes

Este equipo desempeña un papel fundamental para asegurar la homogeneización de la arena y resinas utilizadas en la preparación de los moldes para el vertido de metal líquido. Su principal propósito radica en combinar de manera uniforme la arena y resinas necesarias para la fabricación de los moldes (Figura 2.19). Esta uniformidad garantiza que los moldes no tengan cambios en su composición y la reproducción de las piezas fundidas sea constante [135].



Figura 2.19 Mezcladora. Escuela Politécnica Nacional – Facultad de Ingeniería Mecánica (Laboratorio de Fundición).
(Fuente: Propia)

2.3.2. Sistema de alimentación

Su principal función es suministrar metal líquido a las cavidades del molde de forma controlada y eficiente, garantizando un llenado uniforme y completo. Esto es crucial para evitar defectos como la falta de material y la formación de porosidad debido a la presencia de aire atrapado [136].

En las fundiciones, se emplean diversos tipos de sistemas de alimentación, cada uno con sus ventajas y aplicaciones específicas. El diseño óptimo de los sistemas de alimentación garantiza la calidad de las piezas fundidas. Se deben tener en cuenta múltiples variables: el material, la geometría de la pieza, la velocidad y dirección de llenado, además de las particularidades del molde [137].

En el diseño del sistema de alimentación, se consideraron una variedad de aspectos técnicos para garantizar que el sistema sea eficiente, confiable y cumpla con los requisitos funcionales. La disposición y magnitud de los canales de alimentación permitieron un flujo constante y uniforme del metal líquido, evitando turbulencias y bolsas de aire. Es importante considerar la contracción del metal durante la solidificación para garantizar que se proporcione la cantidad de metal necesaria para contrarrestar la contracción y evitar defectos [136].

a) Mazarota

Una mazarota es una pieza de forma cónica o troncocónica, que se utiliza como parte del sistema de alimentación en el proceso de fundición. Se colocan estratégicamente en la

configuración del sistema de alimentación para facilitar el flujo del metal fundido hacia las cavidades de la pieza a fundir [138]. Este elemento debe ser el último en solidificarse para compensar la contracción que se produce durante el proceso de solidificación. La implementación de la mazarota ayuda a evitar defectos (poros y fisuras), proporcionando un aporte adicional de metal durante la solidificación.

b) Bebedero

Su finalidad es direccionar el flujo de metal fundido hacia las cavidades internas del molde, contribuyendo a la formación de las piezas deseadas. Aspectos que influyen en el proceso de vertido abarcan variables como la temperatura a la que se efectúa el vertido, la velocidad de colado, la generación de turbulencias y la configuración geométrica del bebedero [2]. La forma ideal de un bebedero es la de una hipérbola de cuarto grado, sin embargo, por motivos de fabricación esta geometría se sustituye por la de un cono truncado. La Figura 2.20 muestra una hipérbola de cuarto grado, representando la forma óptima que debe poseer el bebedero y sus componentes clave.

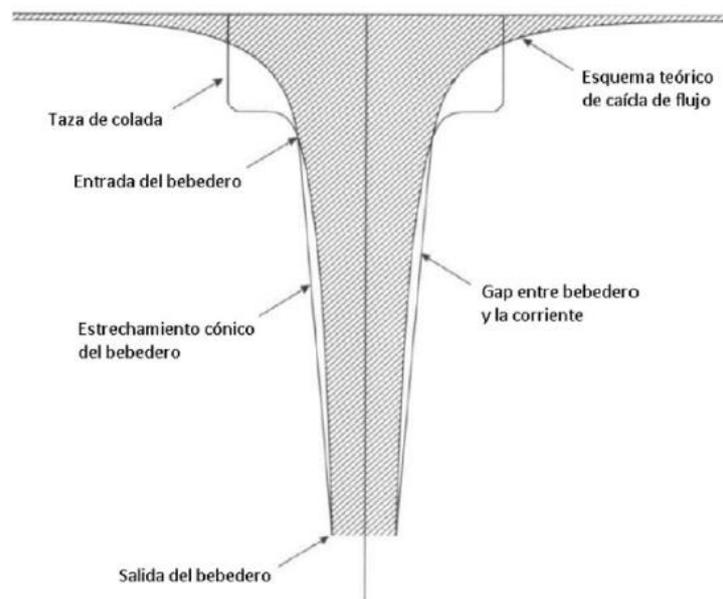


Figura 2.20 Configuración óptima del bebedero.
(Fuente: [49])

c) Taza de colado

Su función principal es servir como vía de entrada del metal líquido al molde. La taza de colado está ubicada estratégicamente en relación con la pieza a fundir y el sistema de alimentación asociado, con el objetivo de permitir un flujo uniforme del metal desde el crisol de colado hacia las cavidades del molde (Figura 2.21). Este arreglo ideal contribuye a

minimizar turbulencias y perturbaciones en el flujo, permitiendo una solidificación controlada de la pieza final libre de defectos [139].

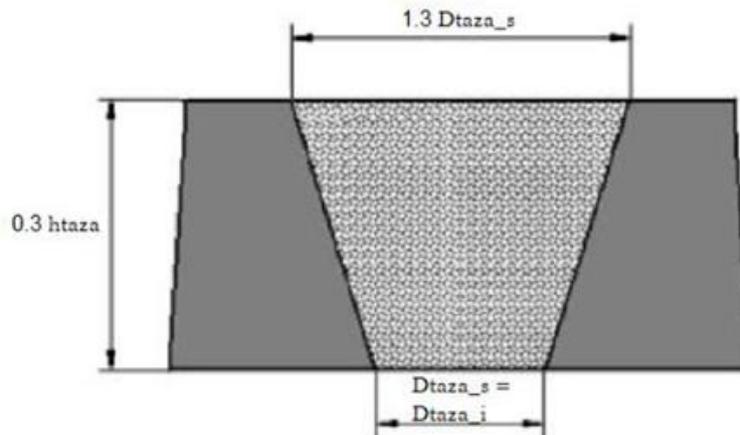


Figura 2.21 Determinación de las dimensiones apropiadas de la taza para el proceso de colado.
(Fuente:[139])

d) Pozo de colado

El pozo de colado se denomina la zona de enlace entre el bebedero y el conducto de colado. Su función es garantizar una transición suave en el movimiento del metal líquido y al mismo tiempo se encarga de retener la escoria presente en la colada. Según García Chacón, la elección más utilizada es adoptar una configuración cilíndrica debido a su eficiencia y simplicidad [139]. La Figura 2.22 muestra esquemáticamente las interrelaciones entre la superficie inferior del bebedero en comparación con el pozo de colado.

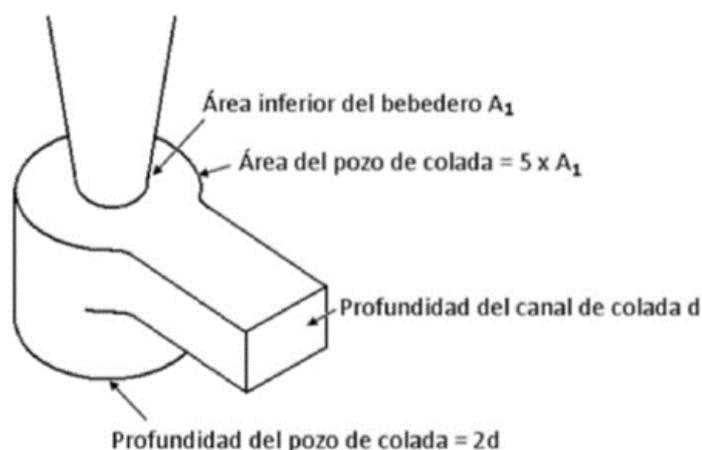


Figura 2.22 Cálculo de las dimensiones adecuadas del pozo de colado.
(Fuente: [139])

e) Canales de colado y ataque

Estos canales sirven para facilitar la entrada y distribución uniforme del metal líquido en el molde. Los canales de colado sirven para dirigir el flujo de material fundido hacia el área de la cavidad moldeada. Por otro lado, los canales de ataque están ubicados en las áreas donde se espera que el material sólido sufra contracción o reducción de volumen durante la solidificación [49]. Los canales de ataque proporcionan un suministro adicional de metal fundido, compensando esta contracción y reduciendo la probabilidad de defectos en la pieza final (Figura 2.23). En conjunto, estas estructuras optimizan la distribución del metal líquido y minimizan las perturbaciones durante el proceso de solidificación.

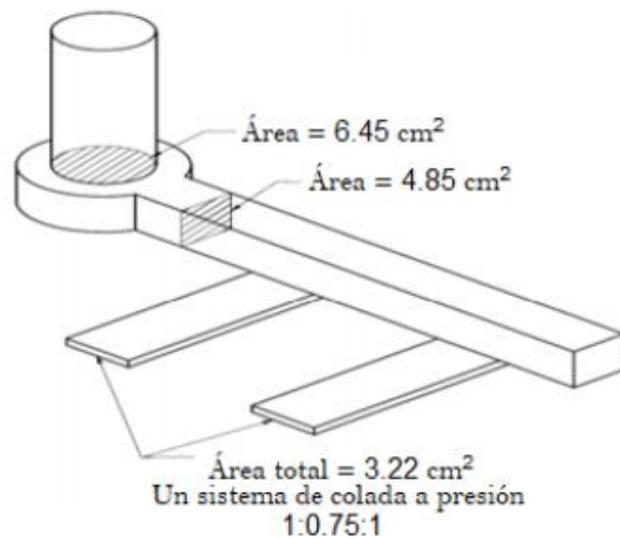


Figura 2.23 Proporción de dimensiones en los conductos de alimentación.
(Fuente: [49])

Diseño del sistema de alimentación

Una vez determinadas las dimensiones de los componentes requeridos, se inició la fase de diseño, utilizando herramientas como el software CAD [5]. Este programa ofrece la posibilidad de generar virtualmente los elementos y sistemas asociados al proceso de fundición. Esto proporciona una visión detallada de cómo se comportan y relacionan entre sí las diferentes partes en la realidad.

El siguiente paso consiste en integrar el sistema de alimentación con el modelo de la pieza requerida. Este es un paso crítico, ya que implica asegurar que el flujo de metal fundido sea suficiente y adecuado para llenar todas las cavidades del molde de manera uniforme. La interacción entre el sistema de alimentación y el modelo de la pieza es crucial para evitar

defectos como contracción desigual, discontinuidades y áreas sin llenado en el producto final.

Es importante enfatizar que durante el diseño se deben tener en cuenta las especificaciones y requisitos de cada una de las probetas utilizadas en el molde. La disposición de las probetas dentro del molde puede afectar al curso del metal líquido y la forma en que se solidifica, lo que repercute directamente en las propiedades mecánicas y la calidad de los productos obtenidos.

La Figura 2.24 muestra una representación gráfica del diseño preestablecido para llevar a cabo el proceso de colado de las probetas en posición horizontal. Este diseño ha sido elaborado teniendo en cuenta las dimensiones establecidas para cada uno de los componentes que conforman el sistema de alimentación correspondiente.

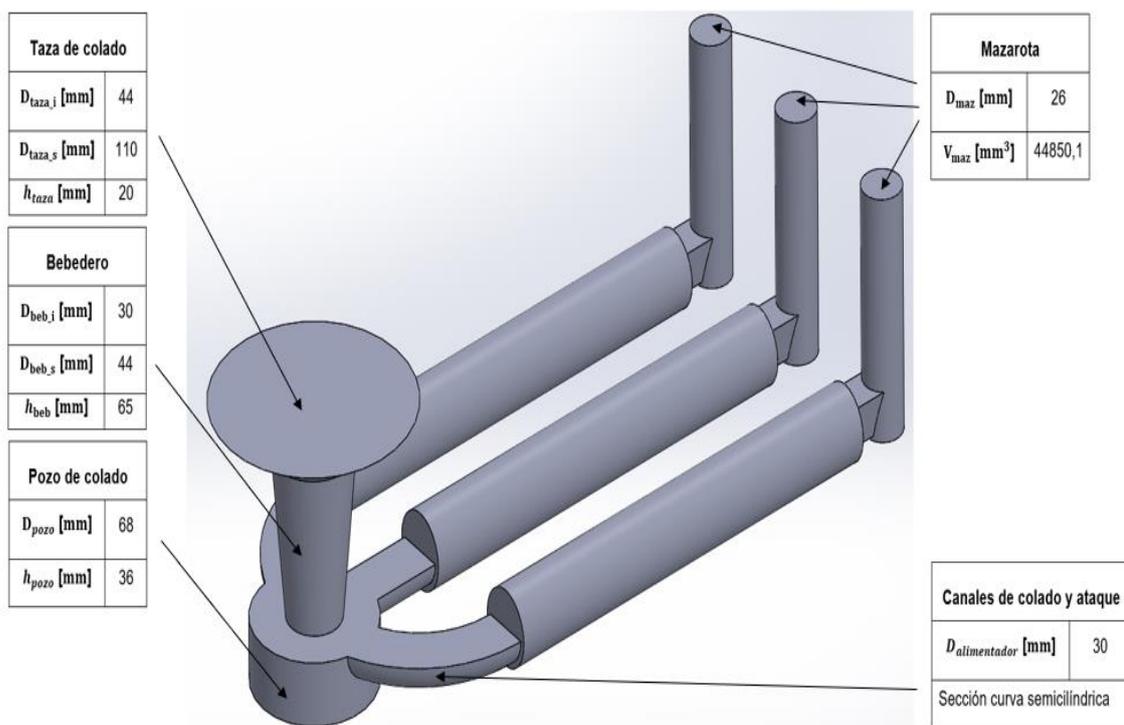


Figura 2.24 Sistema de alimentación probetas en posición horizontal.
(Fuente: Propia)

La Figura 2.25 presenta un esquema detallado del diseño definido para realizar el proceso de fundición de las probetas en posición vertical. Este diseño fue concebido considerando las medidas establecidas para cada uno de los elementos que integran el sistema de alimentación en este arreglo específico.

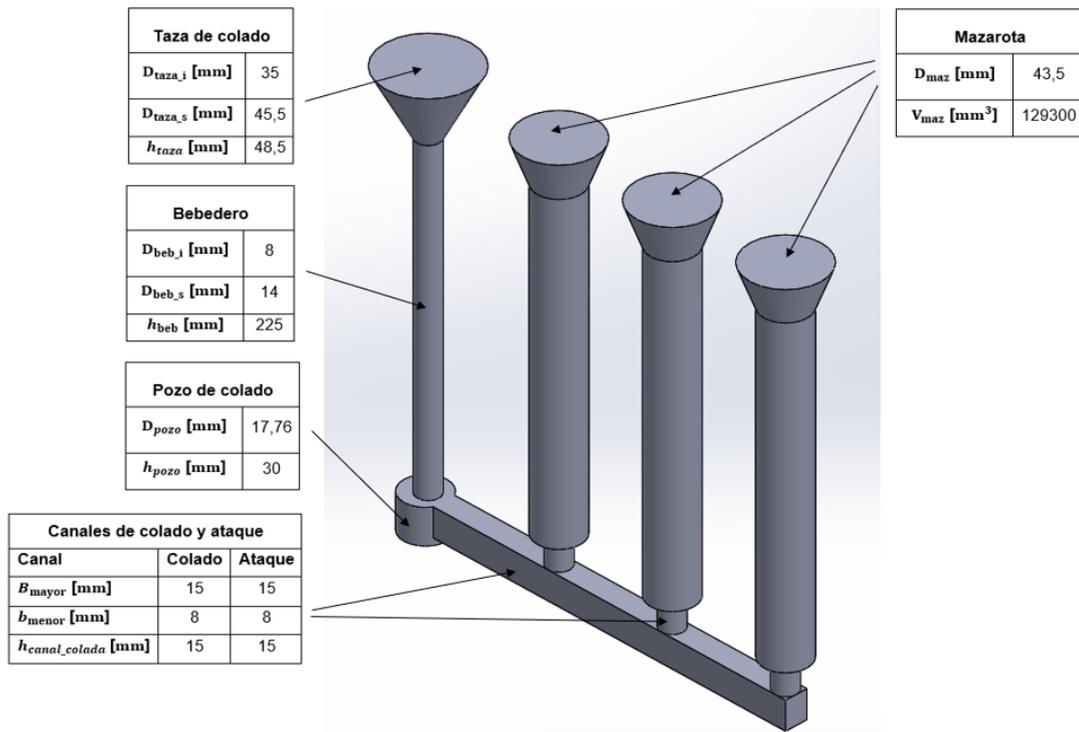


Figura 2.25 Sistema de alimentación probetas en posición vertical.
(Fuente: Propia)

2.3.3. Horno y elementos

a) Horno a diésel fijo de crisol móvil

El horno a diésel fijo de crisol móvil se caracteriza por tener una estructura estacionaria en la que el proceso de calentamiento se logra mediante la combustión controlada de combustible diésel. La energía generada por esta combustión se transfiere al crisol que contiene los materiales que se desean fundir, permitiendo elevar su temperatura hasta un nivel adecuado para el proceso de fusión [50].

El crisol móvil es un recipiente que puede trasladarse dentro y fuera del horno de forma controlada con la ayuda de las pinzas y el maneral [140]. Una vez que se ha alcanzado la temperatura predeterminada en los parámetros de operación de fundición de la aleación, esta configuración facilita la manipulación y extracción del material en estado líquido.

La Figura 2.26 muestra el horno de crisol móvil que funciona mediante diésel, ubicado en el Laboratorio de Fundición de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional. Las imágenes proporcionan una visión detallada del horno y exhibe la implementación de un sello de arcilla. Esta junta es importante debido a que se utiliza para lograr un cierre hermético entre el cuerpo del horno y la tapa, lo que garantiza un ambiente controlado en el interior del horno durante el proceso de fundición.



Figura 2.26 Horno a diésel fijo de crisol móvil.
(Fuente: Propia)

b) Crisol de grafito

El crisol es un componente primordial en el proceso de fundición (Figura 2.27). El crisol utilizado para llevar a cabo este estudio está elaborado en grafito debido a su resistencia a elevadas temperaturas. Constituye un elemento clave en la contención y fusión de materiales metálicos durante el proceso de fundición. Además, el grafito tiene una excelente conductividad térmica, esta propiedad, promueve una distribución uniforme del calor y ayuda a que el proceso de fundición sea más eficiente [129].



Figura 2.27 Crisol de grafito.
(Fuente: Propia)

c) Maneral

El maneral es una herramienta que se utiliza para transportar y verter de forma segura el metal líquido contenido en los crisoles utilizados en este proceso, como se muestra en la Figura 2.28. Este debe cumplir con los requisitos de resistencia y durabilidad para soportar las condiciones extremas de temperatura y peso inherentes a los crisoles cargados con metal en estado líquido.



Figura 2.28 Maneral.
(Fuente: Propia)

d) Escoreador

Es una herramienta que cumple un doble propósito: guiar el flujo del metal líquido durante el colado y retirar la escoria que tiende a acumularse en la superficie del crisol. La escoria está compuesta por impurezas y subproductos de reacciones químicas. Si no se maneja adecuadamente puede tener un impacto negativo en la calidad de la fundición.

Su geometría y dimensiones son determinantes para asegurar un colado preciso y controlado del metal líquido en los moldes (Figura 2.29). El escoreador permite un direccionamiento efectivo del flujo y evita turbulencias que podrían provocar defectos en las piezas fundidas.



Figura 2.29 Escoreador.
(Fuente: Propia)

e) Pinzas

La función práctica de las pinzas se manifiesta en la extracción de los crisoles del horno una vez que la colada ha alcanzado la temperatura ideal para el vertido. Un manejo preciso y cuidadoso es crítico en estos momentos para evitar derrames, salpicaduras y accidentes. La Figura 2.30 muestra la configuración de las pinzas utilizadas para la extracción de crisoles de mayor capacidad.



Figura 2.30 Pinzas.
(Fuente: Propia)

f) Antorcha

La Figura 2.31 presenta una antorcha que utiliza gas licuado de petróleo (GLP). La flama de la antorcha se emplea para preparar y acondicionar el molde antes de verter el metal líquido. Esta herramienta se utiliza para calentar el interior del molde, específicamente las cavidades que albergan tanto el modelo como el sistema de alimentación. Esta acción se lleva a cabo para evitar la formación de gradientes de temperatura bruscos cuando el metal líquido ingrese al interior del molde y para promover un flujo de metal uniforme y consistente durante el colado.



Figura 2.31 Antorcha de gas licuado de petróleo (GLP).
(Fuente: Propia)

g) Pirómetro

La función de esta herramienta es medir la temperatura en diferentes etapas del proceso de fundición para garantizar las especificaciones establecidas en el estudio. Por ejemplo, al instante de la extracción del crisol del horno o al verter el metal líquido en el molde. Su diseño y calibración aseguran una medición precisa de la temperatura en entornos de alta temperatura, como los hornos utilizados en el proceso de fundición (Figura 2.32).



Figura 2.32 Pirómetro.
(Fuente: Propia)

h) Bórax y vidrio

El bórax tiene un rol significativo dentro de la elaboración de aleaciones de cobre (Cu). Su función principal es disminuir la cantidad de escoria, mejorando así la fluidez del material. El bórax ayuda a evitar la oxidación de los metales durante el proceso de fundición y favorece la mezcla de los diferentes componentes presentes en la aleación [79].

Por otro lado, el vidrio se incorpora a la colada para formar una capa protectora sobre la superficie del metal líquido. Esta capa actúa como aislante y evita que el material quede expuesto al oxígeno atmosférico. El motivo de este método es la necesidad de evitar la oxidación del metal cuando entra en contacto con el oxígeno.

i) Equipo de protección personal

Los equipos de protección personal están diseñados según las normas de seguridad y prevención de riesgos. Su diseño y elección de materiales tienen como objetivo proporcionar una barrera eficaz contra las condiciones extremas que se encuentran en el entorno al proceso de fundición, incluyendo altas temperaturas, chispas y posibles salpicaduras de metal líquido. Este equipo es esencial para minimizar la exposición del personal a peligros inherentes en estas operaciones [141].

En la práctica, el equipo de protección personal se convierte en una medida de protección imprescindible. Durante la extracción del crisol del horno, implica el manejo de objetos a altas temperaturas y al momento del vertido de la colada. Esto permite a los operadores realizar estas tareas críticas con confianza y seguridad, minimizando el riesgo de lesiones.

- Traje aluminizado resistente a altas temperaturas
- Casco aluminizado resistente a altas temperaturas
- Guantes de cuero
- Botas de seguridad con punta de acero
- Mascarilla

2.3.4. Parámetros de colado

Los parámetros de operación como la temperatura del metal fundido, la velocidad de vertido, el diseño del sistema de alimentación y la configuración de los componentes que lo conforman juegan un papel importante en la calidad de las piezas fundidas [140].

Un adecuado control y optimización permite la producción de piezas fundidas con propiedades mecánicas y microestructurales ideales, contribuyendo al éxito y la calidad en la elaboración de productos industriales.

I. Tiempo de llenado

El tiempo necesario para que el metal en estado líquido llene por completo todas las cavidades del molde se denomina tiempo de llenado (Tabla 2.5). Para evitar la formación de defectos conocidos como juntas frías en el interior del molde, se procuró minimizar este tiempo de colado [49].

Tabla 2.5 Tiempo de llenado, tanto para el colado de probetas en orientación horizontal como vertical.

Colado	Tiempo (s)
Colado probetas en posición horizontal	7,63
Colado probetas en posición vertical	6,15

(Fuente:[126])

II. Velocidad de vertido

La magnitud del flujo con el que el metal líquido se dirige al interior del molde durante el proceso de fundición se conoce como velocidad de vertido (Tabla 2.6). El caudal de metal líquido durante el colado es inversamente proporcional al tiempo necesario para llenar el molde. Por tanto, aumentar la velocidad de vertido reduce el tiempo necesario para llenar completamente el molde [49].

Tabla 2.6 Velocidad de vertido, tanto para el colado de probetas en orientación horizontal como vertical.

Colado	Velocidad (m/s)
Colado probetas en posición horizontal	1,3
Colado probetas en posición vertical	2,1

(Fuente: [126])

III. Temperatura

La temperatura del metal fundido en el momento del colado influye directamente en la fluidez del material y en su capacidad para llenar los moldes de manera uniforme. Una temperatura insuficiente puede provocar problemas como la solidificación prematura o la formación de inclusiones no deseables [142]. La Tabla 2.7 detalla las mediciones de temperatura que fueron registradas con un pirómetro en distintos momentos durante el proceso de fundición.

Tabla 2.7 Temperaturas del proceso de colado.

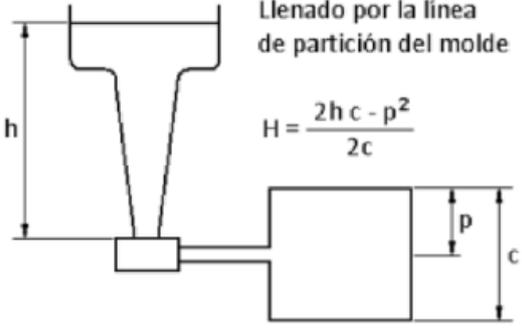
Descripción	Temperatura	Imagen
Horno a diésel fijo de crisol móvil	1180 °C	
Colada en el crisol una vez extraída del horno	1105 °C	
Colado probetas en posición horizontal	1035 °C	
Colado probetas en posición vertical	970 °C	

(Fuente:[126])

IV. Altura efectiva de colado

La distancia entre la superficie y la parte más alta del canal de entrada (taza de colado) se conoce como altura efectiva como se detalla en la Tabla 2.8. Esta separación varía en función del tipo de llenado del molde, que se puede dividir en tres variantes: llenado desde la parte superior, llenado desde la parte inferior y llenado a lo largo de la línea de partición [139].

Tabla 2.8 Altura efectiva, tanto para el colado de probetas en orientación horizontal como vertical.

Colado	Altura (cm)	Gráfico
Colado probetas en posición horizontal	9,62	 <p>Llenado por la línea de partición del molde</p> $H = \frac{2hc - p^2}{2c}$
Colado probetas en posición vertical	16,15	

(Fuente:[126, 139])

2.3.5. Proceso de fundición

Durante el proceso de fundición, los metales y aleaciones se moldean mediante la aplicación de calor. La Figura 2.33 muestra un esquema del proceso de fundición para producir la aleación Cu – Zn – FeSi. El proceso se inició precalentando el horno y colocando el sello de arcilla para crear una junta hermética al cerrar la tapa. Una vez completado este paso, se agregó el 50 % del cobre al crisol y se introdujo en el horno. Luego de completar esta fase, se esperaron 40 min para que el cobre comenzara a fundirse.

Tras la etapa de espera inicial, se procedió con la segunda carga, en la que se introdujo el 50 % de cobre restante junto con el Fe – Si según las especificaciones de composición. Tras esta carga, comenzó otra fase de espera, esta vez de 15 min, dando tiempo suficiente a los nuevos materiales para combinarse homogéneamente con el cobre previamente fundido y así asegurar una aleación uniforme.

La siguiente etapa del proceso consistió en la introducción de bórax y vidrio con el objetivo de eliminar impurezas y mejorar la fluidez del metal fundido. La adición de bórax y vidrio requirió un tiempo de permanencia de 30 min para que se produjeran correctamente las

reacciones químicas necesarias y se optimizara la calidad del material resultante. A continuación, se agregó el cinc durante un lapso de 5 min.

Una vez completados todos los pasos anteriores, finalmente se vertió el metal fundido en el molde previamente realizado para formar la pieza deseada. La temperatura y el proceso de colado fueron factores que se deben contemplar para evitar defectos en la pieza.

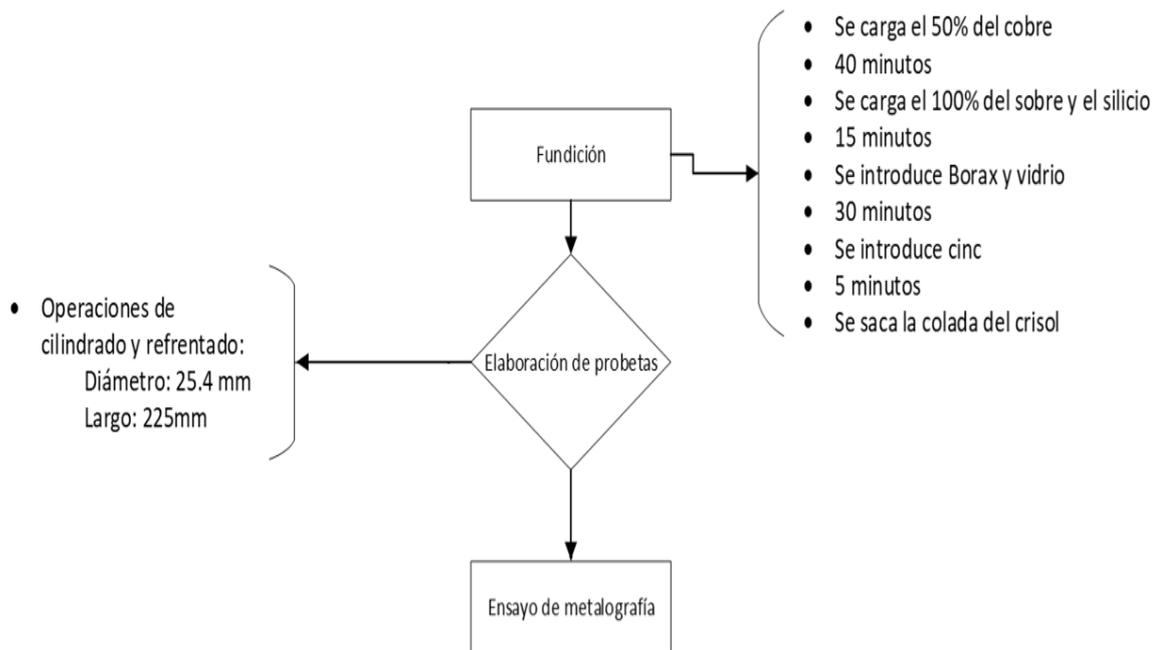


Figura 2.33 Esquema proceso de fundición aleación Cu – Zn.
(Fuente: Propia)

2.4. Caracterización de la aleación

2.4.1. Ensayos mecánicos

a) Ensayo de dureza

La dureza es una propiedad mecánica que mide la resistencia de un material a la deformación o penetración permanente. Hay una variedad de métodos para medir la dureza de un material, cada uno de los cuales se especializa en diferentes materiales y aplicaciones. Brinell, Rockwell, Vickers y Knoop son procedimientos comunes. En el ensayo Brinell, una esfera de acero endurecido mide la impresión que crea en la superficie de prueba. El ensayo Rockwell utiliza conos de diamante o bolas de acero con cargas específicas para evaluar la penetración y medir la profundidad de la huella. Los ensayos Vickers y Knoop utilizan pirámides de diamante con diferentes geometrías para medir la indentación [143].

En este estudio se utilizó el método de evaluación de dureza Rockwell, el cual fue seleccionado debido a la disponibilidad del equipo requerido en las instalaciones del Laboratorio de Metalografía de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional. Esta elección se basó en la ventaja de obtener una medición directa del grado de dureza a través del índice correspondiente.

La Tabla 2.9 describe las características del durómetro ubicado en el Laboratorio de Metalografía perteneciente a la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional.

Tabla 2.9 Especificaciones técnicas del equipo para el ensayo de dureza.

Descripción	Especificaciones	Equipo
Marca	HRADROCKER	
Modelo	150 – A	
Carga mínima	0 Kgf	
Sistema de aplicación de carga	Hidráulica	
Lectura	Analógica	
Tipo de indentador	Punta de acero 1/16 pulg	
Capacidad de carga	60, 100, 150 Kgf	

(Fuente: Propia)

El procedimiento seguido para el ensayo de dureza fue de acuerdo con la norma ASTM E18 (Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials) [144]:

- Se verificó que la temperatura se encontraba en el rango de 10 a 35 °C.
- Se comprobó la nivelación y la ausencia de impurezas en ambas superficies de la muestra.
- La escala adecuada fue seleccionada en el durómetro Rockwell B, girando la perilla lateral hacia la dirección correcta.
- El indentador fue posicionado de acuerdo con la escala elegida.
- El durómetro fue calibrado utilizando los estándares de calibración proporcionados.
- La muestra fue acomodada en el soporte del durómetro.
- Se llevó el indentador hasta estar en contacto con la superficie de prueba.
- Se aplicó una fuerza de prueba preliminar F_0 de 10 kgf (98 N).
- Después del intervalo de tiempo t_{TF} correspondiente a la fuerza preliminar F_0 , se estableció la referencia de posición.

- Se incrementó la fuerza por el valor necesario para la prueba adicional F_1 , con el fin de alcanzar la fuerza total de prueba F para la escala de dureza seleccionada.
- Se mantuvo la fuerza total F constante durante el período t_{TF} específico.
- Se retiró la fuerza adicional de prueba F_1 mientras se mantenía la fuerza preliminar F_0 .
- Se sostuvo la fuerza preliminar F_0 durante el tiempo adecuado para permitir la recuperación elástica del material de prueba.
- Al finalizar este intervalo, se estableció la profundidad final.
- Se calculó la diferencia entre la profundidad final y la línea base para determinar así el valor de dureza Rockwell.

b) Ensayo de microdureza

El ensayo de microdureza es una técnica de evaluación mecánica que permite medir la resistencia de un material a la penetración de un indentador bajo una carga específica. A diferencia de los ensayos de dureza tradicionales, que evalúan la resistencia macroscópica de un material, el ensayo de microdureza se centra en áreas pequeñas y específicas de la superficie de una pieza. Se realiza mediante un microindentador que aplica una carga a la superficie del material. La indentación resultante se midió con precisión, lo que permitió calcular la dureza del material.

La Tabla 2.10 detalla las especificaciones técnicas del microdurómetro ubicado en el Laboratorio de Metalografía perteneciente a la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional.

Tabla 2.10 Especificaciones técnicas del equipo para el ensayo de microdureza.

Descripción	Especificaciones	Equipo
Marca	METKON	
Modelo	DUROLINE - M	
Objetivos	10X, 40X	
Carga	10 – 1000 gf	
Tiempo de carga	5 – 99 s	
Cámara	Metkon	
Software	Kameram	

(Fuente: [145])

El procedimiento seguido para llevar a cabo el ensayo de microdureza se detalla a continuación:

- Se preparó el equipo para realizar el análisis de microdureza y se ajustaron los parámetros de carga y tiempo según las características del material a evaluar.
- La muestra fue colocada en el soporte de manera que no interfiera con las partes sujetas y se aseguró de que no entre en contacto con el indentador para evitar cualquier daño potencial.
- Se realizaron las marcas de indentación manteniendo una distancia entre la primera marca y el borde de la superficie.
- Se procedió a medir las longitudes de las diagonales de las marcas de indentación de manera manual, lo que permitió determinar los niveles de microdureza.

2.4.2. Ensayo metalográfico

El ensayo metalográfico adquiere relevancia porque permite una inspección de las características estructurales microscópicas que ocurren durante la solidificación. A través de la preparación de secciones transversales, seguida por su observación bajo el microscopio, es posible identificar y caracterizar las diferentes fases, configuraciones de granos y posibles defectos presentes en el material. Permite identificar y analizar aspectos esenciales como la distribución de fases, la forma y tamaño de los granos y la posible presencia de imperfecciones microscópicas.

A continuación, se detallan los equipos empleados para la realización del ensayo metalográfico y las dimensiones de la probeta utilizada para llevar a cabo todos los ensayos estipulados en este estudio, especificados en la Tabla 2.11. Por la concepción del modelo y también por la practicidad que ofrece para el mecanizado, esta muestra o probeta adopta una configuración cilíndrica.

Tabla 2.11 Dimensiones probeta de ensayo.

Variables	Dimensiones (mm)	
A (Longitud)	25	
φ (Diámetro)	22,5	

(Fuente: Propia)

La Tabla 2.12 describe las características de la máquina de desbaste equipada con discos abrasivos. El equipo utilizado para los ensayos de metalografía presentados en esta sección se encuentra ubicado en el Laboratorio de Metalografía perteneciente a la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional.

Tabla 2.12 Especificaciones técnicas de la máquina desbastadora de disco.

Descripción	Especificaciones	Equipo
Marca	BUEHKER	
Modelo	121-0M-84	
Voltaje	120 V	
Amperaje	6,2 A	
Potencia de motor	1 Hp	
Medio de enfriamiento	Agua	
Abrasivo	100 <i>gr/pulg²</i>	

(Fuente: Propia)

La Tabla 2.13 contiene una descripción de las especificaciones técnicas de la máquina para la preparación y pulido de muestras. Además, en conjunto con esta máquina, se emplean otros elementos tales como alcohol etílico de pureza 99.8 %, una solución de nital al 2 %, un lubricante de diamante a base de en agua y suspensiones con partículas de 1 y 6 micras. Estos componentes adicionales contribuyen de manera significativa al proceso de preparación y pulido para lograr resultados microestructurales óptimos.

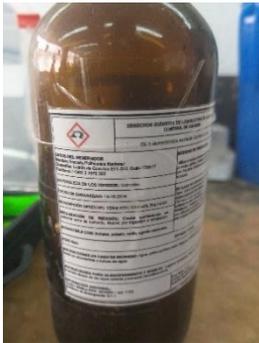
Tabla 2.13 Especificaciones técnicas del equipo para preparación y pulido de muestras.

Descripción	Especificaciones	Equipo
Marca	METKON	
Modelo	FORCIPOL 2V	
Voltaje	220 V	
Abrasivo para desbaste	Lijas (150,240,320,400,600,1200) <i>gr/pulg²</i>	
Abrasivo para pulido	Alúmina 0,3 μm	
Medio de enfriamiento	Agua	

(Fuente: Propia)

En la Tabla 2.14 se presenta un desglose de los componentes constitutivos del reactivo utilizado con el propósito de llevar a cabo el proceso de ataque químico en las aleaciones de cobre (Cu).

Tabla 2.14 Características del reactivo químico para aleaciones de Cu.

Descripción	Reactivo Químico
<ul style="list-style-type: none"> • H₂O = 100 ml • HCl = 50 ml • FeCl₃ = 25 g 	

(Fuente: Propia)

La Tabla 2.15, proporciona las especificaciones técnicas del microscopio metalográfico, una herramienta para inspeccionar muestras con diversos ajustes de aumento, lo que permite un análisis detallado de la microestructura.

Tabla 2.15 Especificaciones técnicas microscopio metalográfico.

Descripción	Especificaciones	Equipo
Marca	OLYMPUS	
Modelo	GX41F	
Voltaje	(100 – 120) V / (230 – 240) V	
Frecuencia	50/60 Hz	
Objetivos	5X, 10X, 50X, 100X	
Software	Stream Essentials	
Tubos de observación	10X	
Cámara metalográfica	5 Megapíxeles	

(Fuente: Propia)

La Figura 2.34 muestra el procedimiento para preparar una muestra con el fin de realizar el ensayo de metalografía. En este proceso, la geometría requerida se formó mediante el uso de resina. Posteriormente, se realizó un proceso de desbaste para eliminar el exceso

de resina y obtener una superficie uniforme y plana. Como paso final, se presentó una probeta que muestra el acabado final, que es resultado del proceso de pulido realizado.

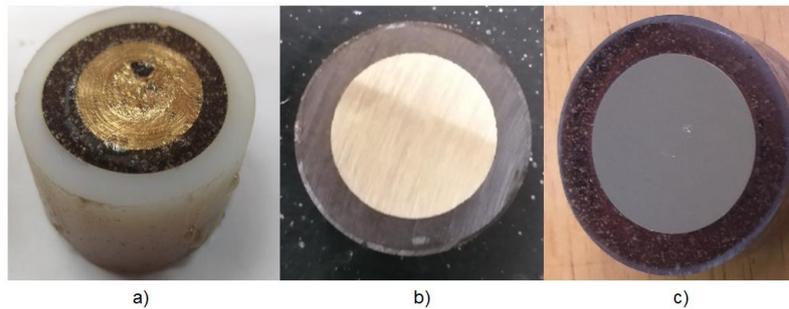


Figura 2.34 Proceso de preparación de la muestra para el ensayo de metalografía. a) conformado de la forma con resina, b) desbaste grueso y c) pulido.
(Fuente: Propia)

El procedimiento que se realizó para llevar a cabo el ensayo metalográfico implica seguir un conjunto de pasos específicos, los cuales se detallan a continuación:

- **Obtención de Muestras:** Se tomaron las muestras destinadas al análisis metalográfico a partir de la pieza rectificada, utilizando las dimensiones indicadas en la Tabla 2.11.
- **Preparación de Muestras:** Se dispusieron las muestras en moldes circulares de 37 mm de diámetro previamente acondicionadas. Luego, se vertió una solución compuesta por resina poliéster, octoato de cobalto y metil etil cetona. La reacción de estos componentes requiere un tiempo de secado de aproximadamente 90 min antes de proceder a desmoldarlos.
- **Desbaste Inicial:** Se eliminó el exceso de resina con una máquina desbastadora para obtener una superficie plana y paralela.
- **Pulido grueso:** Se configuró el equipo de preparación y pulido con lija de agua según las series numéricas: 150, 240, 400, 600 y 1200 en los platos porta muestras. Se inició con la lija de grano 150, desbastando las muestras por ambas caras para lograr uniformidad y prevenir la formación de superficies desiguales. Se prosiguió con las lijas restantes, desbastando solo un lado, cambiando las lijas cuando las marcas previas desaparecían. Es esencial emplear agua para refrigeración durante todo el proceso.
- **Pulido fino:** Se instaló un disco de paño en el equipo y se utilizó alúmina para pulir las muestras y eliminar las marcas del pulido grueso. Para evitar redondear los bordes y obtener una superficie reflectante similar a un espejo. Se lavaron las muestras con agua y se aplicó alcohol en todo el proceso, para prevenir la corrosión.

- **Ataque Químico:** Se expuso la superficie pulida a un baño que contenía el reactivo específico para el material durante aproximadamente 7 s por inmersión. Después, se aclararon con alcohol y se quitó el exceso de reactivo con un algodón para evitar quemar la muestra y rayones.
- **Captura de Imágenes:** Se introdujeron las muestras en el microscopio metalográfico para su análisis.

Análisis metalográfico

Las micrografías obtenidas fueron analizadas mediante el software ImageJ porque es programa de análisis y procesamiento de imágenes que se utiliza en diversas disciplinas científicas y de ingeniería. Su versatilidad en el procesamiento digital de imágenes lo convierte en una herramienta muy útil para evaluar y cuantificar propiedades microestructurales durante el proceso de fundición mediante algoritmos y técnicas de análisis de imágenes. El software permite extraer información cuantitativa y cualitativa de microestructuras como el tamaño de grano, la distribución de fases y la porosidad [147].

El análisis de microestructuras con ImageJ implica una serie de pasos. Primero, se capturan imágenes digitales de las muestras metalográficas utilizando técnicas de microscopía óptica o electrónica [148]. Estas imágenes se importan al software ImageJ para su procesamiento. El software ofrece una variedad de herramientas de preprocesamiento, como ajuste de contraste, filtrado y eliminación de ruido, que mejoran la calidad de la imagen y facilitan la segmentación de las estructuras de interés (Figura 2.35).

La segmentación es un paso crítico en el análisis de microestructuras. ImageJ ofrece herramientas para delimitar áreas de interés y aislar fases o características específicas en la imagen. Esto se logra mediante el uso de algoritmos y técnicas de procesamiento morfológico, es posible separar las fases y límites de grano. Una vez segmentada la imagen, la herramienta permite medir parámetros cuantitativos como el tamaño de grano, la fracción volumétrica de fases, entre otros.

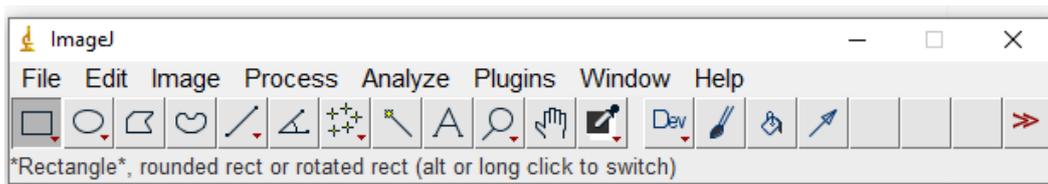


Figura 2.35 Cuadro de herramientas software ImageJ.
(Fuente: Propia)

La principal ventaja de utilizar ImageJ en el análisis de microestructuras radica en su capacidad para proveer mediciones precisas y objetivas. A diferencia de la evaluación manual, el software minimiza el sesgo del observador y proporciona resultados reproducibles.

La aplicación del análisis de imágenes, como se muestra en la Figura 2.36, proporciona un avance en el estudio de la microestructura de los materiales y permite revelar detalles que podrían no ser visibles a simple vista. Al determinar y cuantificar propiedades específicas, como por ejemplo el número de partículas con forma redonda de tonalidad gris claro, se pueden establecer correlaciones entre la microestructura y las propiedades macroscópicas del material.

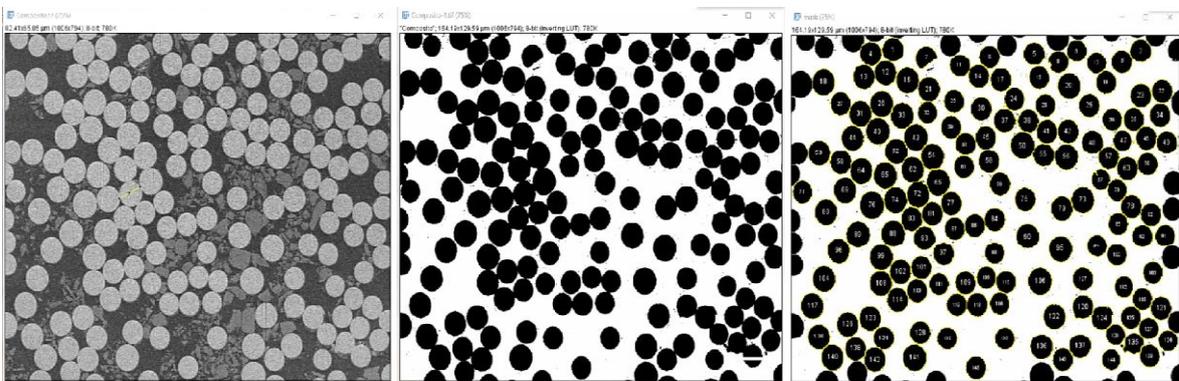


Figura 2.36 Cuantificación de partículas y área empleando el software ImageJ.
(Fuente: Propia)

2.4.3. Ensayo morfológico

Microscopía electrónica

La microscopía electrónica de barrido (SEM) produce un haz de electrones focalizado para escanear la superficie de la muestra. En la superficie, los electrones interactúan con los átomos y generan, electrones retro dispersados, electrones secundarios, rayos X característicos. Estas señales proporcionan información sobre la composición y la estructura de la muestra [125].

Uno de los aspectos más relevantes de la microscopía electrónica de barrido es su capacidad para obtener imágenes de la microestructura interna del material, el tamaño de grano, la distribución de fases, la orientación cristalina y la presencia de inclusiones.

La técnica de espectroscopia de rayos X de energía dispersiva (EDS) permite el análisis cuantitativo de la composición química de las fases presentes en la microestructura. Esto es útil para comprobar la homogeneidad de la composición química en todo el material.

La Tabla 2.16 muestra las especificaciones técnicas del microscopio electrónico de barrido ubicado Departamento de Metalurgia Extractiva (DEMEX) de la Escuela Politécnica Nacional.

Tabla 2.16 Especificaciones técnicas del microscopio electrónico de barrido (SEM).

Descripción	Especificaciones	Equipo
Marca	VEGA3	
Modelo	LMU	
Pistola de electrones	Cátodo de tungsteno	
Tamaño interno	Φ 230 mm	
Rango de magnificación	2X – 1000000X	
Software	EasySEM	

(Fuente: [146])

El procedimiento seguido para llevar a cabo el ensayo de microscopía electrónica de barrido se detalla a continuación:

- La muestra de prueba fue preparada de modo que su altura no superara 1 cm.
- Se realizó una limpieza minuciosa de la muestra a analizar utilizando limpieza ultrasónica y alcohol al 99,8 %.
- La probeta fue colocada dentro del soporte de porta muestras.
- Se cerró herméticamente la compuerta del equipo y se llevó a cabo el proceso de evacuación de aire para crear un vacío en la cámara.
- Se seleccionó el área de la muestra a analizar con el microscopio electrónico de barrido y se habilitó el módulo requerido para realizar el estudio de composición química.
- Se capturaron imágenes de las áreas más relevantes de la muestra durante el proceso de ensayo.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Resultados

En esta sección se presentan y analizan los resultados obtenidos mediante simulación por computadora del proceso de fundición por gravedad utilizando moldes de arena y el software Altair Inspire Cast en comparación con el proceso experimental. Se evalúa la información obtenida durante los ensayos: dureza, microdureza, metalografía y microscopía electrónica de barrido (SEM).

3.1.1. Fundición empírica

Las muestras obtenidas mediante fundición por gravedad se evaluaron para comprobar la eficacia del diseño y los parámetros utilizados. La Figura 3.1 muestra las probetas obtenidas por el proceso de fundición por gravedad utilizando moldes de arena con resina. Las diferencias entre las probetas en posición horizontal y vertical se evidencian en el diseño de los sistemas de alimentación que modifican las condiciones de solidificación y llenado de las cavidades.

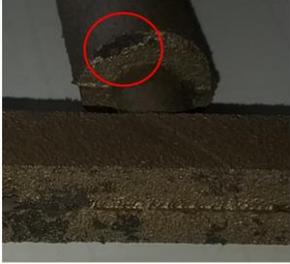
Uno de los aspectos evaluados es la inspección visual de las piezas fundidas, la cual muestra que la colada ha llenado todas las cavidades del molde de manera uniforme. Este llenado uniforme es un indicativo de que los sistemas de alimentación diseñados y los parámetros de fundición seleccionados cumplen su objetivo, permitiendo que el metal líquido fluya y ocupe todas las áreas del molde de manera equitativa.



Figura 3.1 Fundición. a) Colado de probetas en posición horizontal, b) Colado de probetas en posición vertical.
(Fuente: Propia)

Pese a que los resultados obtenidos a través del proceso de fundición demostraron ser óptimos en muchos aspectos, es imperativo considerar que se presentaron ciertos desafíos en forma de defectos en las fundiciones resultantes, como se muestra en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Defectos.

Defectos	Imagen
Rebabas	
Rechupes	
Poros internos	

(Fuente: Propia)

El uso de arena sílice junto con resinas furánicas y fenólicas ha demostrado ser eficaces para mejorar el acabado superficial y reducir los poros internos y superficiales. Los poros actúan como puntos de concentración de esfuerzos y se deben minimizar a la hora de producir piezas de alta calidad.

En el análisis comparativo de las probetas obtenidas con resinas fenólicas y furánicas, se observa una clara diferencia en el acabado superficial entre ambas. La Figura 3.2 proporciona una representación visual de esta afirmación, evidenciando que las probetas elaboradas con resinas furánicas presentan un mejor acabado en comparación con las obtenidas con resinas fenólicas.

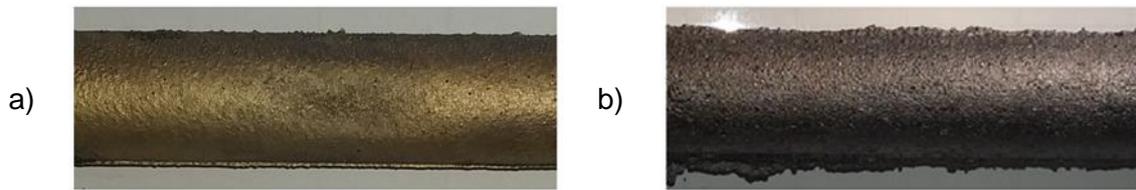


Figura 3.2 Acabado superficial. a) Resina furánica, b) Resina fenólica.
(Fuente: Propia)

3.1.2. Ensayo de dureza

Los resultados del ensayo de dureza se muestran detalladamente en la tabla del Anexo I. Esta tabla contiene los valores numéricos de dureza obtenidos para cada muestra producidos mediante el proceso de colado en posición vertical con diferentes porcentajes de ferro-silicio.

La Figura 3.3 presenta un gráfico de líneas que resume las tendencias y cambios en los valores de dureza de las probetas obtenidas mediante el colado en posición vertical. También se incluyen valores de referencia para la dureza del material C38500. Es importante destacar que en el gráfico también se incluyen valores teóricos basados en la norma ASTM B455, lo que permite un análisis detallado de la concordancia entre los resultados experimentales y los valores estandarizados.

La comparación entre los valores de dureza experimentales y teóricos, así como los valores de referencia para el material C38500, proporcionan una comprensión integral de las propiedades mecánicas de las probetas obtenidas mediante el proceso de colado en posición vertical.

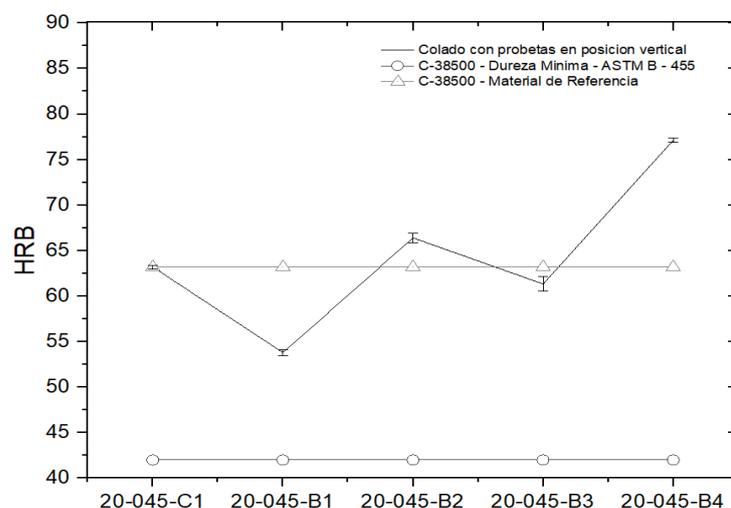


Figura 3.3 Valores promedio de la dureza en las probetas coladas en posición vertical.
(Fuente: Propia)

3.1.3. Ensayo de microdureza

La Figura 3.4 muestra los valores de microdureza para la aleación Cu – Zn – FeSi, producida mediante el proceso de fundición por gravedad en un molde de arena con resina, utilizando probetas en posición vertical. Los resultados del ensayo de microdureza se exhiben en detalle en el Anexo II.

El análisis de microdureza permite obtener información sobre la dureza de las diferentes fases presentes en la aleación. En este caso específico, la aleación Cu – Zn – FeSi contiene dos fases: la fase α y la fase β' .

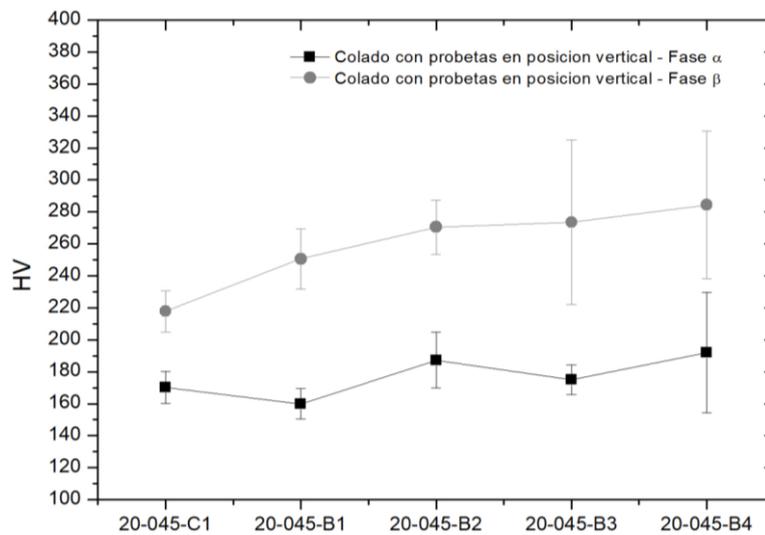


Figura 3.4 Microdureza en las probetas coladas en posición vertical (Fase α y Fase β')
(Fuente: Propia)

3.1.4. Tamaño de silicio

La Figura 3.5 muestra un análisis de los valores obtenidos de la evaluación promedio de las partículas de silicio, elemento de gran relevancia en las aleaciones de Cu – Zn – FeSi. Los resultados del ensayo del tamaño del silicio se detallan en el Anexo III. Estos valores se extraen mediante el uso de técnicas avanzadas de análisis de imágenes, en particular la herramienta ImageJ, que permite una evaluación cuantitativa y precisa de las partículas de silicio en las micrografías obtenidas de las probetas coladas en posición vertical.

Estos valores promedio de partículas de silicio proporcionan una representación numérica de la distribución, tamaño y densidad de las partículas en función de los diferentes porcentajes de silicio determinados en la Tabla 2.2.

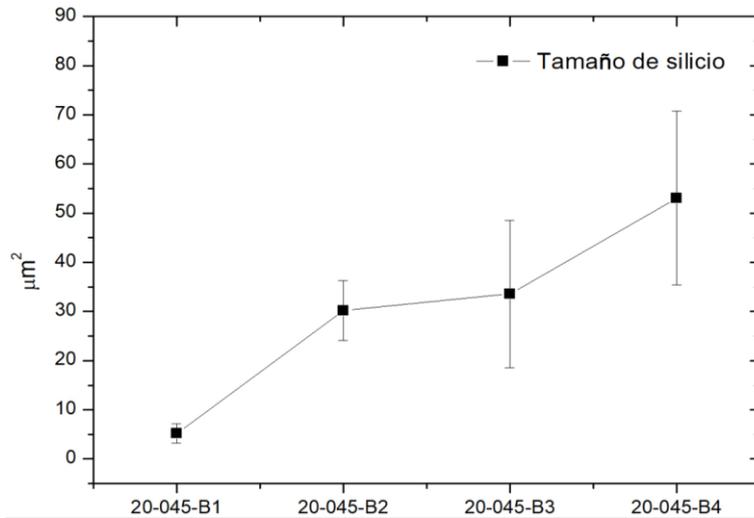


Figura 3.5 Tamaño de silicio en las probetas coladas en posición vertical.
(Fuente: Propia)

3.1.5. Comparación (Dureza, Microdureza y Tamaño de silicio)

La Figura 3.6 muestra un resumen de los ensayos sobre: microdureza, dureza y tamaño de las partículas de silicio en la aleación Cu – Zn – FeSi. Esta representación permite identificar patrones y correlaciones entre las propiedades microestructurales y los porcentajes de ferro-silicio presentes en la composición. La relación directa entre el contenido de silicio y la dureza es particularmente evidente en esta representación. La convergencia de estos tres ensayos en un solo gráfico proporciona una visión integral de cómo las variables en estudio interactúan y modifican las propiedades del material.

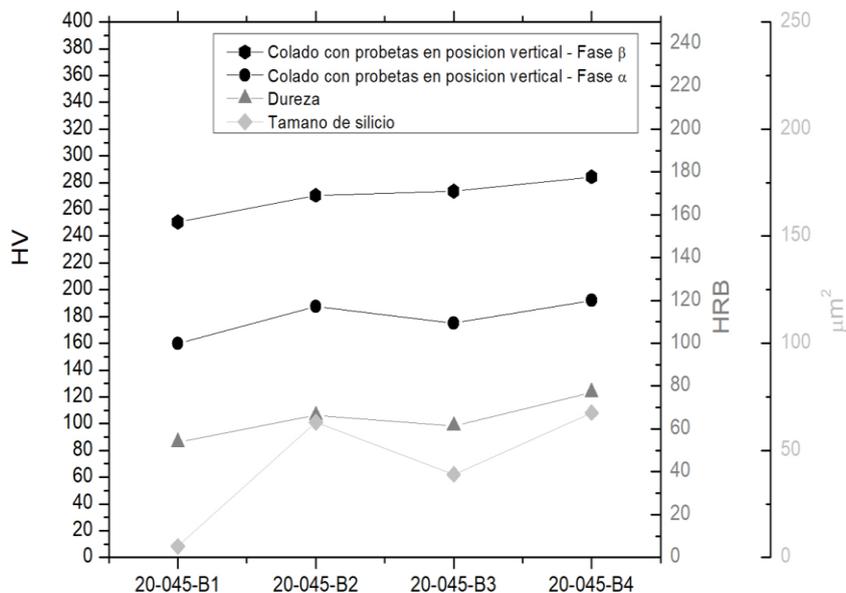


Figura 3.6 Gráfico comparativo de dureza, microdureza y tamaño de silicio de las probetas coladas en posición vertical.
(Fuente: Propia)

3.1.6. Ensayo de metalografía

La Tabla 3.2 proporciona una interpretación de las micrografías de una aleación de Cu – Zn, enriquecida con ferro-silicio obtenido a partir de la fundición de probetas dispuestas en posición vertical. Las micrografías con aumentos de 100X y 500X, revelan particularidades que permiten una diferenciación promedio de las diferentes fases presentes en la estructura (fase β' y fase α) y los componentes que la integran.

El Anexo V resume la determinación del porcentaje de las fases presentes en todas las muestras utilizadas en este estudio. Esta información permite tener una visión global de la distribución y proporción de las fases β' y α en las diversas muestras analizadas.

Tabla 3.2 Microestructuras de las muestras con adición de ferro-silicio en su composición química de las probetas coladas en posición vertical.

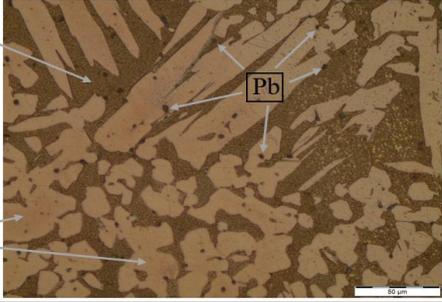
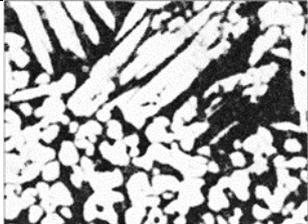
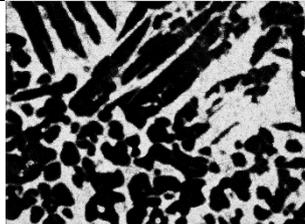
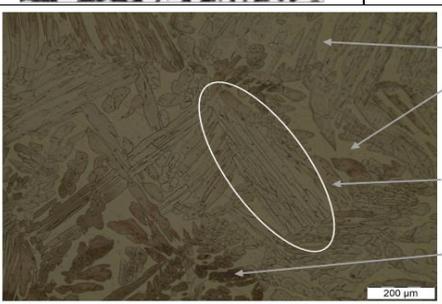
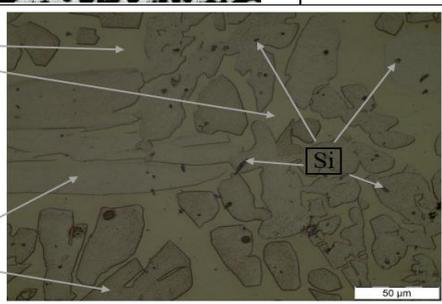
CÓDIGO	MICROESTRUCTURA (100X, 500X)			
C1				
	<p>La microestructura exhibe una aleación de cobre y cinc con un contenido de plomo entre el 2.5 % y el 3 % y muestra la disposición característica de las partículas de plomo en este tipo de aleaciones (C38500). El plomo se presenta en forma de esferas distribuidas por todo el material. Además, la fase β' se muestra en tono más claro y también se aprecia la fase α que se presenta en un color oscuro.</p>			
		<p>Fase β'</p> <p>37,53 %</p>		<p>Fase α</p> <p>62,47 %</p>
B1				

Tabla 3.2 Microestructuras de las muestras con adición de ferro-silicio en su composición química de las probetas coladas en posición vertical.

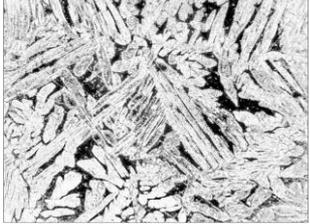
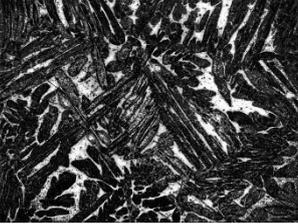
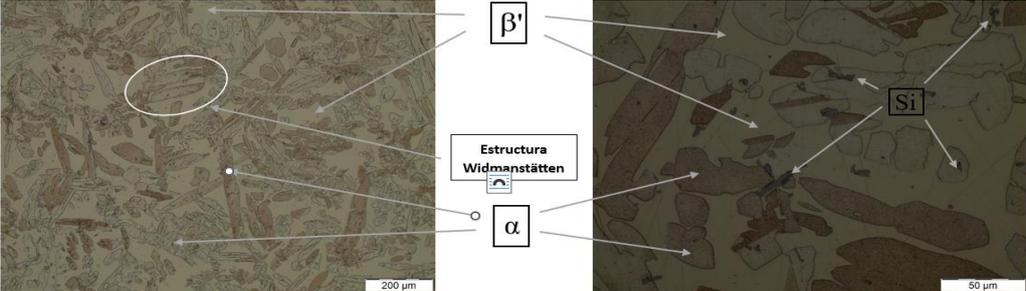
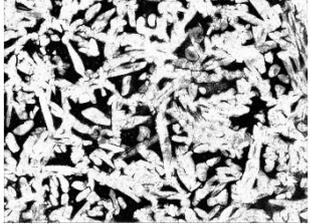
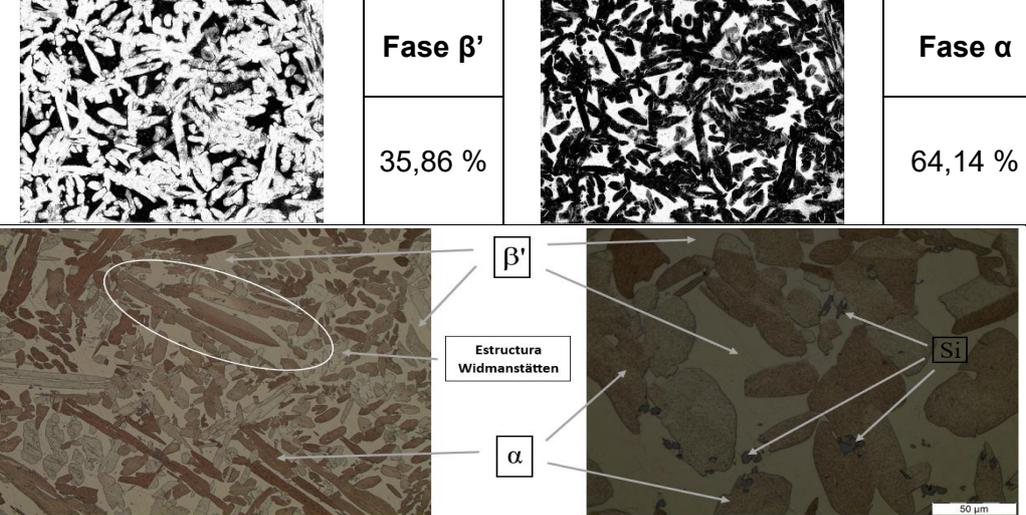
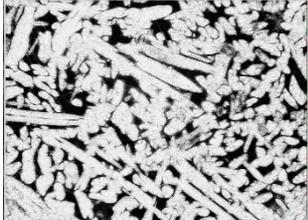
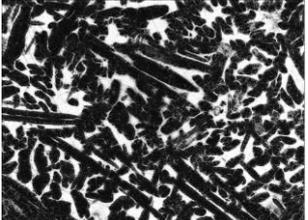
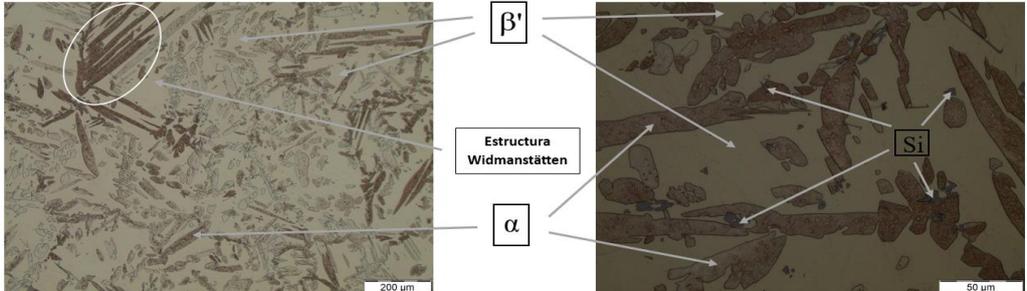
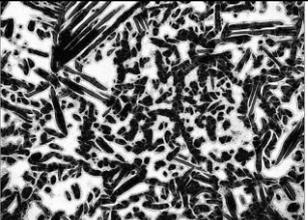
CÓDIGO	MICROESTRUCTURA (100X, 500X)			
<p>B1</p> <p>La fase β' en esta microestructura se caracteriza por un tono más claro. La fase α, por el contrario, se observa en mayor medida en tonos más oscuros y presenta una morfología en forma de aguja. La agrupación de esta morfología forma la denominada estructura Widmanstätten. Esta configuración no es aleatoria, sino que resulta de las condiciones de enfriamiento controladas durante el proceso de fundición. Se exhibe la presencia de silicio primario, representado por su distintivo color gris azulado, que aparece en forma de poliedros irregulares.</p>		<p>Fase β'</p>		<p>Fase α</p>
		<p>24,3 %</p>		<p>75,7 %</p>
<p>B2</p> <p>La microestructura se caracteriza por una matriz compuesta por la fase β', que se distingue por su tonalidad más clara. En contraste, la fase α de color más oscuro con una morfología similar a una aguja que se origina en los límites de grano porque la formación de esta fase se genera en regiones donde se concentran una gran cantidad de energía. Se observa la presencia de silicio primario, reconocible por su característico color gris azulado y su forma poliédrica irregular.</p>				
		<p>Fase β'</p>		<p>Fase α</p>
<p>35,86 %</p>		<p>64,14 %</p>		
<p>B3</p>				

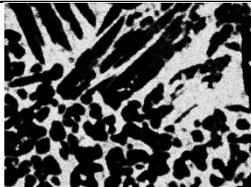
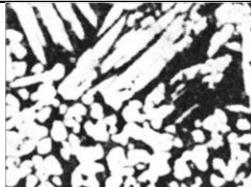
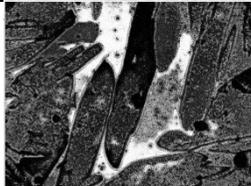
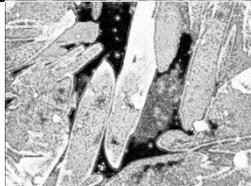
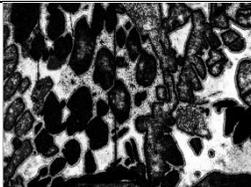
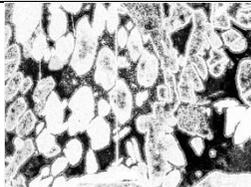
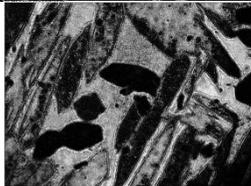
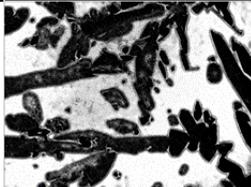
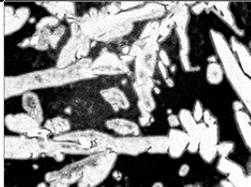
Tabla 3.2 Microestructuras de las muestras con adición de ferro-silicio en su composición química de las probetas coladas en posición vertical.

CÓDIGO	MICROESTRUCTURA (100X, 500X)			
<p>B3</p>	<p>La microestructura muestra dos fases diferentes, denominadas β' y α. La fase α se presenta mayoritariamente en tonos más oscuros y adquiere una estructura en forma de aguja. La fase β' exhibe un tono más claro. También se observa la presencia de silicio primario, el cual presenta una tonalidad gris azulada y tiene una forma de poliedros irregulares.</p>			
		<p>Fase β'</p>		<p>Fase α</p>
<p>26,97 %</p>		<p>73,03 %</p>		
<p>B4</p>				
	<p>En esta microestructura se aprecia una matriz compuesta por la fase β' y la fase α. La fase β' se caracteriza por un color más claro, mientras que la fase α tiene un tono más oscuro. Su morfología es similar a las agujas, las cuales constituyen la estructura Widmanstätten. También se visualiza la presencia de silicio primario, que se muestra de color gris azulado y tiene forma de poliedros irregulares de mayor tamaño en comparación con las otras probetas.</p>	<p>Fase β'</p>		<p>Fase α</p>
<p>39,99 %</p>		<p>60,01 %</p>		

(Fuente: Propia)

3.1.7. Matriz comparativa – Ensayos de caracterización

Tabla 3.3 Matriz comparativa de caracterización de las probetas en posición vertical con adición de ferro-silicio en su composición química.

PROBETA	%	DUREZA [HRB]	MICRODUREZA [HV]		MICROGRAFÍA [500X]			
			Fase β'	Fase α	Fase β'		Fase α	
C1	(2,5 – 3) Pb	63,2	217,90	170,27		37,53 %		62,47 %
B1	0,5	53,80	250,62	159,94		24,3 %		75,7 %
B2	1,0	66,40	270,90	187,33		35,86 %		64,14 %
B3	1,5	61,33	273,56	175,03		26,97 %		73,03 %
B4	2,0	77,13	284,46	192,09		39,99 %		60,01 %

(Fuente: Propia)

3.1.8. Simulación

I. Temperatura

La Figura 3.7 presenta una sucesión de imágenes que ilustran el llenado del sistema de alimentación en conjunto con las probetas dispuestas en posición horizontal y la Figura 3.8 muestra el llenado de las probetas en posición vertical. Esta secuencia de imágenes y datos termográficos muestra la evolución del llenado y la distribución de temperatura a lo largo del sistema de alimentación, lo que permite comprender cómo fluye el material líquido a través de las cavidades del molde y cómo se distribuye la temperatura durante cada fase del proceso.

La correlación observada entre el color y la temperatura, respaldada por el cuadro de referencia, proporciona una ayuda eficaz para estimar y controlar la temperatura en diferentes áreas del proceso.

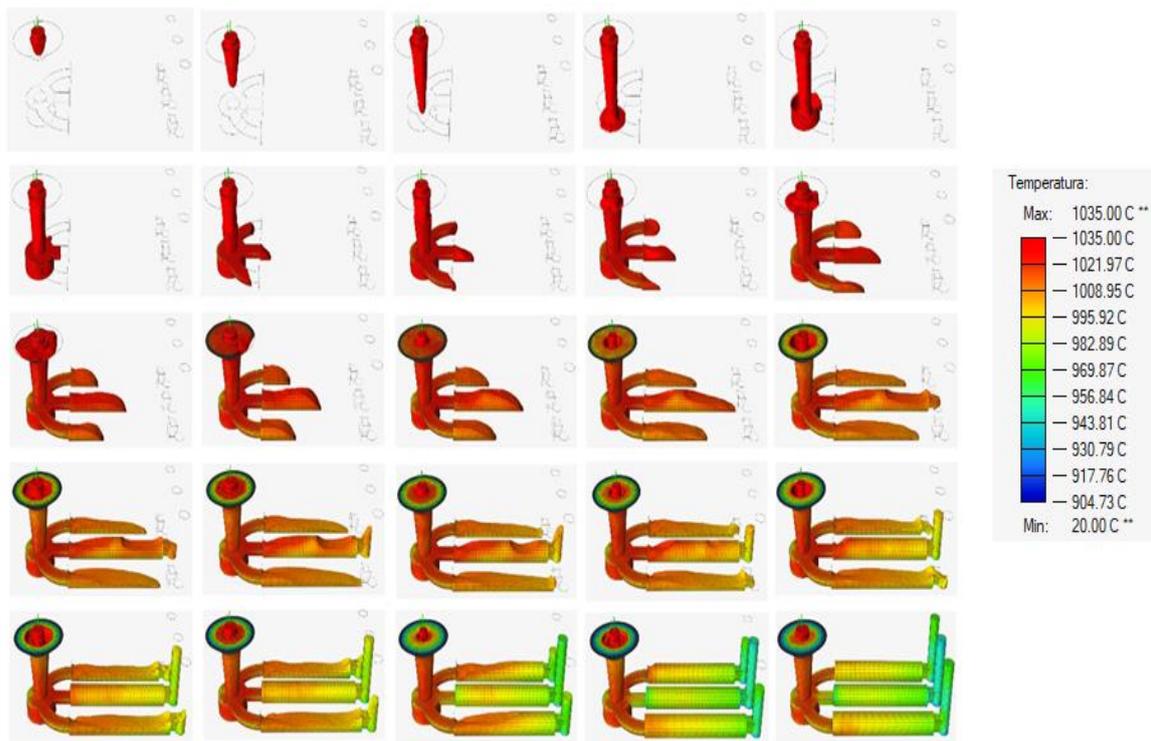


Figura 3.7 Temperatura de colado probetas en posición horizontal.
(Fuente: Propia)

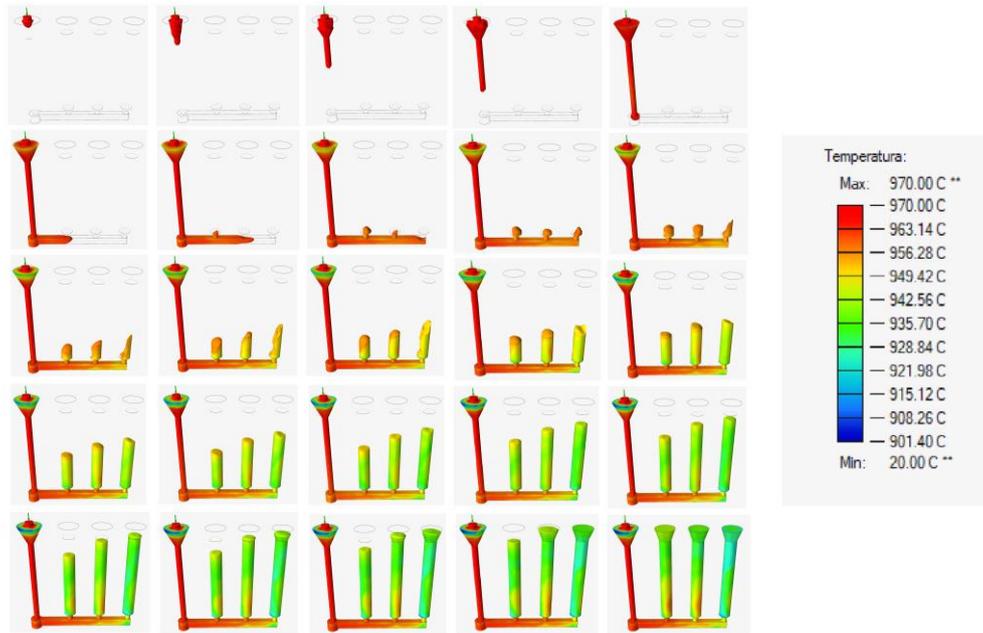


Figura 3.8 Temperatura de colado probetas en posición vertical.
(Fuente: Propia)

El gráfico que se muestra en la Figura 3.9 exhibe la distribución de temperatura una vez que el metal en estado líquido ha llenado cada cavidad del sistema de alimentación. Las variaciones de color en la imagen representan la temperatura en diferentes áreas y la tabla de referencia del gráfico se utiliza para relacionar esta diferencia de color con valores de temperatura específicos.

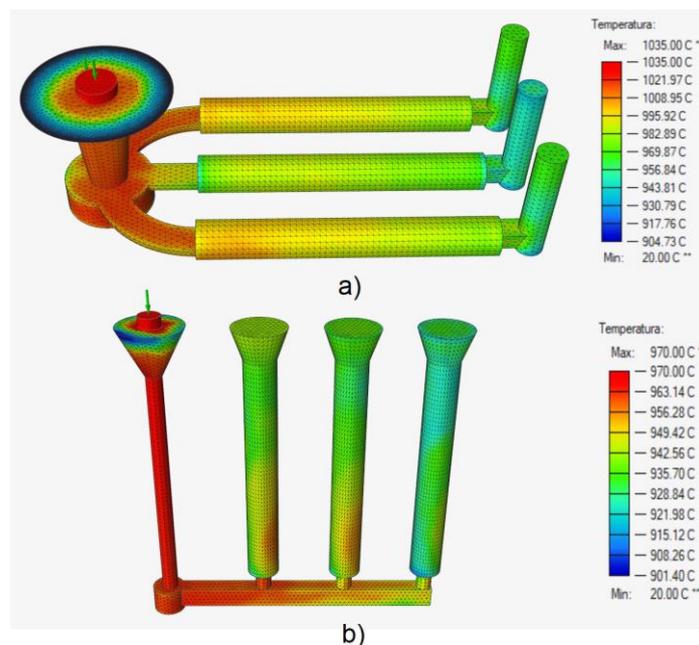


Figura 3.9 Temperatura final de colado. a) Colado probetas en posición horizontal, b) Colado probetas en posición vertical.
(Fuente: Propia)

II. Velocidad

Las Figura 3.10 y 3.11 muestran las etapas de llenado de las probetas en posición horizontal y vertical, respectivamente. Esta representación secuencial describe cómo fluye el metal líquido durante el proceso y cómo cambian las características de llenado dependiendo de la orientación de las muestras. Según el diseño de la cavidad del molde, la comparación de los dos gráficos puede revelar diferencias en la distribución de velocidades y los patrones de flujo de metal líquido.

Asociarles colores a las diferentes velocidades del fluido es una estrategia eficaz para visualizar y cuantificar los cambios de velocidad durante el proceso de fundición. Se puede obtener una estimación visual instantánea de la velocidad de diferentes áreas del proceso al correlacionar los colores observados con las velocidades correspondientes en la tabla de referencia. Este método es particularmente útil para delimitar zonas de posible turbulencia o zonas donde las velocidades son demasiado altas o bajas, lo que puede afectar la calidad del llenado y la formación de defectos.

En el Anexo IV se detalla una representación en secuencia del procedimiento de colado, considerando las variaciones en la velocidad del metal líquido en función de los ejes coordenados (X, Y, Z) en función de las orientación de la probetas.

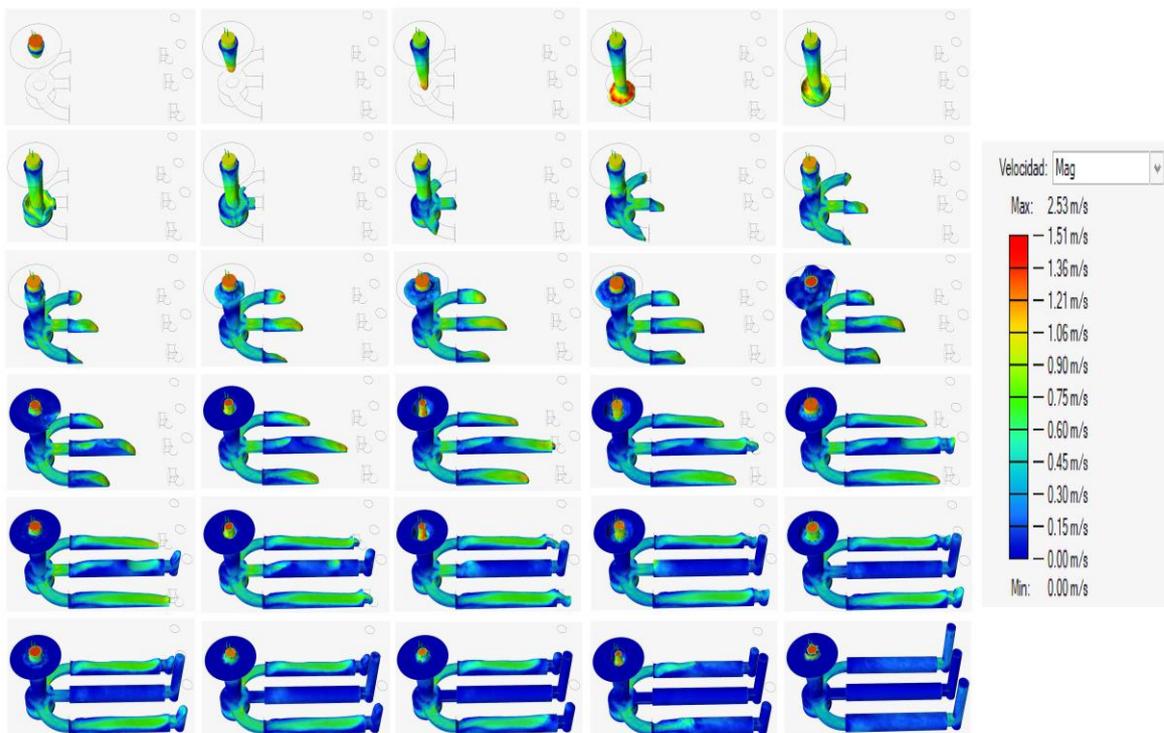


Figura 3.10 Velocidad metal líquido probetas en posición horizontal.
(Fuente: Propia)

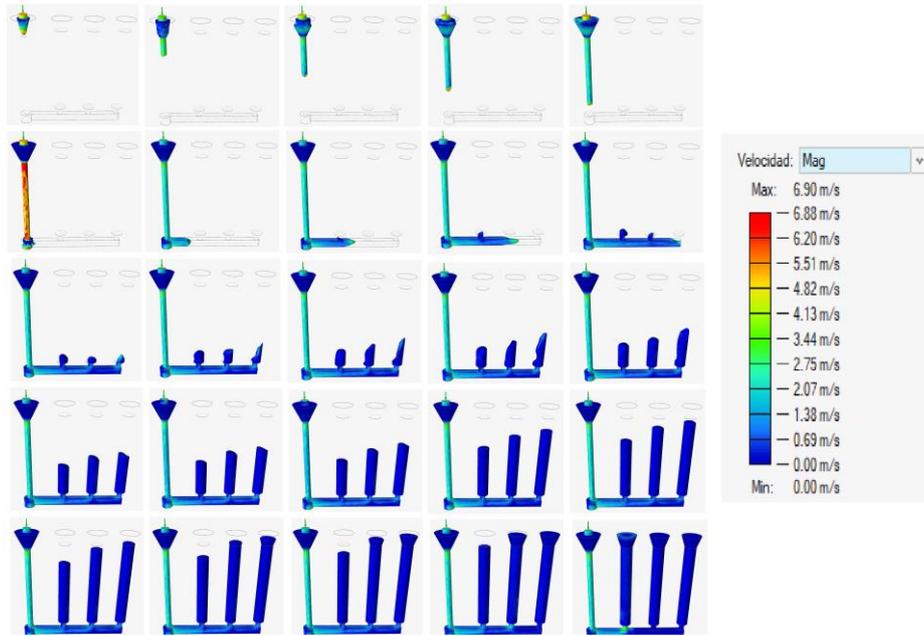


Figura 3.11 Velocidad metal líquido probetas en posición vertical.
(Fuente: Propia)

III. Tiempo de llenado

La variación del tiempo de llenado entre las secciones del molde se muestra en la Figura 3.12. Esta representación gráfica permite identificar las zonas que se llenan más rápidamente en comparación con aquellas que requieren más tiempo en llenarse por completo.

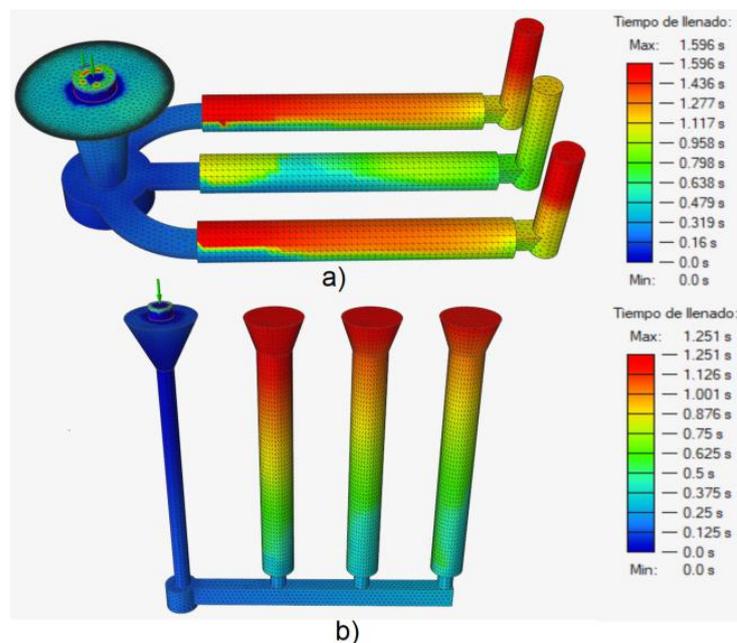


Figura 3.12 Tiempo de llenado. a) Colado probetas en posición horizontal, b) Colado probetas en posición vertical.
(Fuente: Propia)

IV. Aire atrapado

Las Figura 3.13 y 3.14 muestran la presencia de aire atrapado en el sistema de alimentación en el colado de las probetas en posición horizontal y vertical, respectivamente. La visualización de los niveles de aire atrapado asociados con cada componente es esencial para identificar áreas críticas que pueden ser propensas a defectos, como rechupes o porosidades.

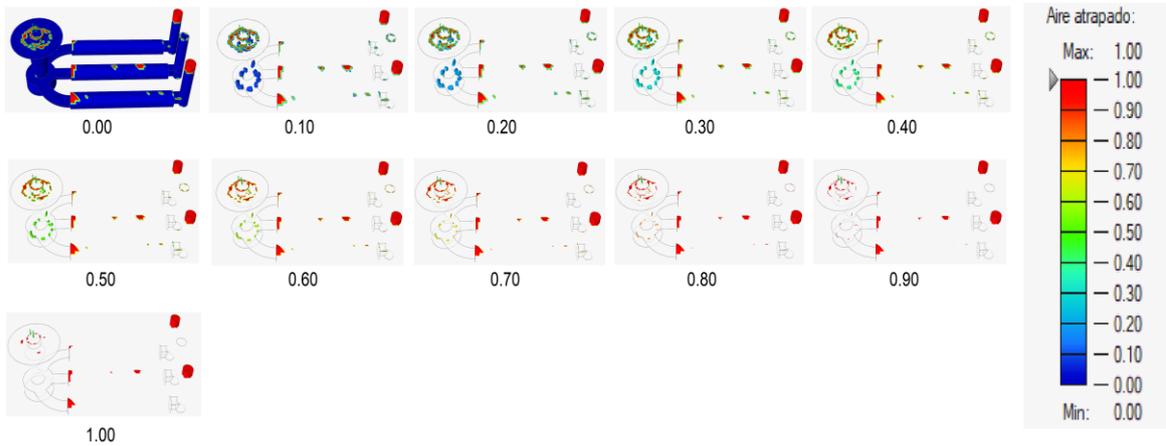


Figura 3.13 Aire atrapado probetas en posición horizontal.
(Fuente: Propia)

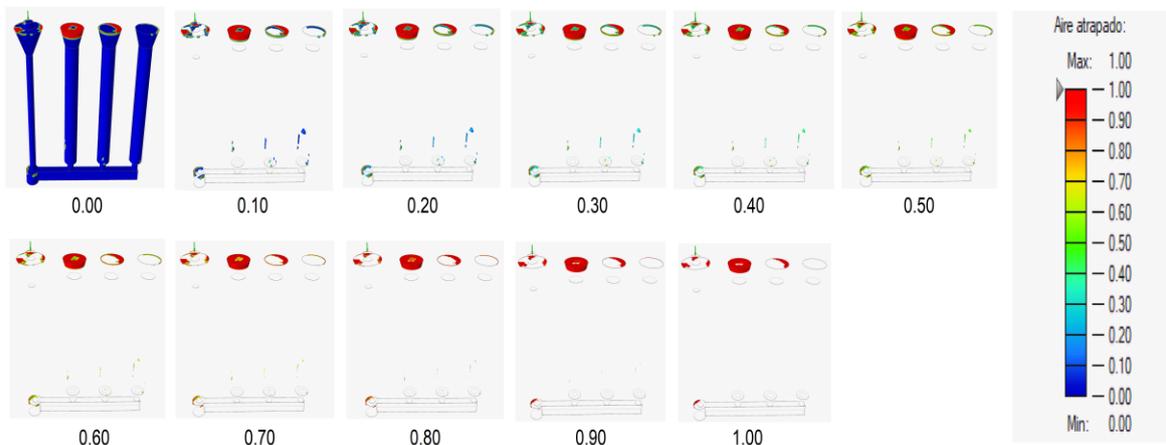


Figura 3.14 Aire atrapado probetas en posición vertical.
(Fuente: Propia)

V. Erosión del molde

Las Figura 3.15 y 3.16 muestran cómo la erosión avanza a medida que el metal líquido entra en contacto con las paredes del molde, tanto en el colado horizontal como vertical de las probetas. Esta visualización ayuda a comprender cómo el diseño del molde y la disposición del sistema de alimentación influyen en la erosión resultante y permite

identificar áreas propensas a una erosión excesiva. Para evitar la degradación del molde, que puede causar defectos en los componentes fundidos, es esencial realizar un análisis de erosión.



Figura 3.15 Erosión molde probetas en posición horizontal.
(Fuente: Propia)

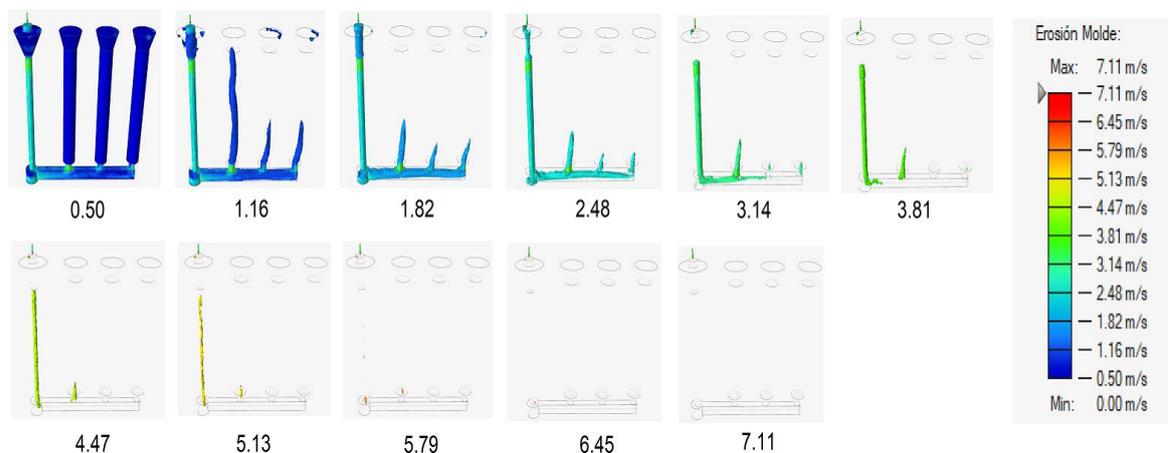


Figura 3.16 Erosión molde probetas en posición vertical.
(Fuente: Propia)

VI. Uniones frías

Las Figura 3.17 y 3.18 muestran la ubicación donde se originan las uniones frías durante el proceso de solidificación y colado de las probetas en posición horizontal y vertical, respectivamente. Esta visualización gráfica ayuda a identificar las áreas propensas a la formación de estos defectos y permite analizar cómo los parámetros de diseño, la orientación de la pieza y las condiciones de colada influyen en su formación.

El análisis de las uniones frías puede identificar áreas donde la solidificación no es uniforme y se forman zonas de enfriamiento críticas. Esto afecta las propiedades mecánicas y la

resistencia de los componentes, por lo que es necesario modificar el proceso de colada y el diseño del molde para reducir la formación de estas uniones frías.

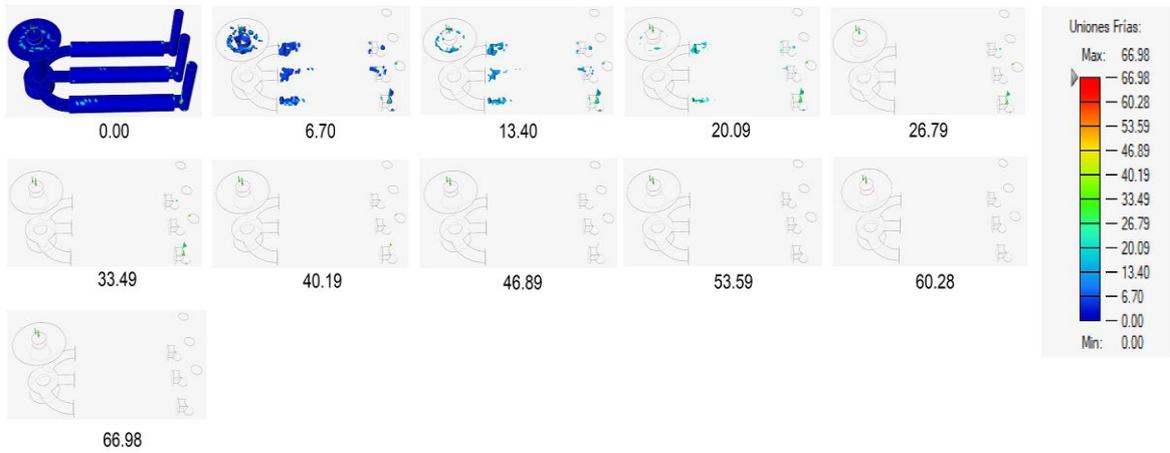


Figura 3.17 Uniones frías probetas en posición horizontal.
(Fuente: Propia)

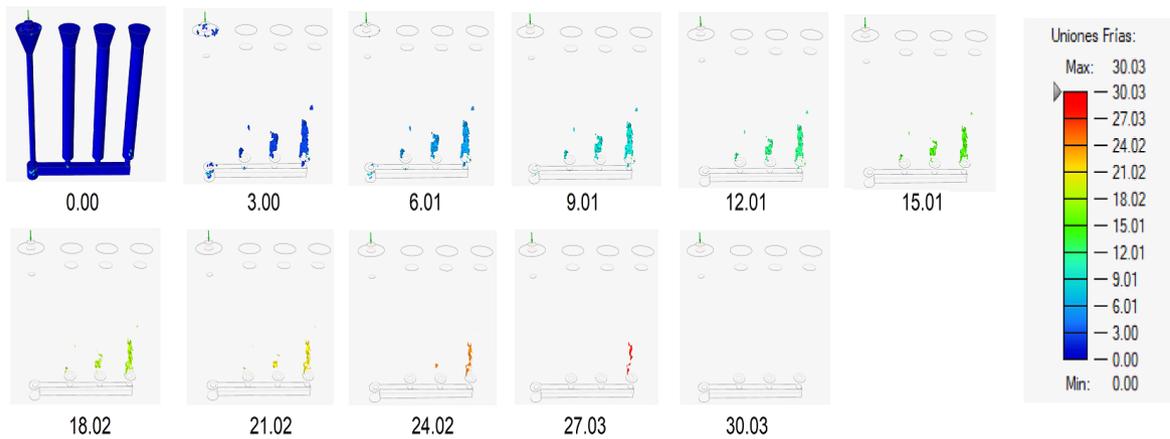


Figura 3.18 Uniones frías probetas en posición vertical.
(Fuente: Propia)

VII. Presión de llenado

La Figura 3.19 muestra cómo varía la presión durante el llenado del molde con metal líquido. En función de la asignación de colores, esta visualización permite identificar zonas de alta o baja presión y analizar cómo la presión afecta diferentes áreas del molde y del sistema de alimentación.

Esta representación gráfica se apoya en la asignación de colores a cada nivel de presión, los cuales están directamente relacionados con un valor numérico en Megapascuales (MPa) detallado en la tabla adjunta en el gráfico.

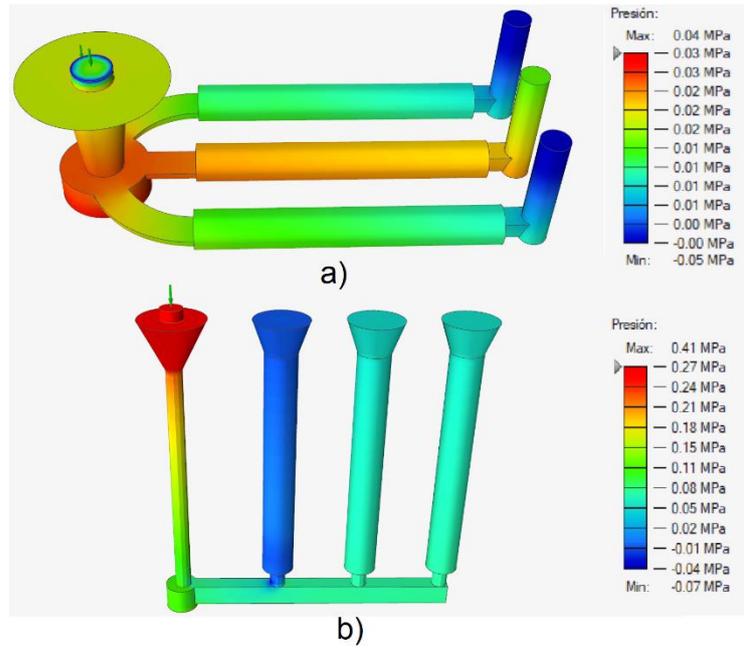


Figura 3.19 Presión de llenado. a) Colado probetas en posición horizontal, b) Colado probetas en posición vertical.
(Fuente: Propia)

VIII. Temperatura del molde

La Figura 3.20 muestra la variación de temperatura en el molde durante el proceso de llenado con el metal líquido. Esta visualización permite identificar áreas con una fluctuación térmica significativa, como las zonas próximas al sistema de alimentación, y facilita la comprensión de cómo este cambio de temperatura afecta diversas áreas del molde.

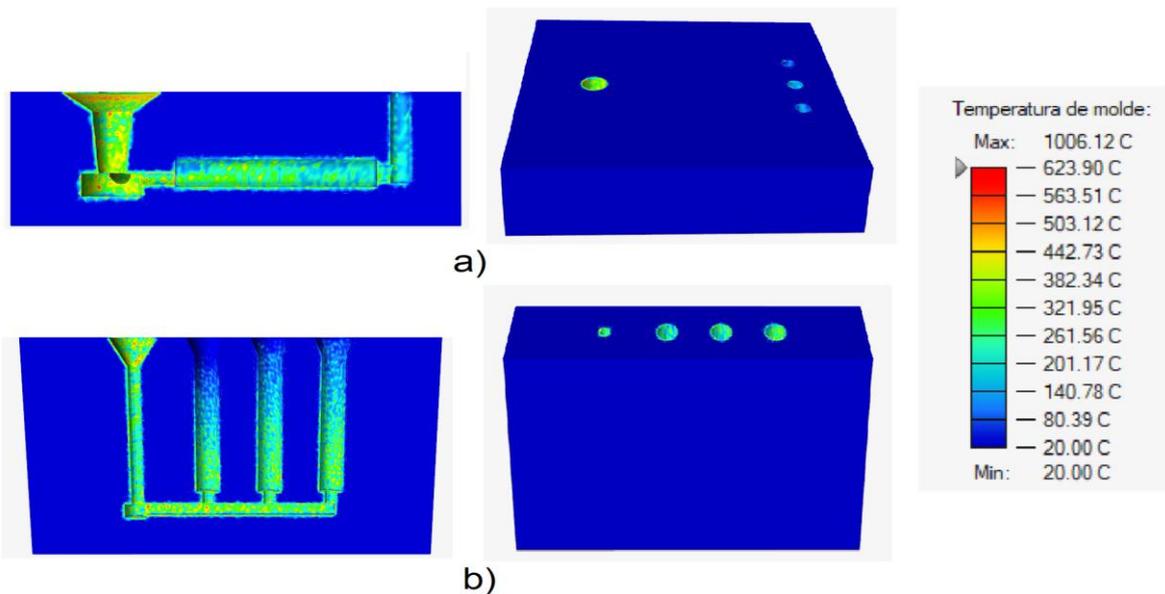


Figura 3.20 Temperatura del molde. a) Colado probetas en posición horizontal, b) Colado probetas en posición vertical.
(Fuente: Propia)

3.1.9. Comparativa del proceso de fundición por gravedad experimental con la simulación

La Tabla 3.4 exhibe los defectos de aire atrapado y juntas frías identificados en la simulación obtenida con el software Altair Inspire Cast en las probetas coladas en posición vertical en comparación con las probetas obtenidas experimentalmente en la misma disposición. Se observa que la simulación presenta zonas donde existe la posibilidad de hallar defectos, pero al compararlos con las probetas físicas no se identifica ningún defecto en esas áreas.

Tabla 3.4 Defectos identificados en la simulación (aire atrapado y juntas frías) comparados con los resultados obtenidos experimentalmente en el colado de probetas en posición vertical.

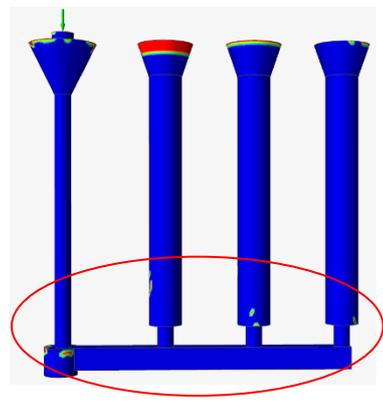
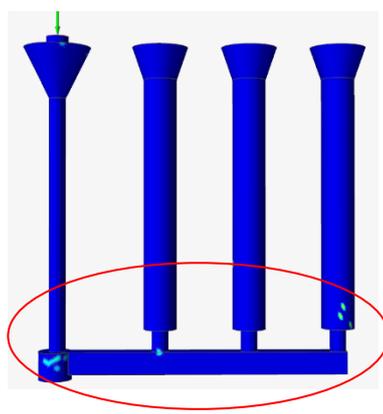
Aire atrapado	
	
Juntas Frías	
	

Tabla 3.4 Defectos identificados en la simulación (aire atrapado y juntas frías) comparados con los resultados obtenidos experimentalmente en el colado de probetas en posición vertical.



(Fuente: Propia)

La Tabla 3.5 muestra los defectos de aire atrapado y juntas frías identificados en la simulación obtenida con el software Altair Inspire Cast en las probetas coladas en posición horizontal en comparación con las probetas físicas obtenidas experimentalmente en la misma disposición. Se observa que existe una correlación entre la simulación y los resultados empíricos del proceso de fundición por gravedad en moldes de arena. La fundición presenta defectos en los cambios de sección entre las probetas y las mazarotas. La simulación indica que existe una mayor probabilidad de que se produzcan defectos en esta zona provocados tanto por aire atrapado como por juntas frías.

Tabla 3.5 Defectos identificados en la simulación (aire atrapado y juntas frías) comparados con los resultados obtenidos experimentalmente en el colado de probetas en posición horizontal.

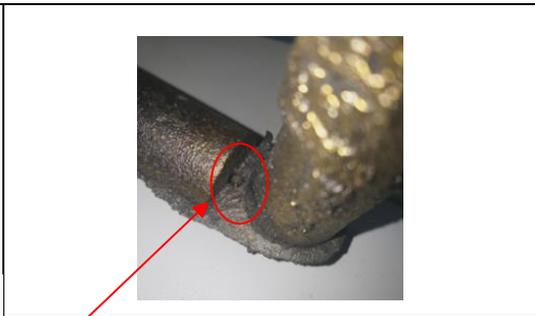
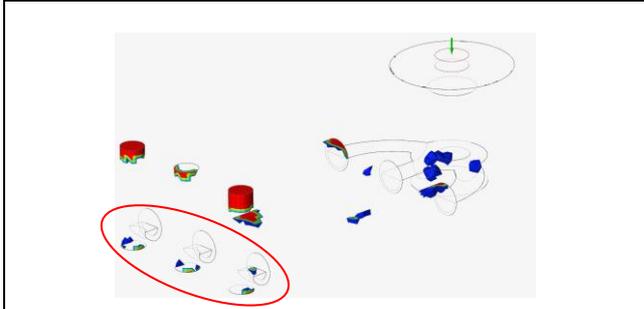
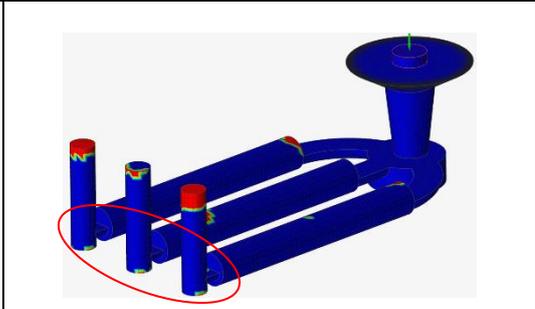
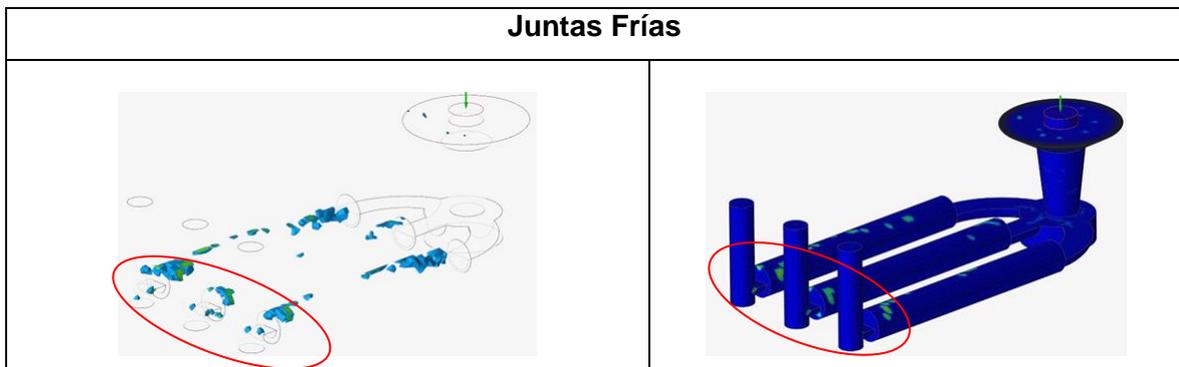
	
	
	
	
<p>Aire atrapado</p>	
	

Tabla 3.5 Defectos identificados en la simulación (aire atrapado y juntas frías) comparados con los resultados obtenidos experimentalmente en el colado de probetas en posición horizontal.



(Fuente: Propia)

3.1.10. Microscopía electrónica de barrido

La Figura 3.21 muestra una macrografía de una probeta elaborada a partir de una aleación de Cu – Zn con un contenido de 1,5 % de ferro-silicio en su composición química, elaborada por colado de las probetas en posición horizontal. La cual fue sometida previamente a un ensayo de tracción, en el cual se observaron defectos en su estructura interna, como se evidencia en la Figura 3.21 a).

Al analizar los defectos se verificó una variación en la coloración de las probetas, despertando el interés sobre su naturaleza y origen. En el Laboratorio de Metalurgia Extractiva (DEMEX) de la Escuela Politécnica Nacional, se realizó un ensayo de microscopía electrónica de barrido (SEM) con detección de electrones secundarios (SE) para explorar la topografía de las muestras con el objetivo de obtener una descripción más clara de estos defectos y comprender su impacto en el comportamiento mecánico de las probetas.

La microscopia electrónica de barrido es una herramienta importante para la caracterización de materiales porque permite obtener imágenes detalladas de la superficie de las muestras a una escala microscópica. Los resultados de este análisis se muestran en la Figura 3.21 b) y c). La superficie de las probetas se pudo observar utilizando electrones secundarios, lo que reveló características topográficas y microestructurales que podrían estar relacionadas con la formación y propagación de los defectos.

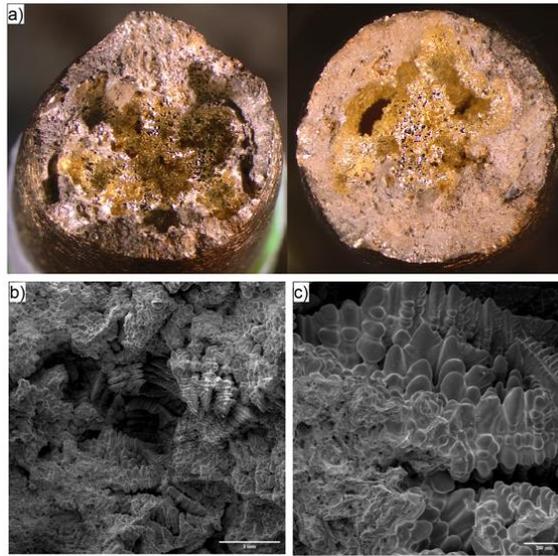


Figura 3.21 Probeta de tracción de aleación Cu – Zn con adición de 1,5 % de ferro-silicio, elaborada por colado de las probetas en posición horizontal. a) Macrografía con un aumento de 0,5X, b) y c) Imágenes de microscopía electrónica de barrido de electrones secundarios con un aumento de 30X y 100X, respectivamente.
(Fuente: Propia)

La nucleación y el crecimiento de las partículas en forma de ramificaciones, conocidas como dendritas, se muestran en la Figura 3.22. Este fenómeno se presentó en la región donde se produjo la falla de la probeta debido a una anomalía en la solidificación interna del elemento fundido. La solidificación dendrítica en las aleaciones se caracteriza por la formación de estructuras ramificadas durante el proceso de solidificación de un material fundido.

El defecto de fundición presente en el interior del elemento tuvo como consecuencia la generación de una fractura durante el ensayo de tracción, ya que este defecto actuó como un concentrador de esfuerzos.

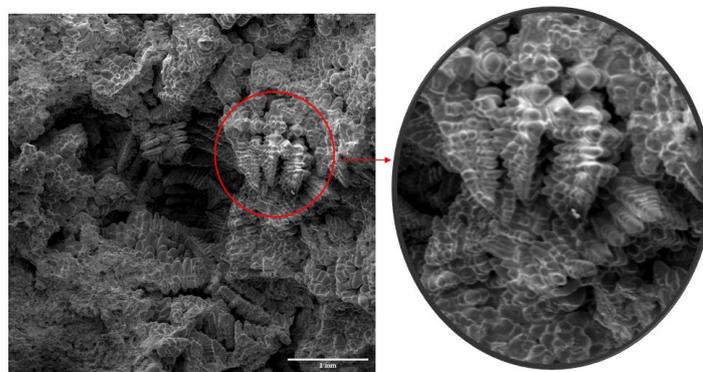


Figura 3.22 Imágenes de microscopía electrónica de barrido de electrones secundarios con un aumento de 30X de la probeta con 1.5 % de ferro-silicio, elaborada por colado de las probetas en posición horizontal.
(Fuente: Propia)

La Figura 3.23 a) – e) muestran los elementos que se encuentran en el área de interés, donde se ha observado una variación en la coloración. Se ha utilizado la técnica de espectrometría por dispersión de energía de rayos X (EDS) en un microscopio electrónico de barrido para evaluar este fenómeno.

La técnica de espectrometría por dispersión de energía de rayos X (EDS) funciona mediante la detección y análisis de los rayos X característicos emitidos por los átomos de un material cuando son bombardeados con electrones de alta energía. Esto permite identificar los elementos químicos presentes en la muestra, así como sus concentraciones relativas, como se muestra en la Figura 3.23 f).

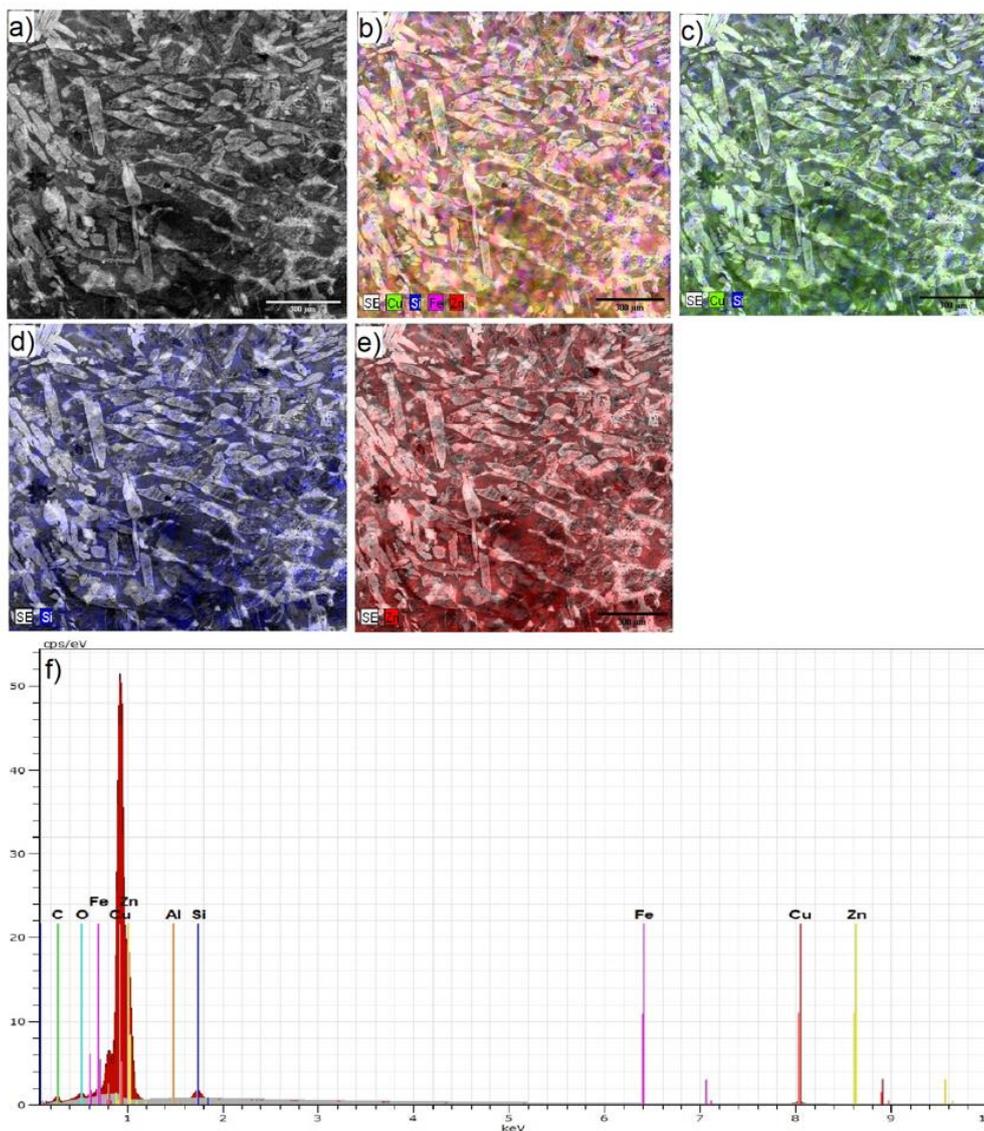


Figura 3.23 Análisis de la zona de fractura mediante la técnica de espectrometría por dispersión de energía de rayos X (EDS) de la probeta con un contenido de 1,5 % de ferro-silicio, elaborada por colado de las probetas en posición horizontal. a) – e) mapeo de rayos x de los diferentes elementos que contiene la muestra y f) espectro de rayos X característicos. (Fuente: Propia)

En el contexto de este estudio, la técnica EDS se aplicó con el objetivo de identificar inclusiones o pequeñas partículas de material desconocido que pudieran haber afectado el comportamiento del material durante el ensayo de tracción.

La Tabla 3.6 proporciona una representación cuantitativa de los porcentajes en peso de cada elemento identificado en la zona que exhibe una coloración diferente en la probeta elaborada a partir de una aleación de Cu – Zn con un contenido de 1,5 % de ferro-silicio en su composición química, como se muestra en la Figura 3.21. Esta información se obtiene a partir del histograma o espectro generado a través de la técnica de espectrometría por dispersión de energía de rayos X (Figura 3.23 f)).

Tabla 3.6 Composición química obtenida de la técnica de espectrometría por dispersión de energía de rayos X (EDS) de la probeta con un contenido de 1,5 % de ferro-silicio, elaborada por colado de las probetas en posición horizontal.

Elementos	Cobre	Cinc	Carbono	Oxígeno	Silicio	Hierro	Aluminio
Porcentaje en peso, (wt. %)	68,97	26,70	2	0,91	0,80	0,58	0.05

(Fuente: Propia)

La Figura 3.24 muestra una probeta elaborada a partir de una aleación de Cu – Zn que contiene un 1,5 % de ferro-silicio en su composición, elaborada por colado de las probetas en posición vertical. Esta probeta fue sometida a un ensayo de tracción, un procedimiento que se lleva a cabo para evaluar las propiedades mecánicas de los materiales. Sin embargo, los resultados mostraron un comportamiento anómalo en la zona de fractura que no cumplió con los parámetros establecidos por el ensayo.

La identificación de una coloración distinta en esta zona específica de la fractura reveló la presencia de una alteración que requería un análisis posterior. Se empleó la técnica de microscopia electrónica de barrido (SEM) con detección de electrones secundarios (SE) para investigar el defecto.

Las microscopias obtenidas a través del ensayo de microscopia electrónica de barrido con detección de electrones secundarios se muestran en la Figura 3.24 b) y c). Las micrografías revelan con gran detalle la topografía de la zona de interés, permitiendo identificar anomalías, fracturas, microestructuras, inclusiones u otros fenómenos que podrían haber causado el comportamiento atípico durante el ensayo de tracción.

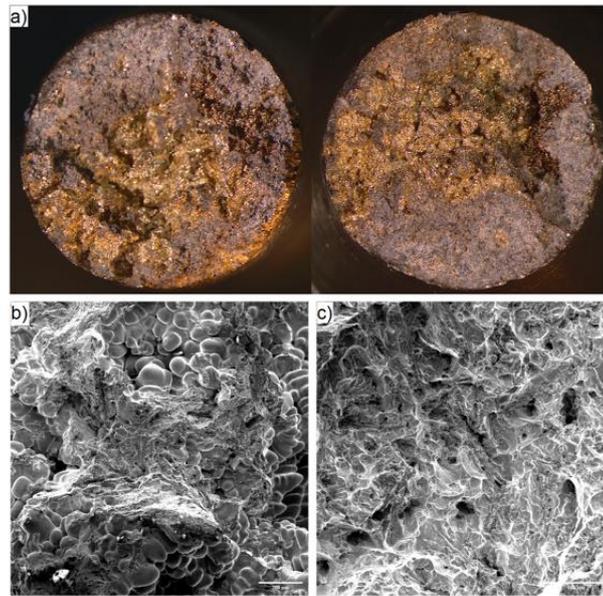


Figura 3.24 Probeta de tracción de aleación Cu – Zn con adición de 1,5 % de ferro-silicio, elaborada por colado de las probetas en posición vertical. a) Macrografía con un aumento de 0,5X, b) y c) Imágenes de microscopía electrónica de barrido de electrones secundarios con un aumento de 100X y 300X, respectivamente.
(Fuente: Propia)

La Figura 3.25 a) - f) muestra los elementos presentes en el área que exhibe una coloración distinta, localizada en el área donde se generó la fractura al momento de realizar el ensayo de tracción. La Figura 3.25 g) muestra el espectro de rayos X generado por espectrometría por dispersión de energía de rayos X (EDS). La detección y análisis de estos rayos X crea un perfil detallado de la composición química de la zona de interés.

La identificación y cuantificación de los elementos en la muestra de estudio depende de la información del espectro de rayos X. Cada elemento químico tiene picos de energía únicos en su espectro de rayos X. La concentración de cada elemento y la composición química de la muestra se puede determinar en función de la altura y la cuantificación de estos picos.

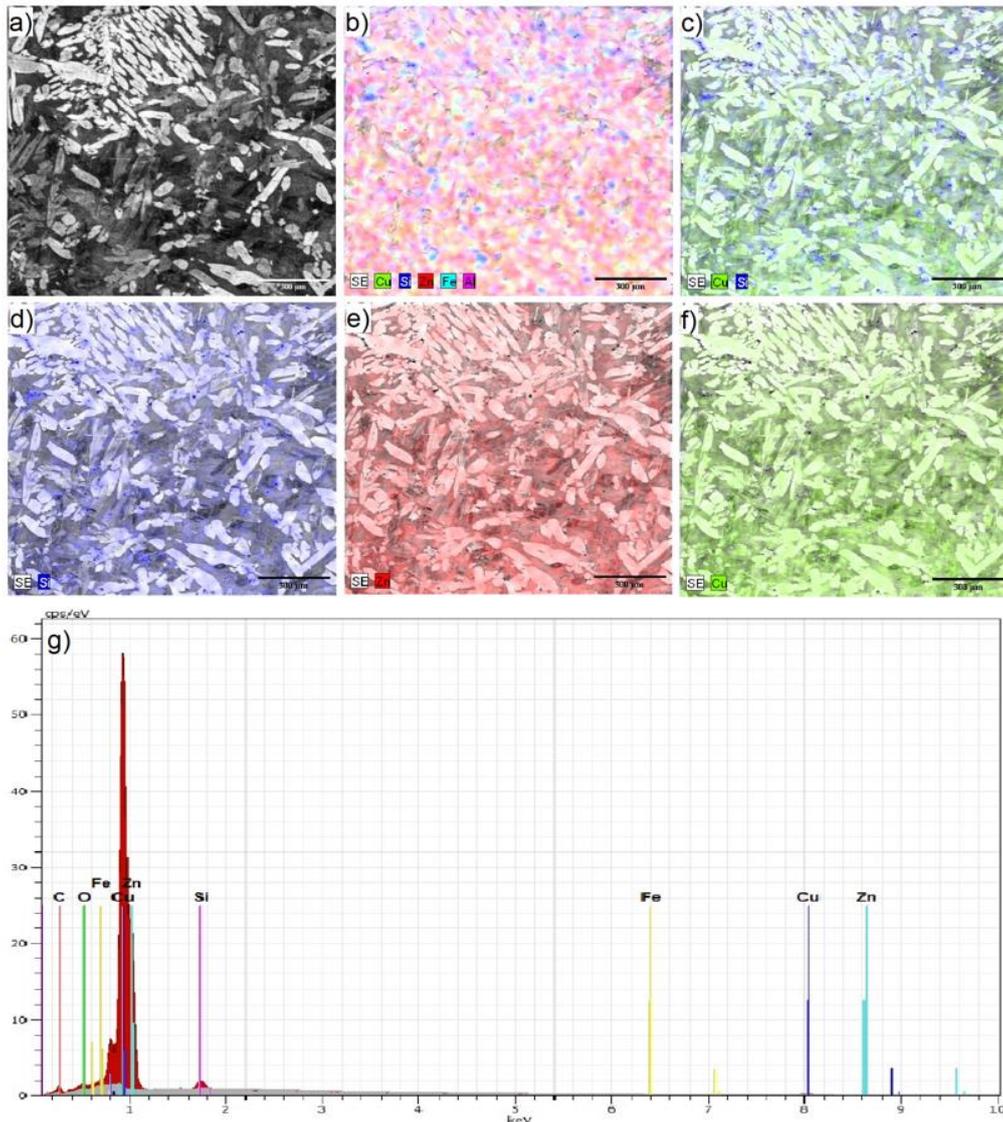


Figura 3.25 Análisis de la zona de fractura mediante la técnica de espectrometría por dispersión de energía de rayos X (EDS) de la probeta con un contenido de 1,5 % de ferro-silicio, elaborada por colado de las probetas en posición vertical. a) – f) mapeo de rayos x de los diferentes elementos que contiene la muestra y g) espectro de rayos X característicos.
(Fuente: Propia)

La Tabla 3.7 proporciona una representación cuantitativa del porcentaje en peso de cada elemento identificado en la zona que exhibe una coloración diferente en la probeta elaborada a partir de una aleación de Cu – Zn con un contenido de 1,5 % de ferro-silicio en su composición química, como se muestra en la Figura 3.24. Esta información se obtiene del histograma o espectro generado mediante la técnica de espectrometría por dispersión de energía de rayos X (Figura 3.25 g)).

Tabla 3.7 Composición química obtenida de la técnica de espectrometría por dispersión de energía de rayos X (EDS) de la probeta con un contenido de 1,5 % de ferro-silicio, elaborada por colado de las probetas en posición vertical.

Elementos	Cobre	Cinc	Carbono	Oxígeno	Silicio	Hierro
Porcentaje en peso, (wt. %)	68,48	27,42	1,97	0,92	0,81	0,39

(Fuente: Propia)

3.2. Discusión

En este apartado, se aborda el análisis de los resultados previamente presentados, junto con una evaluación comparativa entre el proceso de fundición experimental y su respectiva simulación por computadora.

3.2.1. Resultados de la caracterización de las muestras de la aleación de Cu – Zn – FeSi coladas en posición vertical

La aleación Cu – Zn es conocida por su versatilidad en aplicaciones de ingeniería. Sin embargo, la adición de ferro-silicio en su composición química agrega un valor adicional de complejidad y posibilidades para su uso en múltiples aplicaciones. Las propiedades físicas y mecánicas de la aleación están directamente influenciadas por la cantidad de ferro-silicio que contiene.

La evaluación de los resultados obtenidos de los diferentes ensayos realizados a las probetas elaboradas a partir de la aleación de Cu – Zn – FeSi dispuestas en posición vertical proporcionan una visión de como las variables y parámetros del proceso de fundición por gravedad afectan las propiedades mecánicas y microestructurales del material. El análisis de la dureza, microdureza, tamaño de silicio y metalografía presenta un sustento importante para comprender como influyen estos factores en el comportamiento de la aleación.

El análisis de los datos de la Figura 3.6 muestra una correlación entre los porcentajes de FeSi en la composición química de la aleación y las propiedades microestructurales analizadas. En particular, se exhibe un patrón de comportamiento a partir de los resultados de los ensayos realizados. Este patrón sugiere que los cambios en la composición de la aleación, en términos del contenido de silicio, influyen directamente en las propiedades mecánicas y microestructurales del material.

La comprensión teórica de como el silicio interacciona con la matriz y afecta sus propiedades se respalda con la información extraída de los ensayos realizados, de la cual se determina que el contenido de silicio en la aleación Cu – Zn – FeSi es directamente

proporcional a la dureza y la densidad del material. La dureza de la muestra con un 0,5 % de ferro-silicio en su composición química disminuyó un 14,87 % en comparación con el material de referencia C38500, debido a que la cantidad de ferro-silicio no es lo suficiente como para alterar las propiedades de la aleación. Por otro lado, la dureza de la probeta con un 2 % de ferro-silicio aumentó un 22,04 % en comparación con el material de referencia mencionado anteriormente.

Debido a su contribución en la formación de fases más duras, el contenido de silicio incrementa la dureza. Además, como se muestra en la Figura 3.5, el tamaño de las partículas de silicio tiene un impacto en la densidad resultante del material porque una mayor cantidad de partículas afecta la compactación de la matriz. Se determinó que las muestras con un contenido del 2 % de ferro-silicio presentaron un incremento significativo de tamaño de las partículas de silicio del 92,31 % en comparación con las muestras con un 0,5 % de ferro-silicio. Esta afirmación se alinea con los principios fundamentales de la metalurgia, donde la adición de silicio y hierro son componentes conocidos por elevar la dureza y resistencia en las aleaciones que los contienen [79, 95].

Las indentaciones realizadas en las fases α y β' presentes en la microestructura se efectuaron con la finalidad de evaluar y comparar el comportamiento mecánico de cada una. Al llevar a cabo indentaciones en cada fase, se obtuvo perfiles de dureza que reflejan la variación de esta propiedad a lo largo de la microestructura de la aleación. Esta información es útil para identificar zonas de mayor o menor dureza y correlacionarlas con las fases presentes, lo que contribuye a una comprensión de cómo se distribuyen las propiedades mecánicas en el material. En la Figura 3.4 se observa que la fase α muestra una alteración leve del 12,81 % en las probetas con un porcentaje de ferro-silicio del 2 %, la cual presenta la mayor variación en comparación con el material de referencia (C38500). Esta observación demuestra que la presencia de la fase α proporciona estabilidad independientemente de los cambios de ferro-silicio en la composición química de las aleaciones de cobre y cinc. Además, la Tabla 3.3 muestra que los valores de microdureza de la fase α presentan una concordancia con los resultados de la dureza final del material, es decir, con base en estos valores es posible estimar la magnitud de dureza que exhibirá el material.

En contraste, la fase β' muestra un comportamiento diferente en relación con la variación del contenido de ferro-silicio en la composición de la aleación Cu – Zn. En comparación con el material de referencia, la fase β' aumenta en un 30,54 % en proporción a la cantidad de ferro-silicio que contiene la aleación. Esto respalda la afirmación de que el contenido de silicio retrasa la descincificación de los latones dúplex (60Cu – 40Zn), que presentan las

fases alfa (FCC) y beta prima (BCC) en su microestructura [149]. La estructura cristalina ordenada (β') de la fase alfa, se caracteriza por átomos de cobre en los extremos y un átomo de cinc en el centro, o viceversa. Por lo tanto, la adición de silicio a la composición de los latones dúplex contribuyen en la disminución de la corrosión por descincificación, esta característica es útil en la selección y diseño de aleaciones específicas para aplicaciones donde la resistencia a la corrosión es crítica. La capacidad para deformarse a temperatura ambiente es limitada en los latones dúplex o aleaciones Muntz, por esta razón se emplean para trabajos en caliente. El rango ideal de trabajo de este tipo de latón es de 650 °C a 750 °C [23, 79].

El proceso de descincificación del latón es un tipo de corrosión selectiva que se produce cuando el cinc de la aleación se disuelve, dejando una matriz de cobre poroso y debilitada [95]. En comparación con otras fases presentes en la microestructura del latón, la presencia de silicio en la aleación promueve la formación y estabilización de la fase α durante la solidificación. La fase α actúa como una barrera efectiva contra la corrosión debido a que es más resistente a la descincificación [149]. Como se expone en la Tabla 3.2, las micrografías obtenidas de las probetas fundidas en posición vertical presentan una microestructura bifásica compuesta por las fases α y β' . La presencia de silicio primario en la microestructura se manifiesta en forma de poliedros irregulares de color gris azulado que se distribuyen aleatoriamente dentro de la matriz bifásica.

A medida que aumenta la cantidad de ferro-silicio en la composición química de la aleación, se observa un incremento en la dureza en comparación con el material de referencia (C38500), como se muestra en la Figura 3.3. La presencia y magnitud de la fase β' en la microestructura explica este comportamiento, con su característico tono más claro confiere resistencia y durabilidad al material. La fase β' presenta propiedades de dureza y fragilidad, estas cualidades se encuentran directamente relacionadas con la dureza del material. Es importante tener en cuenta que la relación entre el contenido de ferro-silicio y la dureza puede utilizarse de manera estratégica para obtener elementos con propiedades mecánicas específicas dependiendo de la función que vaya a desempeñar en una aplicación.

La fase α , presenta un tono más oscuro y una morfología similar a una aguja, se origina en los límites de grano debido a que estas zonas presentan una elevada energía. Esta fase se caracteriza por aportar propiedades mecánicas como la ductilidad. La característica morfológica en forma de aguja observada en la microestructura es el resultado de un rápido enfriamiento, dando lugar a la conocida estructura Widmanstätten. Esta estructura se

identifica en la microestructura cuando varias agujas se agrupan y tienen la misma dirección como se muestra en la Tabla 3.2.

El análisis de la información presentada en la Tabla 3.3 permite extraer conclusiones que influyen en la toma de decisiones del diseño y en la selección de materiales para aplicaciones en específico. La relación entre los porcentajes de ferro-silicio y las propiedades microestructurales enfatiza la importancia de controlar la composición química durante el proceso de fundición para obtener los mejores resultados mecánicos y funcionales posibles. Esto destaca el papel que juega la ingeniería de materiales en la selección y ajuste de los componentes de la aleación para obtener propiedades determinadas.

3.2.2. Resultados de la simulación de las probetas coladas en posición horizontal y vertical de la aleación de Cu – Zn – FeSi

Es importante destacar que los valores cuantitativos proporcionados por el análisis a través de los resultados de las simulaciones no solo apoyan la comprensión teórica de la aleación, sino que también pueden ser validados por los resultados experimentales y modelos teóricos [43]. Esta convergencia de información ayuda a tomar decisiones sobre diseño, materiales y optimización de procesos.

La solidificación del material y la microestructura resultante de la pieza fundida están influenciadas por las variaciones de temperatura del metal líquido mientras fluye a través de las cavidades del molde y el sistema de alimentación. La distribución de la temperatura del metal fundido en las probetas dispuestas en posición horizontal y vertical muestran características similares.

El análisis del proceso de fundición de probetas en posición horizontal muestra un problema evidente en el diseño del canal de colado y del sistema de alimentación. Como se muestra en Figura 3.10, la velocidad del metal líquido durante el llenado de las cavidades del molde indica una ineficiencia en el flujo del material. En particular, la sección curva semicilíndrica del sistema de alimentación presenta cambios en la sección transversal, lo que resulta en un flujo turbulento en lugar de un flujo uniforme y constante.

El proceso de solidificación de las probetas se ve afectado por el fenómeno de flujo turbulento. Esto se debe al movimiento de aire que se produce dentro del molde, lo que provoca su retención en áreas específicas, particularmente en las zonas donde se producen cambios de sección (Figura 3.13). Como se muestra en la Tabla 3.1, estas áreas

son precisamente donde se observaron defectos en las probetas elaboradas en el proceso de fundición experimental.

En este caso, ciertas áreas de las probetas se solidifican antes que las mazarotas, en contraste con el diseño ideal, donde se espera que las mazarotas sean los elementos que solidifiquen en última instancia. La presencia de poros internos en la mayoría de las probetas obtenidas experimentalmente se debe a este fenómeno. Las áreas que se solidifican primero no reciben suficiente material de las mazarotas, lo que provoca defectos en el material fundido.

En contraste, las probetas coladas en posición vertical presentan una distribución de material más uniforme debido a la configuración de diseño del sistema de alimentación (Figura 3.11). Además, como se muestra en la Figura 3.12, las mazarotas se solidifican en última instancia, lo que permite que puedan agregar material si es necesario. Como resultado, las probetas obtenidas no mostraron defectos en los cambios de sección. El diseño de las probetas en posición vertical reduce los problemas de flujo turbulento y garantiza una solidificación uniforme en toda la pieza.

Mediante la interpretación de los resultados visuales y termográficos obtenidos de la simulación por computadora, es posible identificar la formación de juntas frías o el llenado insuficiente de determinadas cavidades. Además, muestra cómo las propiedades térmicas de la aleación influyen en el diseño del sistema de alimentación y los materiales utilizados en la fabricación del molde.

La geometría del molde, la disposición de las probetas y las características de flujo del material fundido están relacionadas con la diferencia del tiempo de llenado. Para comprender y optimizar el proceso de fundición, se debe analizar la representación termográfica del tiempo de llenado obtenida a partir de la simulación por computadora (Figura 3.12). El análisis del proceso de fundición muestra que las áreas que tardan más tiempo en llenarse son más propensas a sufrir defectos como rechupes o cavidades no llenas, lo que compromete la integridad de las probetas. Las probetas coladas en posición horizontal muestran una distribución desigual del tiempo de llenado, con áreas específicas que tardan más en llenarse por completo. Estas áreas de llenado prolongado sugieren que el sistema de alimentación y el canal de colado no cumplen su función.

Por otro lado, las probetas coladas en posición vertical muestran una distribución ideal del tiempo de llenado en cada parte del sistema de alimentación. Esta configuración reduce las áreas que requieren un tiempo de llenado prolongado y permite un flujo de material

constante y eficiente. Como resultado, el material fundido se distribuye uniformemente por toda la pieza, lo que reduce la probabilidad de que se formen defectos.

Como se muestra en la Figura 3.20, no hay evidencia de que exista transferencia de calor desde el interior al exterior del sistema de alimentación. Indica que las dimensiones de los elementos que componen el sistema en conjunto con las probetas requeridas y los materiales con los que fueron elaborados los moldes son correctos. La solidificación uniforme y controlada garantizada por la ausencia de transferencias de calor no deseadas desde el interior de los modelos hacia el exterior contribuye a la obtención de piezas fundidas con una microestructura homogénea.

Los resultados de la simulación respaldan de manera concluyente los defectos observados en las probetas obtenidas del proceso de fundición en posición horizontal (Tabla 3.5). Estos hallazgos resaltan la importancia de optimizar el diseño del sistema de alimentación, particularmente el canal de colado, para garantizar un tiempo de llenado constante en todas las áreas del molde [150].

Es imperativo resaltar que el proceso de fundición depende de factores como la temperatura de fusión del material, la velocidad de vertido del metal fundido y la geometría del modelo, entre otros. Además, es importante mencionar que controlar la solidificación del material fundido es necesario para evitar defectos como porosidad, segregación y tensiones residuales que podrían comprometer la integridad estructural de la pieza fundida.

A pesar de los avances en la simulación por computadora, específicamente del proceso de fundición, todavía existen variables que no se pueden controlar en la producción experimental [151]. Por esta razón, ciertos defectos que se evidenciaron en la simulación, no se presentaron en las probetas elaboradas experimentalmente, pero estos advierten que en esa área existe algún problema y que en futuras coladas pueden presentarse de no solventar la causa que genero dichos defectos. Los resultados de la simulación son altamente confiables para la mayoría de los factores evaluados (llenado del molde, solidificación, enfriamiento y localización e identificación de defectos), pero aún se requiere una optimización de los software CAD Y CAM hasta alcanzar una mayor confiabilidad dado que el proceso de fundición se encuentra en un continuo desarrollo [152]. El porcentaje de defectos identificados tanto en la simulación como en las probetas elaboradas experimentalmente fue del 75 %.

Otro factor a considerar al obtener resultados fiables con la realidad es el tipo de modelo matemático que utiliza el software de simulación para resolver las ecuaciones. Los modelos matemáticos más comunes son: método de volúmenes finitos (FVM), método de

diferencias finitas (FDM), método de elementos finitos (FEM), método de automatización celular (CA), método de elementos vectoriales (VEM), entre otros [153 - 155]. El software Altair Inspire Cast utiliza modelos matemáticos basados en elementos finitos (FEM) [156]. Utilizando este modelo se han obtenido buenos resultados en el proceso de fundición en arena y en la resolución de problemas multidimensionales complejos (análisis de transferencia de calor) [157 - 158].

3.2.3. Resultados del proceso de fundición experimental y teórico del proceso de fundición por gravedad de la aleación de Cu – Zn – FeSi

La simulación por computadora es una herramienta para predecir y modelar el comportamiento de materiales en diferentes condiciones. Los parámetros y especificaciones de los modelos utilizados se pueden evaluar comparando los resultados experimentales con las predicciones de la simulación [159]. Las diferencias entre los datos experimentales y simulados indican las áreas donde los modelos, junto con sus respectivos sistemas de alimentación, pueden requerir refinamiento o ajuste para mejorar la concordancia entre las predicciones y la realidad. Esto respalda la optimización continua de los procesos de fundición y una mejor toma de decisiones con respecto al diseño y la producción.

La detección y evaluación de la naturaleza de los defectos en componentes fundidos es un paso crucial hacia la optimización de procesos. Estos defectos pueden ser causados por una variedad de factores, que van desde problemas con el diseño del sistema de alimentación hasta variaciones en los parámetros de fundición e inconsistencias en la composición química del material [159]. Es fundamental señalar que la presencia de defectos en las piezas fundidas no debe ser vista como un error, sino como una oportunidad para aprender y mejorar. Para implementar soluciones efectivas y evitar la repetición de los errores, es importante identificar claramente las causas subyacentes.

En comparación con las probetas coladas en posición vertical, las piezas producidas por el proceso de fundición de probetas dispuestas en posición horizontal presentaron un mayor número de defectos (Tabla 3.4 y 3.5). La distribución irregular del metal líquido al llenar las cavidades es la causa de esta cantidad de defectos (Figura 3.10). La simulación por computadora del proceso de fundición por gravedad muestra un llenado desigual debido a la configuración del sistema de alimentación, lo que provoca un flujo turbulento que tiene un impacto en las propiedades y la funcionalidad de la fundición. Sin embargo, se puede observar un llenado uniforme en las probetas coladas en posición vertical (Figura 3.11).

Las probetas coladas en posición vertical mostraron un mejor acabado superficial, como se evidencia en la Figura 3.2. Estos resultados se deben a la selección de materiales y resinas utilizadas en la fabricación del molde, como se detalla en la Tabla 2.4. El acabado superficial de las piezas fundidas no solo influye en el aspecto estético, sino que también afecta directamente en las propiedades mecánicas, la durabilidad y la resistencia de los componentes. Una superficie con un acabado uniforme libre de poros mejora la resistencia a la fatiga, la resistencia a la corrosión y facilita procesos posteriores como el mecanizado y el recubrimiento.

A partir de los resultados de la representación gráfica de tiempo de llenado (Figura 3.12), se observa que hay áreas que se llenan antes y, por lo tanto, tienen un enfriamiento más rápido que aquellas que se llenan en última instancia. En las probetas coladas en posición vertical, se puede observar que una de ellas se llena en primer lugar y por ende presentará una mayor dureza. Esta propiedad se valida según el Anexo I, donde se muestra que una de las probetas en cada colada, variando el contenido de ferro-silicio, exhibe una mayor dureza respecto a las otras dos.

La principal causa de los defectos identificados en las probetas coladas en posición horizontal es el diseño del sistema de alimentación, específicamente la forma del canal de ataque y colado. Esto se debe a que los canales curvos semicilíndricos que alimentan las probetas y los canales con la misma morfología que las conecta con las mazarotas, no permiten un llenado uniforme de las probetas, provocando un flujo turbulento. Esto se puede observar mediante el análisis de la simulación de la velocidad del metal líquido (Figura 3.10), confirmando la importancia de utilizar esta herramienta antes de proceder con el proceso de fundición. Por lo tanto, se determina que la formación de defectos es producto de los cambios bruscos de sección entre los elementos que conforman el sistema de alimentación. Estos elementos deben permitir que el metal líquido llene la pieza de manera uniforme y también asegurar que la pieza se llene por completo antes que la mazarota para que pueda cumplir su función de aportar material en el caso de que la pieza lo requiera y sea el último elemento en solidificarse.

La disposición de las probetas es otro factor a considerar al analizar la formación de defectos, ya que la probabilidad de que haya áreas con aire atrapado es menor en las probetas coladas verticalmente porque a medida que se llena la pieza, se va desplazando el aire hacia el exterior del molde y también presenta una menor área de llenado. Por otro lado, en las probetas coladas en posición horizontal, el llenado de la pieza cubre una mayor superficie en el molde. Por lo tanto, es fundamental considerar estos factores al diseñar el sistema de alimentación para lograr un llenado uniforme.

3.2.4. Resultados de la caracterización por microscopía de las muestras coladas en posición vertical y horizontal de la aleación de Cu – Zn – FeSi

Se observó una peculiaridad al analizar las macrográficas de las probetas previamente sometidas a un ensayo de tracción. Estas imágenes mostraron la presencia de regiones con diferente tonalidad en las áreas cercanas a la zona de fractura de las probetas. Este cambio de tono no es solo un fenómeno visual, sino que está intrínsecamente ligado a la presencia de un defecto interno en las probetas. Durante el ensayo de tracción, este defecto actuó como un concentrador de esfuerzos y resultó en la fractura de la probeta. Para comprender la naturaleza de esta zona de fractura, se llevó a cabo un estudio de microscopía electrónica de barrido (SEM) utilizando detección de electrones secundarios (SE) y espectrometría por dispersión de energía de rayos X (EDS).

Los datos de espectroscopia por dispersión de energía (Tabla 3.6 y 3.7) confirmaron que el área afectada que experimentó un cambio de tonalidad no correspondía con la composición química esperada, en comparación con los valores predeterminados de la composición química del material en estudio (Tabla 2.1). Esta discrepancia se debe a la presencia de un poro interno en la región en cuestión, el cual interactuó con los elementos de la aleación durante el proceso de solidificación [160]. Este defecto fue causado por la retención de gas durante la solidificación. La interacción entre el gas y la materia provocó una reacción química que generó un cambio en la composición química de la región afectada y se manifestó en una diferencia de color apreciable en las macrográficas.

La retención de gas en estas áreas puede deberse a fallas en el diseño del sistema de alimentación, lo que genere que se produzca un flujo turbulento durante llenado de las cavidades del molde. Otra explicación a este fenómeno resulta de una mala desoxidación y desgasificación durante el proceso de fusión de la aleación Cu – Zn – FeSi, ya que los materiales utilizados en el proceso de producción liberan diversos gases como el óxido cuproso y el hidrógeno que reaccionan para formar vapor de agua, lo que provoca poros durante el proceso de solidificación de la aleación. A pesar de que se utilizó bórax para llevar a cabo esta función, existen mejores elementos en el mercado que sirven para este propósito en específico como el carbonato de calcio (CaCO_3) [79]. Este análisis se determinó debido a la presencia de oxígeno en la composición química obtenida a partir del espectro de rayos X característicos (Tabla 3.6 y 3.7).

La Figura 3.22 muestra una visión de la formación de dendritas, un fenómeno que se manifiesta como un patrón característico en la solidificación de las aleaciones. Este proceso es el resultado de condiciones de solidificación específicas, que se ven afectadas por

factores como la velocidad de enfriamiento y la composición química del material. La velocidad de enfriamiento influye en la formación de estas microestructuras dendríticas porque determina la velocidad a la que los átomos se unen y organizan durante la solidificación.

Es importante considerar la influencia de la composición de la aleación Cu – Zn – FeSi en la formación de dendritas. Una de las variables a considerar es la longitud de las dendritas, por lo general se desea un tamaño de dendrita pequeño, ya que esta variable controla la segregación, la estructura y la porosidad del material. Otra variable es el espaciamiento interdendrítico, cuanto menor sea el espaciamiento entre dendritas se presenta una mejora en la ductilidad y la resistencia última a la tensión aumentará [62]. La estructura dendrítica presenta una zona ordenada y una interdendrítica. Debido a la coexistencia de estas dos regiones varían las propiedades mecánicas. La estructura principal de las dendritas tiene una mayor densidad de enlaces atómicos, lo que aumenta la dureza. Sin embargo, las regiones interdendríticas tienden a ser más blandas debido a su estructura menos ordenada. La resistencia mecánica también se ve afectada porque las dendritas actúan como barreras para la propagación de grietas, aumentando la resistencia mecánica, mientras que las regiones interdendríticas pueden actuar como concentradores de esfuerzos. La orientación de las dendritas también es una variable que influye en la anisotropía mecánica del material, ya que las propiedades mecánicas cambian dependiendo de la dirección de la fuerza aplicada [161 - 165]. A medida que la nucleación y crecimiento de dendritas aumenta, estas se compactan, formando dendritas columnares más estables en sus propiedades.

Basándose en lo estipulado anteriormente y al defecto resultante del proceso de fundición identificado en esta región, las dendritas no presentaron una proliferación de crecimiento excesivo que provoque su compactación, reduciendo las regiones interdendríticas y la formación de dendritas columnares. Tanto las zonas interdendríticas como la presencia del poro interno se comportaron como un concentrador de esfuerzos y las regiones interdendríticas actuaron como iniciadores de la fractura.

Las aleaciones suelen exhibir una nucleación heterogénea, lo que significa que la formación de núcleos sólidos no se produce de manera uniforme en toda la masa del material. Esto se debe en parte a la presencia de impurezas y nucleación en las paredes de los moldes utilizados en el proceso de fundición. Debido a la baja energía de activación requerida para alcanzar el tamaño crítico equivalente, la interfaz entre el material fundido y el molde proporciona sitios favorables para la nucleación [64].

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- Se identificaron deficiencias en el sistema de alimentación de las probetas coladas en posición horizontal, mediante el análisis del flujo de metal líquido durante el llenado de las cavidades del molde y la solidificación de la pieza.
- El colado de probetas en posición vertical con aleación Cu – Zn – FeSi es más eficiente y cuenta con menos defectos que el colado en posición horizontal, independientemente de la cantidad de ferro-silicio que contenga.
- La probeta que más se asemeja a la aleación de referencia (C38500) contiene un 1 % de ferro-silicio, con una diferencia de dureza del 5 %, un aumento del 24.32 % en la fase β' y del 10 % en la fase α en la microdureza. En las micrografías, el análisis morfométrico muestra una diferencia del 4.4 % en la fase β' y del 2.6 % en la fase α .
- El control de la presencia de una mayor fracción volumétrica de la fase α en aleaciones Cu – Zn reduce la descincificación, ya que esta fase actúa como una barrera eficaz contra la corrosión al ser más resistente.
- El contenido de silicio en la composición química de la aleación Cu – Zn es directamente proporcional a la dureza final del material. Determinado a partir del análisis de los ensayos realizados en las diferentes probetas según la cantidad de ferro-silicio que contienen.
- El análisis de la zona de fractura de la probeta que contiene 1,5 % de ferro-silicio mediante la técnica SEM con SE, reveló el crecimiento de estructuras dendríticas, las cuales afectan la dureza y la resistencia mecánica del material dependiendo de la morfología que presenten.
- La espectrometría EDS demostró un cambio en la composición química en el área de fractura de las probetas, lo que explica el cambio de tonalidad en la región de análisis, debido a una inadecuada desoxidación y desgasificación durante la fusión de la aleación Cu – Zn – FeSi.
- Los resultados obtenidos validan la sustitución de plomo por silicio en aleaciones Cu – Zn, ya que no se observan cambios significativos en los valores cotejados. A pesar de que la maquinabilidad disminuye debido al aumento de la dureza, pero este aspecto se compensa optimizando los parámetros de operación del mecanizado.

4.2. Recomendaciones

- Para futuras investigaciones, se recomienda enfocarse en la implementación de la fundición por gravedad con la aleación Cu – Zn – FeSi para una aplicación en específico. Se propone utilizar una fundición centrífuga horizontal, aprovechando la fuerza centrífuga para producir tuberías. Esto permitirá evaluar la aleación en condiciones extremas y la obtención de información sobre su resistencia bajo cargas variables.
- Se sugiere crear un modelo de una válvula para simular condiciones reales de servicio y evaluar la aleación Cu – Zn – FeSi bajo diversas condiciones de presión, temperatura y corrosión. Esto ayudará a determinar cómo se comportará en situaciones críticas. Las pruebas validarán y ampliarán hallazgos previos, proporcionando una base sólida para la selección de materiales en aplicaciones industriales mediante la caracterización de propiedades mecánicas.
- Según el estudio, para producir componentes en posición horizontal se requiere una mejora en el diseño del sistema de alimentación modificando los canales de colado y ataque para que tengan una forma completamente cilíndrica. Esto garantizará un llenado uniforme sin turbulencias, ni cambios bruscos de sección, evitando la formación de defectos en el punto de conexión entre el canal de colado y la pieza. Para conseguir un acabado de alta calidad, el molde debe fabricarse con arena de sílice y resinas furánicas. Con el objetivo de asegurar la repetibilidad y consistencia del proceso al integrar el sistema de alimentación con la pieza a replicar, la fabricación del molde debe realizarse mediante modelos de capucha y base.
- Se recomienda moler la arena utilizada en la elaboración de moldes para reciclarla. Los moldes utilizados se desintegrarán en trozos más pequeños con una trituradora de mandíbulas y luego se refinarán con un molino de martillos. Para garantizar la calidad de la arena reciclada según los estándares de la American Foundry Society (AFS), se deben realizar ensayos de granulometría y LOI. El reciclaje de arena en la industria de la fundición tiene un impacto económico y ambiental.
- La desoxidación y desgasificación deben llevarse a cabo utilizando materiales adecuados para la eliminación del hidrógeno y óxido cuproso producidos durante el proceso de fusión de las aleaciones de cobre. El carbonato de calcio (CaCO_3) es una alternativa viable porque libera CO_2 como gas colector cuando se calienta. El bórax es una alternativa económica y fácilmente asequible que cumple con esta función, pero en ocasiones puede retener gases como el nitrógeno, creando defectos en el producto final. Además, se debe introducir el agente desgasificante

antes que el vidrio para que exista una mejor evacuación de los gases previo a que se genere la capa aislante en la superficie producto de la fusión del vidrio.

Referencias Bibliográficas

- [1] S. Schmid y S. Kalpakjian, *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*, Quinta Edición. Pearson educación, 2008.
- [2] M. P. Groover, *Fundamentos de manufactura moderna*, Tercera edición. México, DF: Mc Graw Hill, 2007.
- [3] J. Vallejo, "Simulación de fundición por ordenador mediante QuikCAST", *Universidad de Zaragoza. Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación, Área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación*, 2013.
- [4] B. Ravi, R. C. Creese, y D. Ramesh, "Design for Casting-A New Paradigm for Preventing Potential Problems", *Transactions of the American Foundry Society*, 1999.
- [5] W. Erickson, "The use of general purpose software in casting solidification simulation", *Metallurgical Transactions B*, 1977, doi: 10.1007/BF02656356/METRICS.
- [6] I. Rajkumar y N. Rajini, "Metal casting modeling software for small scale enterprises to improve efficacy and accuracy", *Mater Today Proc*, 2021, doi: 10.1016/J.MATPR.2021.02.542.
- [7] P. Jácome-Monar y C. S. B. Arma, "Validación del diseño de un producto: análisis de la manufacturabilidad de un producto de grifería", *Tecnología & Diseño*, 2021.
- [8] C. M. Choudhari, B. E. Narkhede, y S. K. Mahajan, "Casting Design and Simulation of Cover Plate Using AutoCAST-X Software for Defect Minimization with Experimental Validation", *Procedia Materials Science*, 2014, doi: 10.1016/J.MSPRO.2014.07.095.
- [9] V. Vazquez, A. Juarez, A. Mascarenas, P. Zambrano, y M. Hernandez, "Cold shut formation analysis on a free lead yellow brass tap", *Eng Fail Anal*, 2010, doi: 10.1016/J.ENGFAILANAL.2010.03.002.
- [10] M. Tang, P. Sinsheimer, E. Sarver, J. Parks, y M. Edwards, "Evaluating 'Lead-Free' Brass Performance in Potable Water", *Corrosion*, 2019, doi: 10.5006/3060.
- [11] M. Sahoo, M. Sadayappan, y F. A. Fasoyinu, "Permanent Mold Casting of Copper-Base Alloys for Plumbing Applications", *Journal of Korea Foundry Society*, 2000.
- [12] F. P. Floristán, "Materiales para la fabricación de las griferías sanitarias", 2009.

- [13] NTE INEN 3123, "Grifería. Llaves. Definiciones, requisitos y métodos de ensayo", Quito, Ecuador.
- [14] M. C. Dozier y M. McFarland, "Problemas del agua potable: El plomo", Cooperative de Texas Extensión, El Sistema Universitario Texas A & M.
- [15] S. Triantafyllidou, "Addressing and Assessing Lead Threats in Drinking Water: Non-Leaded Brass, Product Testing, Particulate Lead Occurrence and Effects of the Chloride to Sulfate Mass Ratio on Corrosion", *Doctoral dissertation, Virginia Tech*, 2006.
- [16] P. Poma, "Intoxicación por plomo en humanos", *Anales de la Facultad de Medicina*, 2008.
- [17] A. Vedantha Krishna y V. V. Reddy, "LEAD FREE BRASS: Study and Analysis of the surface integrity of lead brass and unleaded brass.", 2015.
- [18] M. C. Dozier, M. McFarland, y B. J. Lesikar, "Problemas del agua potable: El cobre", *Cooperative de Texas Extensión, El Sistema Universitario Texas A & M.*, 2006.
- [19] J. C. Rushing, "Advancing the understanding of water distribution system corrosion: effects of chlorine and aluminum on copper pitting, temperature gradients on copper corrosion, and silica on iron release", 2002.
- [20] C. Yang *et al.*, "Microstructural Evolution and Mechanical Behavior of Lead-Free Silicon Brass Manufactured by Low-Pressure Die Casting", *J Mater Eng Perform*, 2018, doi: 10.1007/S11665-018-3615-0/METRICS.
- [21] S. Puathawee, S. Rojananan, y S. Rojananan, "Lead-Free Cu-Si-Zn Brass with Tin Addition", *Adv Mat Res*, 2013, doi: 10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/AMR.802.169.
- [22] M. A. Taha, N. A. E-Mahallawy, T. M. Mousa, R. M. Hamouda, y A. F. A. G. Yousef, "Microstructure and castability of lead-free silicon brass alloys", *Materwiss Werksttech*, 2012, doi: 10.1002/MAWE.201200932.
- [23] D. D. Davies y M. Chem, "A note on the dezincification of brass and the inhibiting effect of elemental additions", 1993.
- [24] Y. Zhang, "Dezincification and Brass Lead Leaching in Premise Plumbing Systems: Effects of Alloy, Physical Conditions and Water Chemistry", dic. 2009.

- [25] G. Chunlei, Z. Nan, K. Yuehua, W. Shuncheng, y Z. Kaihong, "Failure analysis of lead-free brass valve bodies", *Eng Fail Anal*, 2019, doi: 10.1016/J.ENGFAILANAL.2019.03.001.
- [26] G. A. Tkachuk, O. A. Chikova, y V. A. Maltsev, "Examining microstructure of industrial brass blanks with purpose for quality control in respect of defects of technological origin", *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*, 2017, doi: 10.1088/1755-1315/87/9/092027.
- [27] M. Groover, *Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes, and systems*. John Wiley & Sons, 2020.
- [28] M. Groover, *Materiales e Ingeniería. El Cobre y sus Aleaciones.*, 1a ed. Ciudad de México: Pearson Educación, 1997.
- [29] Z. Guo, N. Saunders, A. P. Miodownik, y J. P. Schillé, "Modelling of materials properties and behaviour critical to casting simulation", *Materials Science and Engineering*, 2005, doi: 10.1016/J.MSEA.2005.09.036.
- [30] T. R. Moliner, A. P. Expósito, y U. O. Hernández, "Predicción de defectos en piezas fundidas mediante el uso de la simulación", *Revista Cubana de Ingeniería*, 2010.
- [31] V. S. Gondkar, "Optimization of Casting Process Parameters through Simulation", *International Journal of Engineering Development and Research*, 2014.
- [32] G. Chunlei, S. Dongfu, Z. Kaihong, W. Haiyan, y Z. Nan, "Failure analysis of a lead-free brass tap used in potable water", *Eng Fail Anal*, 2016, doi: 10.1016/J.ENGFAILANAL.2015.11.010.
- [33] NSF International Standard y American National Standard, "Drinking Water System Components-Health Effects", 2016.
- [34] C. Vilarinho, J. P. Davim, D. Soares, F. Castro, y J. Barbosa, "Influence of the chemical composition on the machinability of brasses", *J Mater Process Technol*, 2005, doi: 10.1016/J.JMATPROTEC.2005.05.035.
- [35] C. Yang *et al.*, "High-strength and free-cutting silicon brasses designed via the zinc equivalent rule", *Materials Science and Engineering: A*, 2018, doi: 10.1016/J.MSEA.2018.03.055.
- [36] C. Yang, Y. J. Zhao, L. M. Kang, D. D. Li, W. W. Zhang, y L. C. Zhang, "High-strength silicon brass manufactured by selective laser melting", *Mater Lett*, 2018, doi: 10.1016/J.MATLET.2017.09.011.

- [37] F. Schultheiss, D. Johansson, V. Bushlya, J. Zhou, K. Nilsson, y J. E. Ståhl, "Comparative study on the machinability of lead-free brass", *J Clean Prod*, 2017, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2017.02.098.
- [38] H. Miura, T. Kobayashi, y M. Kobayashi, "Microstructure and properties of ultrafine grained structure of Cu-Zn-Si alloy fabricated by heavy cold rolling", *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, 2014, doi: 10.1088/1757-899X/63/1/012095.
- [39] F. Schultheiss *et al.*, "Machinability of Lead-Free Brass – A comparative study", 2014.
- [40] V. Bushlya, D. Johansson, F. Lenrick, J. E. Ståhl, y F. Schultheiss, "Wear mechanisms of uncoated and coated cemented carbide tools in machining lead-free silicon brass", *Wear*, 2017, doi: 10.1016/J.WEAR.2017.01.039.
- [41] F. Schultheiss, C. Windmark, S. Sjöstrand, M. Rasmusson, y J. E. Ståhl, "Machinability and manufacturing cost in low-lead brass", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, doi: 10.1007/S00170-018-1866-4/METRICS.
- [42] M. V. Carrión Vargas, "Estudio de la influencia del tipo de arena en el llenado de un molde en arena verde, para la fundición de un disco de freno, a través de la simulación CFD", 2020.
- [43] B. Ravi, *Metal casting: computer-aided design and analysis*. 2005.
- [44] J. W. Morales Ruiz, "Desarrollo de un sistema de moldeo automatizado para piezas complejas en superaleaciones", 2017.
- [45] *Mejores técnicas disponibles de referencia europea: forja y fundición*. España: Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2010.
- [46] S. M. Alzate y E. H. Pulgarín, "Efecto de los factores de diseño en el cálculo de sistemas de llenado y alimentación sobre la calidad de dos componentes fundidos en arena". Universidad EIA, 2018.
- [47] J. Campbell, "Sixty Years of Casting Research", *Metall Mater Trans A Phys Metall Mater Sci*, 2015, doi: 10.1007/S11661-015-2955-8/METRICS.
- [48] P. Urrutia y F. Javier., "Diseño de los sistemas de distribución en procesos de fundición por gravedad mediante un método analítico", 2015.

- [49] P. E. Bazante del Pozo, "Diseño de un molde permanente de fundición por gravedad para la fabricación de pesas adhesivas de plomo utilizadas en balanceo de neumáticos", 2019.
- [50] D. Rodríguez y R. Salamanca, "Elaboración de guías de laboratorio para procesos de fundición en arena en la facultad de ingeniería de la Universidad Libre sede Bogotá".
- [51] E. David y H. Delgado, "Simulación mediante el programa Vulcan de la fundición de tres diferentes geometrías en aluminio", 2011.
- [52] W. Smith y J. Hashemi, *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*, Cuarta Edición. México, DF: McGraw-Hill, 2006.
- [53] J. Datsko y J. Wiley, *Material Properties and Manufacturing Processes*, 2a ed. United states of America, 1966.
- [54] L. Gong, B. Chen, Z. Du, M. Zhang, R. Liu, y K. Liu, "Investigation of Solidification and Segregation Characteristics of Cast Ni-Base Superalloy K417G", *J Mater Sci Technol*, vol. 34, 2018, doi: 10.1016/J.JMST.2016.11.009.
- [55] A. Juriani, "Casting Defects Analysis in Foundry and Their Remedial Measures with Industrial Case Studies", *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)* e-ISSN, doi: 10.9790/1684-12614354.
- [56] C. Chelladurai, N. S. Mohan, D. Hariharashayee, S. Manikandan, y P. Sivaperumal, "Analyzing the casting defects in small scale casting industry", *Mater Today Proc*, 2021, doi: 10.1016/J.MATPR.2020.05.382.
- [57] ASM International. Handbook Committee, "ASTM volume 15", p. 937.
- [58] M. N. Salán Ballesteros, "Tecnología de proceso y transformación de materiales", 2005, doi: 10.5821/EBOOK-9788498802924.
- [59] Segundo. Barroso Herrero, J. R. Gil Bercero, y A. M. Camacho López, *Introducción al conocimiento de los materiales y a sus aplicaciones*. UNED, 2008.
- [60] D. A. Porter, K. E. Easterling, y M. Y. Sherif, "Phase transformations in metals and alloys.", 1973.
- [61] W. D. Callister y D. G. Rethwisch, "Fundamentals of materials science and engineering: an integrated approach", 2020.

- [62] J. D. Verhoeven, O. Silva Luna, y G. Salas Banuet, "Fundamentos de metalurgia física", 1987.
- [63] D. Porter y A. Easterling, *Phase transformations in metals and alloys*. CRC PRESS, 2021.
- [64] D. R. Askeland y W. J. Wright, *The Science and Engineering of Materials*, 7th Edition. 2016.
- [65] P. F. Flores Logroño, "Estudio del efecto de la velocidad de calentamiento en las propiedades mecánicas de un acero de bajo carbono", 2011.
- [66] W. D. Callister y D. G. Rethwisch, "Materials science and engineering: An introduction", 2007.
- [67] Jr. Callister, William D., *Materials Science and Engineering - An Introduction*, 9th ed. 2014.
- [68] M. A. Alvarado Ramírez, "Relación entre microestructura y propiedades mecánicas en piezas vaciadas de aluminio", 1999.
- [69] C. O. Serrano Aguiar, E. F. García Cabezas, J. M. Orozco Ramos, y M. E. Calispa Aguilar, *Introducción a los Materiales Usados en la Ingeniería Mecánica y Eléctrica*. Centro de Investigación y Desarrollo Ecuador, 2018.
- [70] O. Quintero Sayago, "Solidificación", *Universidad Simón Bolívar. Departamento de Ciencia de Materiales*.
- [71] R. (Engineer) Francis, "The corrosion of copper and its alloys: a practical guide for engineers", 2010.
- [72] J. Davis, *Copper and copper alloys*. 2001.
- [73] P. De, P. Mecánica, S. Marcillo, y A. Rolando, "Elaboración de un manual para la selección y control de materiales", 2009.
- [74] Society of Automotive Engineers y American Society for Testing and Materials, *Metals & alloys in the unified numbering system.*, 14th Edition.
- [75] J. Duque, J. Luis, E. Llano, S. Hernando, y V. Amarís, "Estructura cristalina del cobre, propiedades microscópicas mecánicas y de procesamiento", *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 2006, doi: 10.18359/RCIN.1238.

- [76] A. H. Committee, "Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials", *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, 1990, doi: 10.31399/ASM.HB.V02.9781627081627.
- [77] S. Bahl, X. Hu, K. Sisco, J. A. Haynes, y A. Shyam, "Influence of copper content on the high temperature tensile and low cycle fatigue behavior of cast Al-Cu-Mn-Zr alloys", *International Journal of Fatigue*, 2020, doi: 10.1016/J.IJFATIGUE.2020.105836.
- [78] A. S. for Metals, "ASM handbook Vol.3, Alloy phase diagrams", *ASM Handbook*, 1992.
- [79] J. R. Davis, *Copper and copper alloys*. ASM International, 2001.
- [80] J. P. Pizango Ventimilla y J. J. Quinga Vega, "Caracterización de una aleación de latón obtenida por colado dinámico con variación de frecuencia", 2018.
- [81] C. Alejandra y L. Duque, "Purificación de residuos de latón de la industria de la grifería para su reciclaje", 2011.
- [82] S. H. Avner y J. L. Estrada Haen, *Introducción a la metalurgia física*, 2da Edición. McGraw-Hill, 1988.
- [83] F. C. Campbell, "Phase Diagram Determination", *Phase Diagrams—Understanding the Basics*, pp. 239–262, 2012.
- [84] E. P. Mora Pozo y E. Venegas Ledo, "Caracterización Del Latón", 2011.
- [85] V. S. Sastri, "Corrosion of permanent mould cast copper alloys in aqueous solutions", 2013, doi: 10.1179/174327805X29868.
- [86] F. J. Gil Mur y J. M. Manero Planella, "Metalografía", 2005.
- [87] H. Atsumi, H. Imai, S. Li, K. Kondoh, Y. Kousaka, y A. Kojima, "High-strength, lead-free machinable α - β duplex phase brass Cu-40Zn-Cr-Fe-Sn-Bi alloys", *Materials Science and Engineering*, 2011, doi: 10.1016/J.MSEA.2011.09.029.
- [88] P. García, S. Rivera, M. Palacios, y J. Belzunce, "Comparative study of the parameters influencing the machinability of leaded brasses", *Eng Fail Anal*, 2010, doi: 10.1016/J.ENGFANAL.2009.08.012.
- [89] C. Vilarinho, J. P. Davim, D. Soares, F. Castro, y J. Barbosa, "Influence of the chemical composition on the machinability of brasses", *J Mater Process Technol*, 2005, doi: 10.1016/J.JMATPROTEC.2005.05.035.

- [90] N. C. Papanikolaou, E. G. Hatzidaki, S. Belivanis, G. N. Tzanakakis, y A. M. Tsatsakis, "Lead toxicity update. A brief review", *Medical Science Monitor*, 2005.
- [91] A. Rodríguez Rey, L. Cuéllar Luna, G. Maldonado Cantillo, y M. E. Suardiaz Espinosa, "Efectos nocivos del plomo para la salud del hombre", *Revista Cubana de Investigaciones Biomédicas*, 2016.
- [92] H. Doostmohammadi y H. Moridshahi, "Effects of Si on the microstructure, ordering transformation and properties of the Cu60Zn40 alloy", *J Alloys Compd*, 2015, doi: 10.1016/J.JALLCOM.2015.03.228.
- [93] J. M. Granados, "Efecto de la sustitución del plomo por bismuto en el grado de maquinabilidad de un latón plomado", 2019.
- [94] M. Martínez-Hernández, A. Juárez-Hernández, C. González-Rivera, y M. A. L. Hernández-Rodríguez, "Bismuth segregation and crack formation on a free lead yellow brass tap", *Eng Fail Anal*, 2013, doi: 10.1016/J.ENGFAILANAL.2012.10.002.
- [95] P. Webster, "The Brasses Properties & Applications", Copper Development Association.
- [96] I. A. García Jaramillo, "Análisis de la influencia del silicio en la soldabilidad del acero ASTM A588 mediante el proceso SAW", 2020.
- [97] Capítulo y Silicio, "Guía didáctica Materiales y materias primas", *Buenos Aires: Instituto Nacional de Educación Tecnológica.*, 2011.
- [98] C. Bueno Blanco, "Caracterización de aleaciones de silicio para su empleo en el almacenamiento energético", 2016.
- [99] P. Guía, A. Hernán, R. González, A. : Cristian, y R. G. Jara, "Factibilidad Técnico Económica para la Comercialización del Ferrosilicio a Nivel Industrial en Chile", 2022.
- [100] D. Aniku y S. M. Imede, "Design and Simulation of HPDC Injection System for a Die Casting Value Chain for a Local Industry.", 2020.
- [101] I. Malik, A. A. Sani, y A. Medi, "Study on using Casting Simulation Software for Design and Analysis of Riser Shapes in a Solidifying Casting Component", *J Phys Conf Ser*, 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1500/1/012036.

- [102] A. D. Abdullin y A. A. Ershov, "End-to-End Simulation of Casting and Metal-Forming Operations with ProCAST and Qform Software", *Metallurgist*, 2014, doi: 10.1007/S11015-014-9913-3.
- [103] B. Hernández Cota, "Análisis por Computadora del Proceso de Fundición y Selección de Materiales para el nuevo diseño de Armadura del Plenum del Gulfstream V", 2019.
- [104] E. Jacob, R. Sasikumar, B. Praveen, y V. Gopalakrishna, "Intelligent design of feeders for castings by augmenting CAD with genetic algorithms", *J Intell Manuf*, 2004, doi: 10.1023/B:JIMS.0000026568.93342.35.
- [105] B. B. Kabnure, V. D. Shinde, y D. C. Patil, "Quality and yield improvement of ductile iron casting by simulation technique", *Mater Today Proc*, 2020, doi: 10.1016/J.MATPR.2019.09.022.
- [106] H. K. Kwon, "Layout Design and Die Casting Using CAE Simulation for Household Appliances", *Applied Sciences*, 2021, doi: 10.3390/APP112110128.
- [107] S. A. Santana-Reyes, I. Calzada-Pompa, Y. Morales-Tamayo, Y. K. Zamora-Hernández, y E. M. García, "Numerical Analysis and Experimental Validation of Pouring Casting Metal in Sand Mold", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 2022.
- [108] G. fa MI, X. yu LIU, K. fei WANG, y H. zhi FU, "Application of Numerical Simulation Technique to Casting Process of Valve Block", *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2009, doi: 10.1016/S1006-706X(09)60053-4.
- [109] B. G. Thomas, "Review on Modeling and Simulation of Continuous Casting", *Steel Res Int*, 2018, doi: 10.1002/SRIN.201700312.
- [110] Z. Guo y N. Saunders, "Modelling of materials properties and behaviour critical to casting simulation", *Elsevier*, 2005, doi: 10.1016/j.msea.2005.09.036.
- [111] A. D. Abdullin, "Detecting microporosity defects in steel castings by computer modeling of the casting operation in ProCAST", *Metallurgist*, 2013, doi: 10.1007/S11015-013-9707-Z/METRICS.
- [112] M. A. A. Khan y A. K. Sheikh, "Virtual Casting: State of the Art in Metal Casting Simulation Tools", *The Journal of Engineering Research [TJER]*, 2018, doi: 10.24200/TJER.VOL15ISS2PP42-54.

- [113] R. Raharjo, A. Wahyudiansyah, y A. Purnama, "Multilevel Pulley Analysis of Sand-Casting Process Results for Metal Casting Simulation Using Altair Inspire Cast".
- [114] M. Fernández y Javier, "Simulación de una pieza obtenida por fundición metálica", 2011.
- [115] L. Harshwardhan, R. C. Kaushik, T. Bheda, M. Somasundaram, y U. NarendraKumar, "Simulation of Sand-Casting Process Using Altair Inspire Cast", *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 2023, doi: 10.1007/978-981-19-3895-5_36/COVER.
- [116] S. Das, *Learn Casting and Solidification with Altair Inspire Cast*. 2019.
- [117] J. I. Goldstein *et al.*, "Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis", 2003, doi: 10.1007/978-1-4615-0215-9.
- [118] G. González y M. E. Noguez, "Principios de Microscopía Electrónica de Barrido y Microanálisis por Rayos X Característicos", 2006.
- [119] J. Liu, "High-resolution scanning electron microscopy", *Ultramicroscopy*, 1992.
- [120] A. Ul-Hamid, "A Beginners' Guide to Scanning Electron Microscopy", *A Beginners' Guide to Scanning Electron Microscopy*, 2018, doi: 10.1007/978-3-319-98482-7.
- [121] J. I. Goldstein, D. E. Newbury, J. R. Michael, N. W. M. Ritchie, J. H. J. Scott, y D. C. Joy, "Scanning electron microscopy and x-ray microanalysis", *Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis*, 2017, doi: 10.1007/978-1-4939-6676-9.
- [122] M. Marticorena, "Aplicaciones de láseres pulsados al procesamiento de biomateriales", 2007.
- [123] W. Zhou, R. Apkarian, Z. L. Wang, y D. Joy, "Fundamentals of scanning electron microscopy (SEM)", *Scanning Microscopy for Nanotechnology: Techniques and Applications*, 2007, doi: 10.1007/978-0-387-39620-0_1/COVER.
- [124] A. Di Gianfrancesco, "Technologies for chemical analyses, microstructural and inspection investigations", *Materials for Ultra-Supercritical and Advanced Ultra-Supercritical Power Plants*, 2017, doi: 10.1016/B978-0-08-100552-1.00008-7.
- [125] E. N. La, C. De Materiales, M. Ipohorski, y P. B. Bozzano, "Microscopía electrónica de barrido en la caracterización de materiales", *Cienc Invest*, 2013.

- [126] J. R. Heredia Simbaña y J. E. Medina Aguirre, “Estudio de la microestructura y de la maquinabilidad de una aleación cobre – cinc (Cu – Zn) al adicionar silicio y ferro silicio en su composición”, 2021.
- [127] ASTM International, “ASTM B455 Standard Specification for Copper-Zinc-Lead Alloy (Leaded-Brass) Extruded Shapes”, vol. 86, 1995.
- [128] ASTM International, “ASTM B455 Standard Specification for Copper-Zinc-Lead Alloy (Leaded-Brass) Extruded Shapes”, 1995.
- [129] N. Titov, I. Stepanov, y D. Okulik, “Tecnología del proceso de fundición”.
- [130] B. R.-I. F. Journal y undefined 2008, “Casting simulation and optimisation: benefits, bottlenecks and best practices”, *Indian Foundry Journal*, 2008.
- [131] C. De, P. Hurtado, J. César, I. Bladimiro Hernán, y N. Olmedo, “Mejoras del proceso productivo a través del análisis y simulación de actividades en la planta industrial de fundición de CEDAL S.A.”, 2020.
- [132] Y. Pratesa, B. Munir, y S. Najamuddin, “Application of Casting Simulation in Failure Analysis of Impeller”, *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 2019, doi: 10.1007/S11668-019-00609-X/METRICS.
- [133] A. A. Luo, A. K. Sachdev, y D. Apelian, “Alloy development and process innovations for light metals casting”, *J Mater Process Technol*, 2022, doi: 10.1016/J.JMATPROTEC.2022.117606.
- [134] ASTM International, “E8/E8M Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials”, 2010.
- [135] J. M. Santiesteban, R. Tutores, I. Neury, D. Batista, y I. U. Lafargue, “Evaluación de las mezclas de moldeo autofraguantes con diferentes proporciones de arena, catalizador y resina”, 2009.
- [136] A. Sanchez y G. Asesor, “Innovaciones a un sistema de colada para una aleación de rango corto”, 2019.
- [137] X. Berna y A. Alberro, *Tecnología mecánica*. Centre de Recursos de Suport a la Docència: Universitat Politècnica de Catalunya, 2000.
- [138] L. I. Mora Pazan, “Sustitución de partes y piezas mediante proceso de fundición: industria automotriz - caso de estudio de un cigüeñal”, 2017.

- [139] J. García, “Estudio de la influencia de diferentes diseños de los sistemas de alimentación y compensación en la fundición en arena”, *Universidad de Sevilla*, 2016.
- [140] D. M. Guamán Armijos y A. Oña Toapanta, “Análisis del estado de la producción de piezas metálicas fundidas mediante muestreo en las ciudades de Quito y Guayaquil al 2015”, 2016.
- [141] Ma. Abrego, S. Molinos, y P. Ruiz, *EQUIPOS DE PROTECCION PERSONAL*, ACHS., vol. 32. 2000.
- [142] Iqbal, N. Ali, H. Husin, Akhyar, Khairil, y A. Farhan, “Differences in Pour Temperature Affect Hardness Properties of CuZn Brass Alloy through Metal Casting”, *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, 2021, doi: 10.1088/1757-899X/1082/1/012001.
- [143] D. R. Askeland, *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*, 3th. Ed. México.
- [144] ASTM International, “E18 Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials”, 2010.
- [145] J. J. Delgado Narváez y A. M. López Anchali, “Estudio de la integridad superficial del acero AISI 420 maquinado mediante proceso de rectificado”, 2020.
- [146] S. Sierra y W. Michelle, “Caracterización de la soldadura del acero ASTM A588 mediante el proceso GMAW modificado con aporte de arenas ferrosas”, 2018.
- [147] C. A. Schneider, W. S. Rasband, y K. W. Eliceiri, “NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis”, *Nat Methods*, 2012, doi: 10.1038/NMETH.2089.
- [148] A. M. González, “ImageJ: una herramienta indispensable para medir el mundo biológico”, 2019.
- [149] M. Moriarty, Y. Wu, T. Murray, y C. Hutchinson, “The effect of phase fraction, size and shape on the dezincification of duplex brasses”, *Corros Sci*, 2021, doi: 10.1016/J.CORSCI.2021.109366.
- [150] H. Iqbal, A. K. Sheikh, A. Al-Yousef, y M. Younas, “Mold Design Optimization for Sand Casting of Complex Geometries Using Advance Simulation Tools”, 2012, doi: 10.1080/10426914.2011.648250.
- [151] U. Distrital, F. José De Caldas, C. Duarte, J. Enrique, F. Morales, y F. Humberto, “La simulación por computador en investigación y desarrollo”, *Tecnura*, 2005.

- [152] V. S. Jadhao, J. Salunke, y P. G. Student, "Review Paper on Simulation Based Casting", *Int J Innov Res Sci Eng Technol*, 2007, doi: 10.15680/IJRSET.2014.0311041.
- [153] X. T. Yan, B. Eynard, y W. J. Ion, *Global Design to gain a competitive edge: An holistic and collaborative design approach based on computational tools*. Springer London, 2008. doi: 10.1007/978-1-84800-239-5/COVER.
- [154] M. A. A. Khan y A. K. Sheikh, "Simulation tools in enhancing metal casting productivity and quality: A review", 2016, doi: 10.1177/0954405416640183.
- [155] M. Jolly, "Casting simulation: How well do reality and virtual casting match? State of the art review", *International Journal of Cast Metals Research*, 2002, doi: 10.1080/13640461.2002.11819448.
- [156] "Altair Inspire Cast Datasheet". Consultado: el 25 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://altair.com/resource/altair-inspire-cast-datasheet>
- [157] R. Lewis y K. Ravindran, "Finite element simulation of metal casting", *Int J Numer Methods Eng*.
- [158] M. Samonds, K. Morgan, y R. W. Lewis, "Finite element modelling of solidification in sand castings employing an implicit-explicit algorithm", 1985.
- [159] U. A. Dabade y R. C. Bhedasgaonkar, "Casting Defect Analysis using Design of Experiments (DoE) and Computer Aided Casting Simulation Technique", *Procedia CIRP*, 2013, doi: 10.1016/J.PROCIR.2013.06.042.
- [160] A. A. Kassie y S. B. Assfaw, "Minimization of Casting Defects", *IOSR Journal of Engineering*, 2013.
- [161] J. Campbell, *Castings*. Elsevier, 2003. doi: 10.1016/B978-0-7506-4790-8.X5016-5.
- [162] J. Tartera Barrabeig, *Castings Practice: the 10 Rules of Castings*, núm. 117. Metal Spain, 2004.
- [163] M. C. Flemings, *Solidification processing*, vol. 5, núm. 10. Springer-Verlag, 1974. doi: 10.1007/BF02643923/METRICS.
- [164] D. M. Stefanescu, *Science and Engineering of Casting Solidification*, vol. Second Edition. Springer US, 2009. doi: 10.1007/B135947.
- [165] J. Campbell, "Complete Casting Handbook: Metal Casting Processes, Metallurgy, Techniques and Design", vol. Second Edition, 2015, doi: 10.1016/C2014-0-01548-1.

ANEXOS

ANEXOS I: Resultados ensayo de dureza aleación Cu-Zn-FeSi.

DUREZA							
Probetas	Dureza [HRB]	Promedio [HRB]	Promedio [HRB]	Probetas	Dureza [HRB]	Promedio [HRB]	Promedio [HRB]
20-045-B1-11	54	53,6	53,80	20-045-B3-11	61	62,2	61,33
	54				61		
	53				63		
	53				63		
	54				63		
20-045-B1-12	53	53,6		20-045-B3-12	60	61,2	
	53				61		
	54				62		
	54				61		
	54				62		
20-045-B1-13	54	54,2		20-045-B2-13	61	60,6	
	54		60				
	54		61				
	54		60				
	55		61				
20-045-B2-11	67	67	20-045-B4-11	76	77		
	67			77			
	67			78			
	67			77			
	67			77			
20-045-B2-12	65	66,2	20-045-B4-12	77	77		
	65			77			
	67			77			
	67			77			
	67			77			
20-045-B2-13	69	66	20-045-B4-13	78	77,4		
	66			77			
	65			77			
	65			78			
	65			77			
20-045-C1	65	63,2					
	61						
	61						
	64						
	65						

MICRODUREZA							
PROBETA	FASE	DATOS	PROMEDIO	PROBETA	FASE	DATOS	PROMEDIO
20-045-B1-11	Fase α	140,36	153,52	20-045-B3-11	Fase α	171,77	185,18
		161,9				223,73	
		158,3				160,05	
	Fase β'	250,59	235,54		Fase β'	318,33	318,33
		220,48					
20-045-B1-12	Fase α	175,7	170,86	20-045-B3-12	Fase α	160,18	166,66
		184,15				169,71	
		152,73				168,8	
						167,96	
	Fase β'	244,59	244,59		Fase β'	308,68	285,04
						262	
				284,45			
20-045-B1-13	Fase α	165,55	155,45	20-045-B3-13	Fase α	158,06	173,25
		169,15				174,53	
		144,6				187,17	
		142,48					
	Fase β'		271,73		Fase β'	217,32	217,32
		271,73					
20-045-B2-11	Fase α	189,11	195,38	20-045-B4-11	Fase α	156,3	153,41
		193,96				150,52	
		203,08					
	Fase β'	272,36	272,36		Fase β'	251,12	255,55
						252,83	
				262,7			
20-045-B2-12	Fase α	182,28	167,22	20-045-B4-12	Fase α	194,3	194,30
		152,15					
	Fase β'	245,64	252,68		Fase β'	255,44	260,29
		247,44				264,24	
	268,67			261,18			
	248,97						
20-045-B2-13	Fase α	199,4	199,40	20-045-B4-13	Fase α	248,79	228,57
						203,13	
						214,8	
						247,55	
	Fase β'	292,97	286,50		Fase β'	296,1	337,54
		280,02				303,16	
				315,34			
				435,56			
20-045-C1	Fase α	169,68	170,27				
		169,41					
		171,73					
	Fase β'	209,87	217,90				
		218,26					
	207,42						
	236,03						

PROMEDIO FASES MICRODUREZA					
PROBETA	FASE	PROMEDIO	PROBETA	FASE	PROMEDIO
20-045-B1	Fase α	159,94	20-045-B3	Fase α	175,03
	Fase β'	250,62		Fase β'	273,56
20-045-B2	Fase α	187,33	20-045-B4	Fase α	192,09
	Fase β'	270,51		Fase β'	284,46
20-045-C1	Fase α	170,27			
	Fase β'	217,90			

DESVIACIÓN ESTANDAR FASES MICRODUREZA					
PROBETA	FASE	PROMEDIO	PROBETA	FASE	PROMEDIO
20-045-B1	Fase α	9,50	20-045-B3	Fase α	9,39
	Fase β'	18,84		Fase β'	51,47
20-045-B2	Fase α	17,54	20-045-B4	Fase α	37,63
	Fase β'	16,98		Fase β'	46,03
20-045-C1	Fase α	1,27			
	Fase β'	12,95			

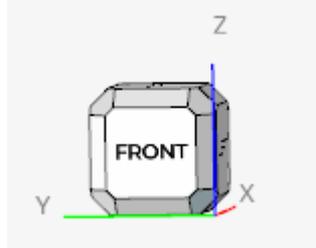
ANEXOS III: Tamaño de Silicio (Si).

TAMAÑO DE SILICIO						
	1	1,1	1,2	1,2,1	1,3	1,3,1
20-045-B1	6,60410	5,10000	4,27380	8,26400	3,43920	4,25800
	4,25310	4,00000	6,69000	6,38000	3,37000	2,40000
	6,84960	3,12850	4,32230		1,65000	5,06000
	3,15270	3,31900	4,60000	6,42530	3,52820	7,44000
	3,53270	3,79800	2,93000	7,83640	4,67000	3,68000
	7,70950	8,05000	1,95000	6,23610	3,92930	6,03000
	3,74370		2,37130	3,61230	6,60950	
	6,37000	7,50000	7,50000	4,96000	6,36600	
	6,15260	8,92200	7,40000	4,77000		
	7,14190	7,43170		4,39000		
3,50000						
10,60000	3,11600					
Promedio	5,80083	5,43652	4,67082	5,87490	4,19528	4,81133
Error	2,23087	2,29189	2,10758	1,56628	1,64806	1,78087
20-045-B2	107,55000	109,65000	72,25000	76,26000	38,50000	61,31000
	28,74000	89,85000	174,98000	32,69000	74,34000	100,75000
	23,85000	23,56000		112,33000	19,58000	47,85000
	25,76000	149,75000		22,82000	19,51000	
	12,89000			27,05000		
Promedio	39,75800	93,20250	123,61500	54,23000	37,98250	69,97000
Error	38,36681	52,69237	72,64108	38,89165	25,83293	27,49271
20-045-B3	64,06000	67,92000	32,95000	92,15000	100,00000	89,21000
	76,71000	31,12000	35,03000	40,60000	31,12000	90,00000
	34,11000	28,21000	41,45000	16,26000	26,10000	81,00000
	25,18000	28,06000	30,32000	28,54000	33,80000	41,38000
	29,67000	12,04800	41,14000	38,91000		34,33000
	37,01000	32,80000	16,80000	22,27000		53,85000
	30,06000	22,39000		21,08000		30,21000
	12,27000	15,20000		72,97000		19,46000
	19,01000			49,27000		16,74000
	19,14240			26,89000		
			22,63000			
Promedio	34,72224	29,71850	32,94833	39,23364	47,75500	50,68667
Error	20,44317	17,12384	9,07074	23,93427	34,97592	29,28186
20-045-B4	60,07000	98,59000	82,66000	172,12000	85,86000	65,36000
	74,2	40	85,13	39,15000	64,66	40,74
	35,6	33,37	150	158,00000	55	62,63
	35,36000		43,00000	132,10000		70,02000
			33,13000	66,20000		25,83
			38,49000	90,32200		49,37
			22,26000			
			19,97000			
Promedio	51,30750	57,32000	59,33000	109,64867	68,50667	52,32500
Error	19,16504	35,8942739	44,3070243	52,8695564	15,7855166	16,9360358

Probeta	Área Promedio	Desviación Estándar
20-045-B1	5,2	2
20-045-B2	63,12	45,62
20-045-B3	38,78	23,11
20-045-B4	67,639	40,37

ANEXOS IV: Velocidad del metal líquido.

Probetas en posición horizontal



- Eje x

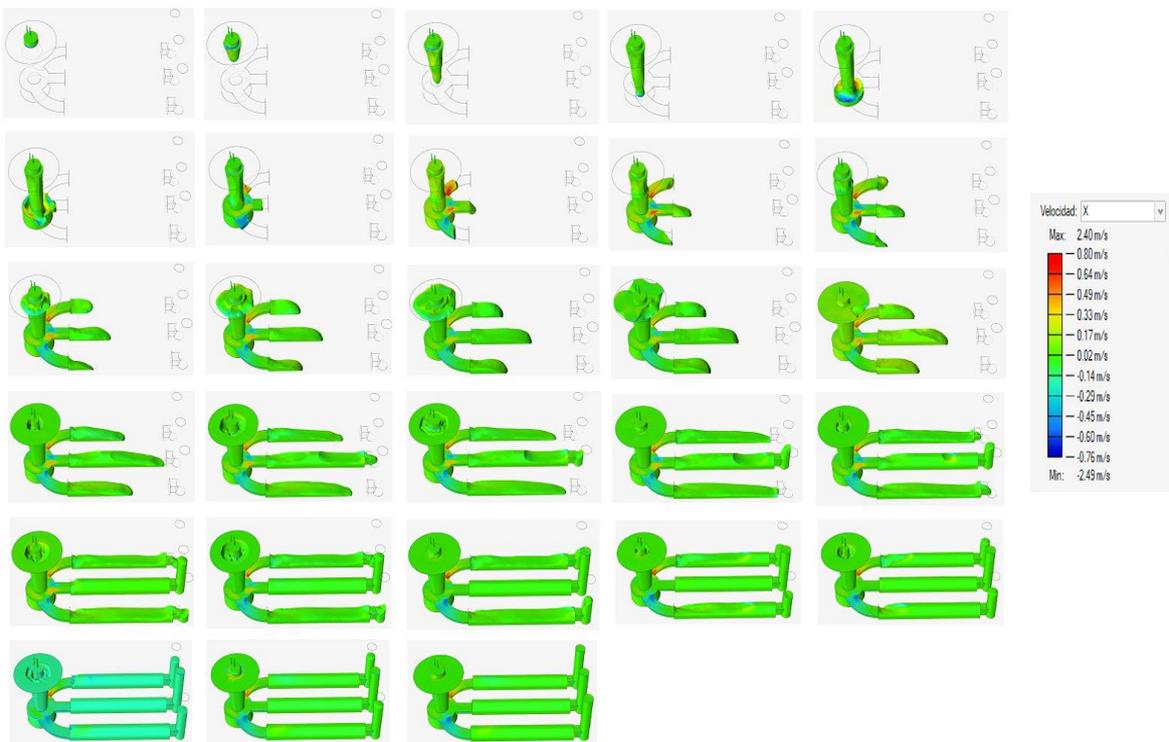


Figura Velocidad metal líquido en el eje x de las probetas en posición horizontal.
(Fuente: Propia)

- Eje y

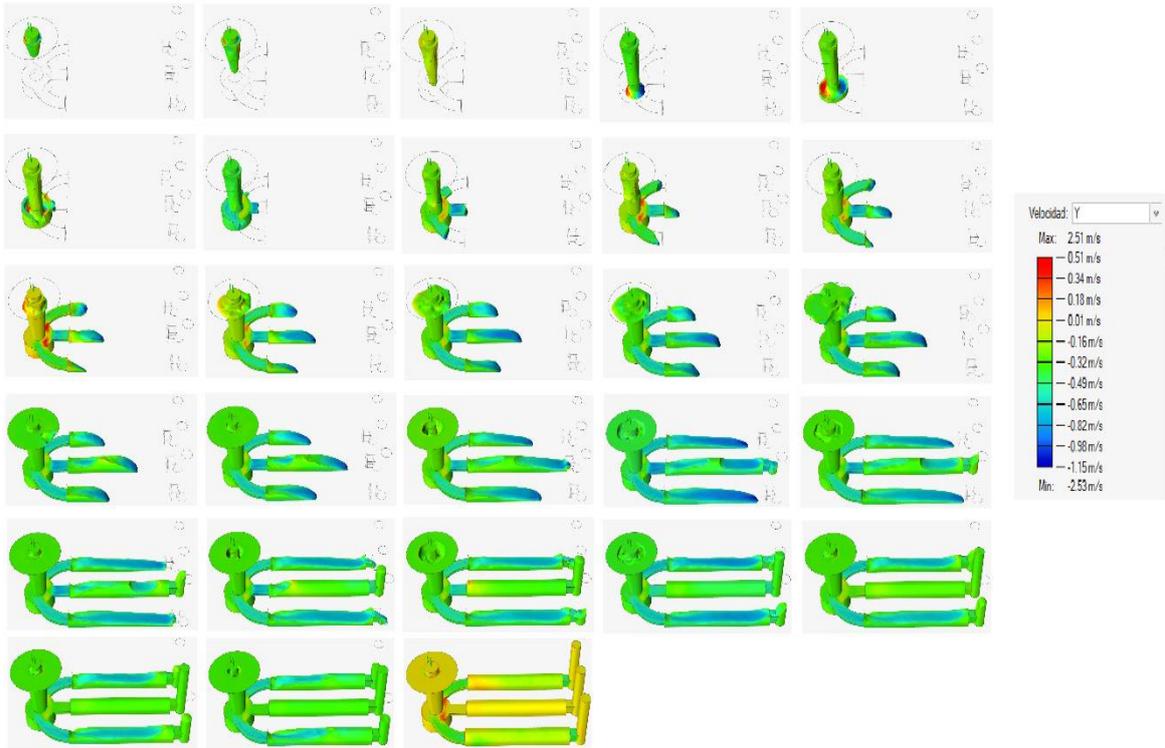


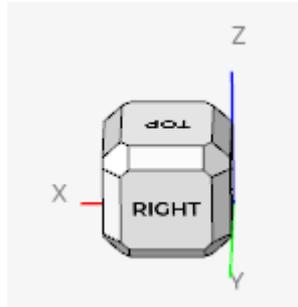
Figura Velocidad metal líquido en el eje y de las probetas en posición horizontal.
(Fuente: Propia)

- Eje z



Figura Velocidad metal líquido en el eje z de las probetas en posición horizontal.
(Fuente: Propia)

Probetas en posición vertical



- Eje x



Figura Velocidad metal líquido en el eje x de las probetas en posición vertical.
(Fuente: Propia)

- Eje y

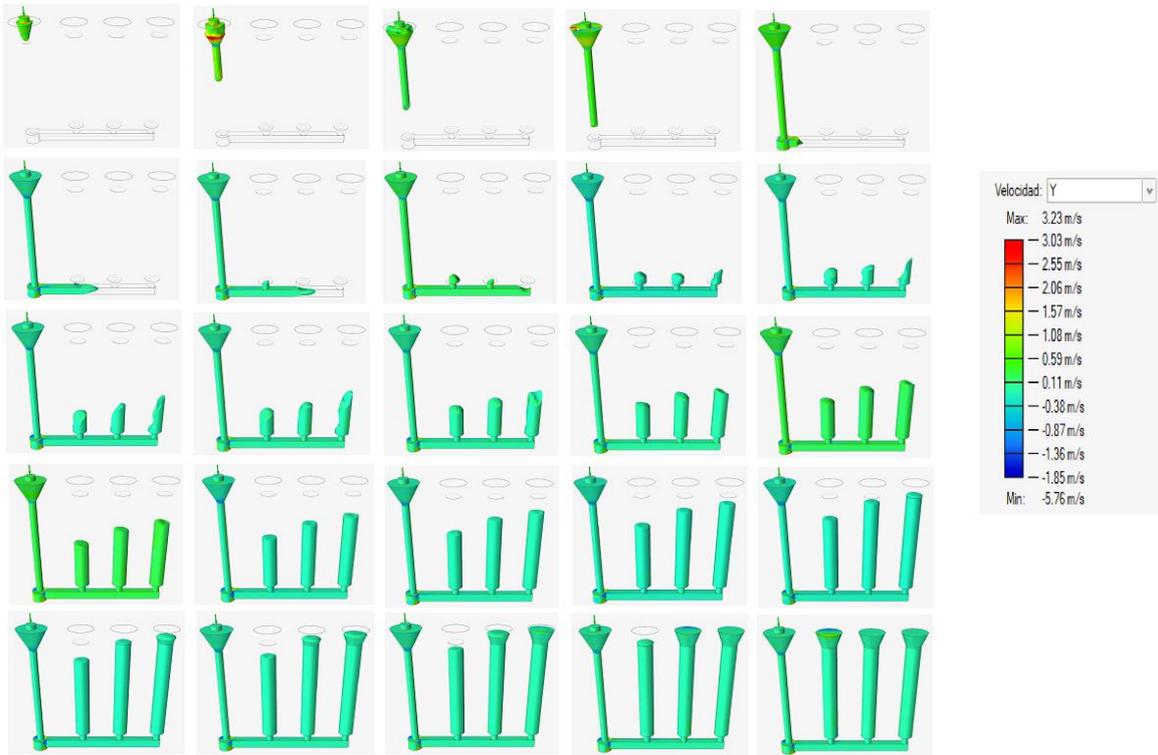


Figura Velocidad metal líquido en el eje y de las probetas en posición vertical.
Fuente: 1

- Eje z

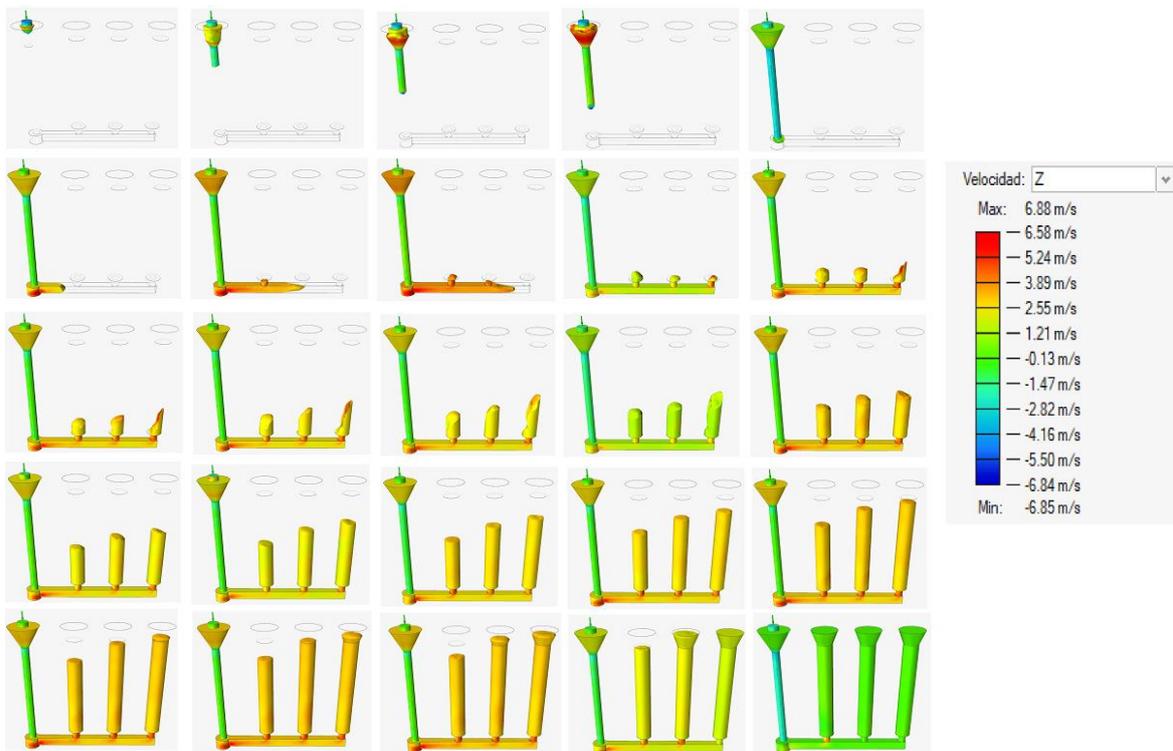
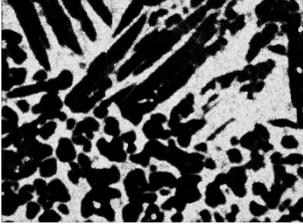
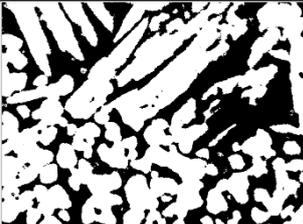
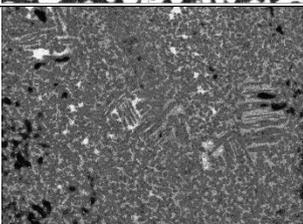
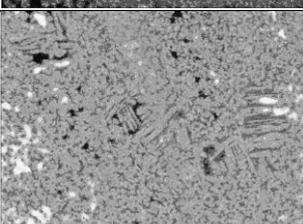
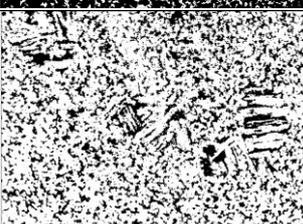


Figura Velocidad metal líquido en el eje z de las probetas en posición vertical.
(Fuente: Propia)

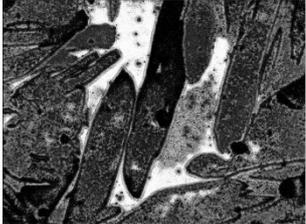
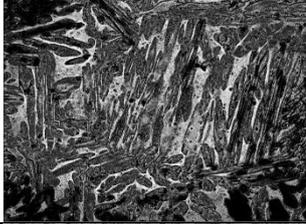
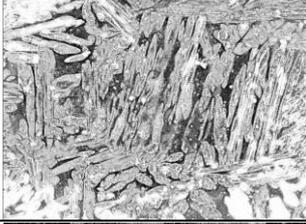
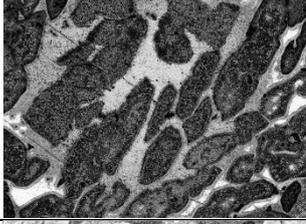
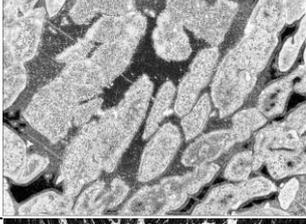
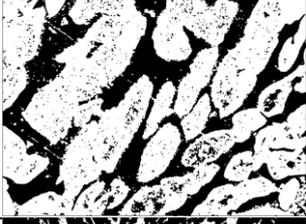
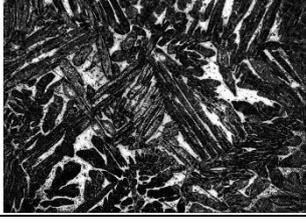
ANEXOS V: Cuantificación del porcentaje de fases.

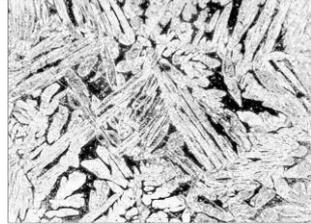
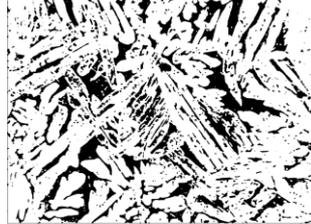
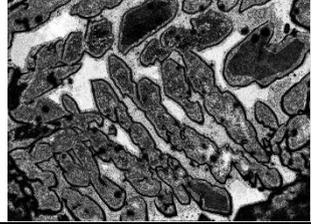
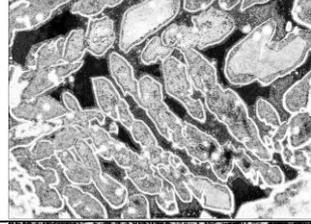
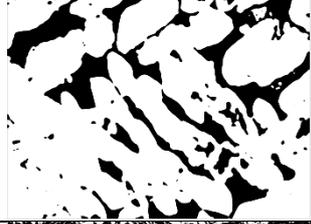
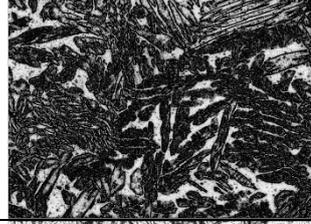
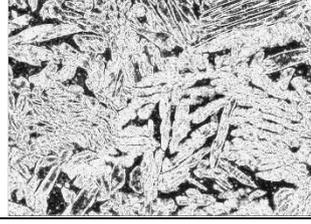
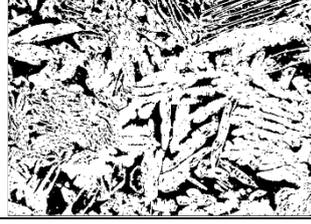
Tabla Porcentaje de fases (β' + α) de la aleación de referencia C38500.

PROBETA	AUMENTO	MICROGRAFÍA		FASES	
C1	50X			Fase β' :	62,47 %
				Fase α :	37,53 %
	100X			Fase β' :	73,90 %
				Fase α :	26,10 %

(Fuente: Propia)

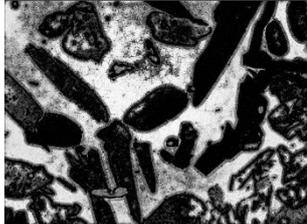
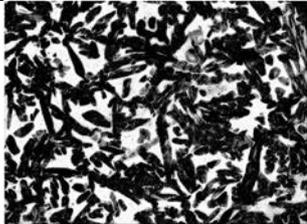
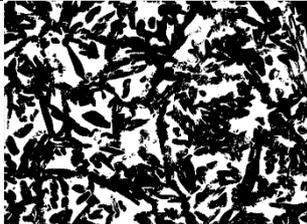
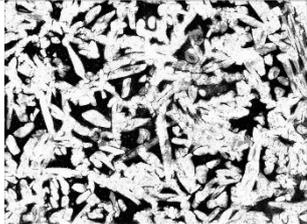
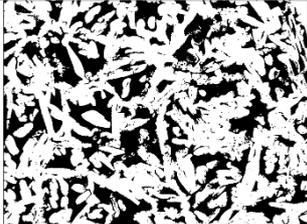
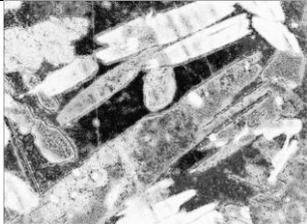
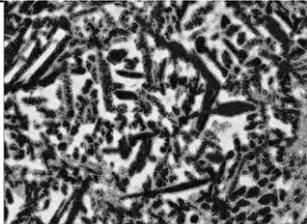
Tabla Porcentaje de fases (β' + α) de la aleación de Cu – Zn con una adición del 0,5 % de Ferrosilicio.

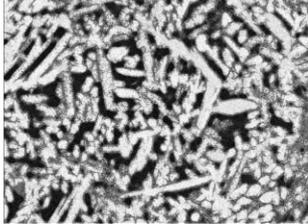
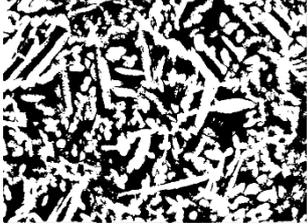
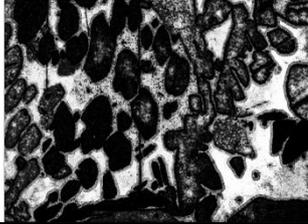
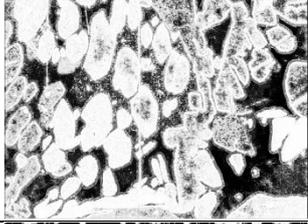
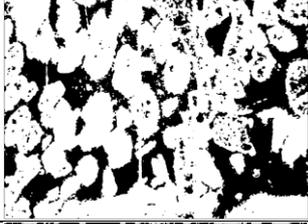
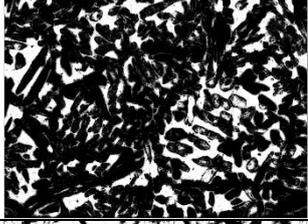
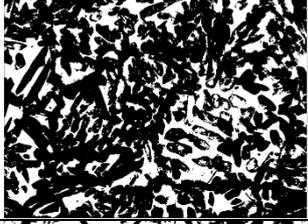
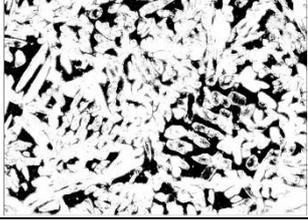
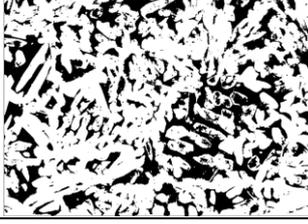
PROBETA	AUMENTO	MICROGRAFÍA	FASES		
B1-11	50X			Fase β' :	78,25 %
				Fase α :	21,75 %
	100X			Fase β' :	72,06 %
				Fase α :	27,94 %
B1-12	50X			Fase β' :	76,47 %
				Fase α :	23,53 %
	100X			Fase β' :	78,63 %

				Fase α :	21,17 %
B1-13	50X			Fase β' :	24,36 %
				Fase α :	75,64 %
	100X			Fase β' :	69,78 %
				Fase α :	30,22 %

(Fuente: Propia)

Tabla Porcentaje de fases (β' + α) de la aleación de Cu – Zn con una adición del 1,0 % de Ferrosilicio.

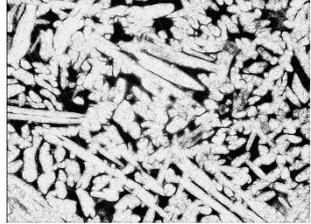
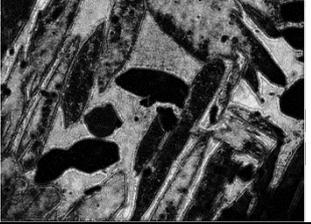
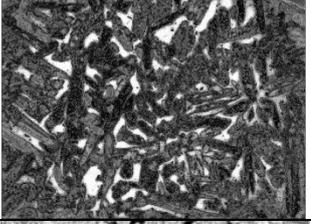
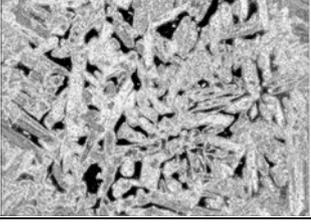
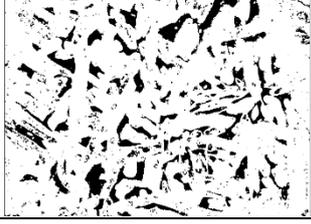
PROBETA	AUMENTO	MICROGRAFÍA	FASES	
B2-11	50X			Fase β' : 62,63 %
				Fase α : 37,37 %
	100X			Fase β' : 63,15 %
				Fase α : 36,75 %
B2-12	50X			Fase β' : 66,27 %
				Fase α : 33,73 %
	100X			Fase β' : 52,54 %

				Fase α :	47,46 %
B2-13	50X			Fase β' :	69,20 %
				Fase α :	30,80 %
	100X			Fase β' :	69,02 %
				Fase α :	30,98 %

(Fuente: Propia)

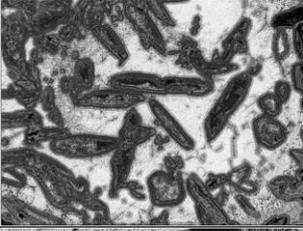
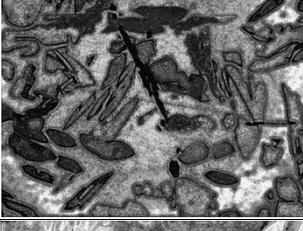
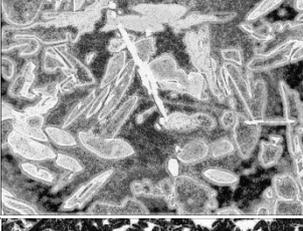
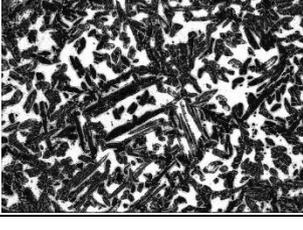
Tabla Porcentaje de fases (β' + α) de la aleación de Cu – Zn con una adición del 1,5 % de Ferrosilicio.

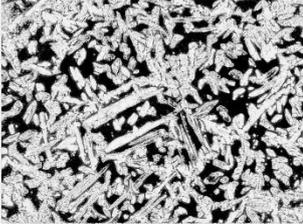
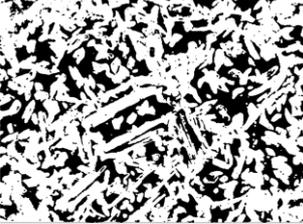
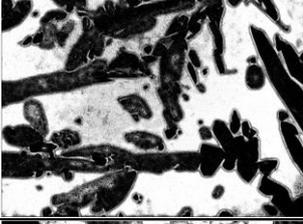
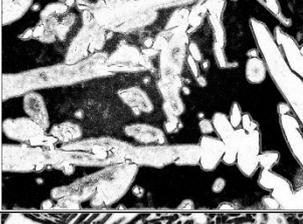
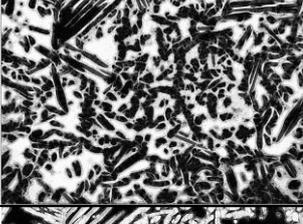
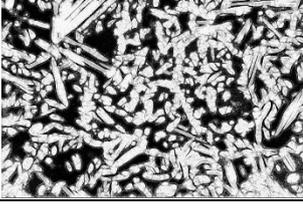
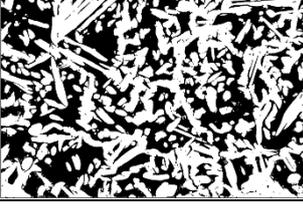
PROBETA	AUMENTO	MICROGRAFÍA	FASES	
B3-11	50X			Fase β' : 74,25 %
				Fase α : 25,75 %
	100X			Fase β' : 75,90 %
				Fase α : 24,10 %
B3-12	50X			Fase β' : 71,43 %
				Fase α : 28,57 %
	100X			Fase β' : 74,13 %

				Fase α :	25,87 %
B3-13	50X			Fase β' :	72,17 %
				Fase α :	27,83 %
	100X			Fase β' :	80,10 %
				Fase α :	29,90 %

(Fuente: Propia)

Tabla Porcentaje de fases (β' + α) de la aleación de Cu – Zn con una adición del 2,0 % de Ferrosilicio.

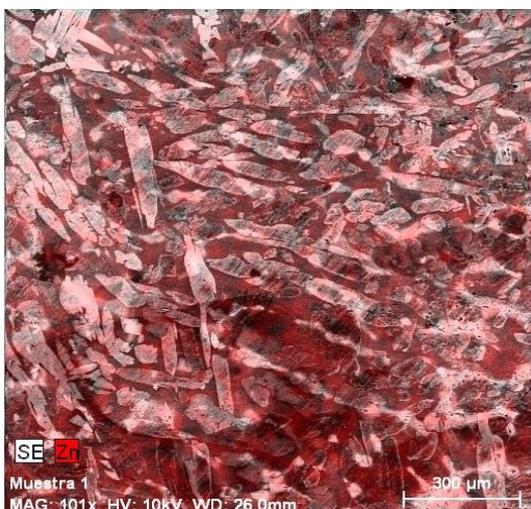
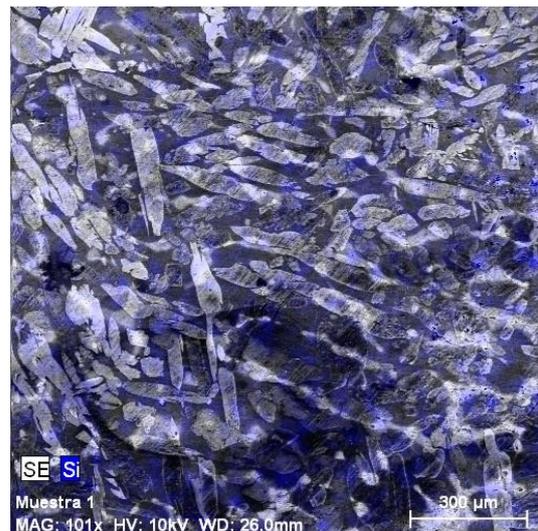
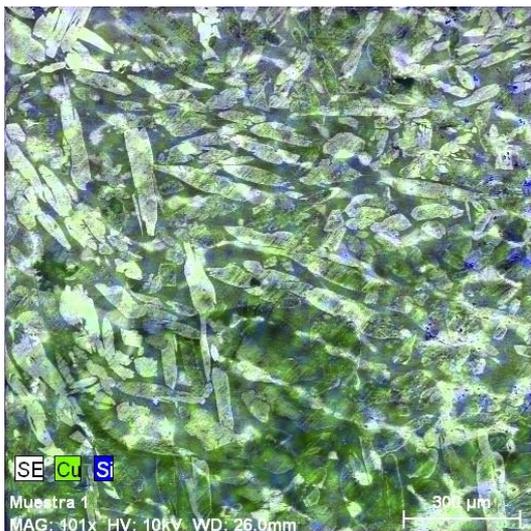
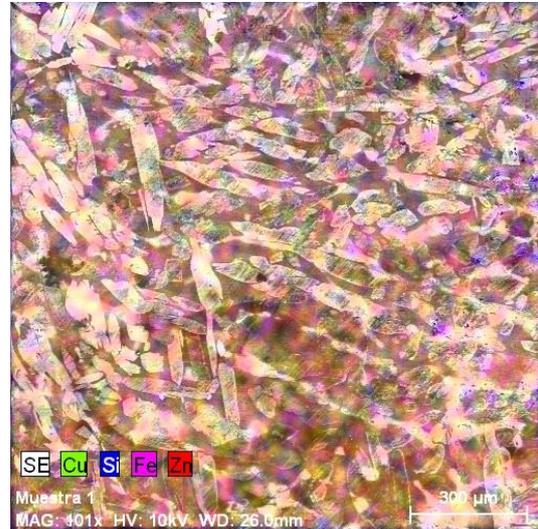
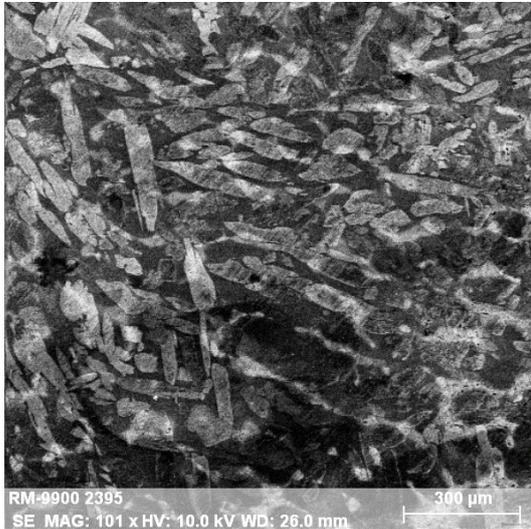
PROBETA	AUMENTO	MICROGRAFÍA	FASES		
B4-11	50X			Fase β' :	61,45 %
				Fase α :	38,55 %
	100X			Fase β' :	55,20 %
				Fase α :	44,80 %
B4-12	50X			Fase β' :	65,76 %
				Fase α :	34,24 %
	100X			Fase β' :	65,15 %

				Fase α :	34,85 %
B4-13	50X			Fase β' :	52,81 %
				Fase α :	47,19 %
	100X			Fase β' :	53,77 %
				Fase α :	46,23 %

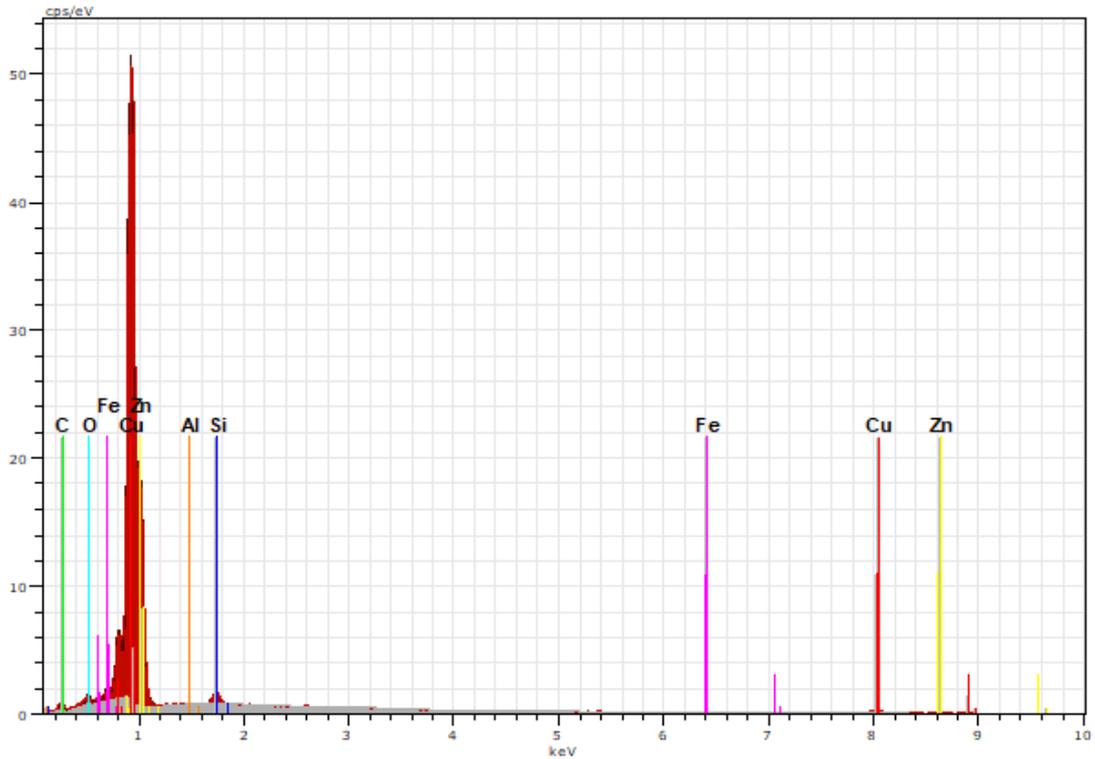
(Fuente: Propia)

ANEXOS VI: Microscopía electrónica de barrido.

Tabla Mapeo de rayos X de los diferentes elementos que contiene la zona de fractura mediante la técnica de espectrometría por dispersión de energía de rayos X (EDS) de la probeta con un contenido de 1,5 % de ferro-silicio.



(Fuente: Departamento de Metalurgia Extractiva (DEMEX) de la Escuela Politécnica Nacional)



Bremsstrahlung Fecha:12/20/2021 11:19:25 AM HV:10.0kV D. imp.:3.14kcps
 Muestra 1 Fecha:12/20/2021 11:19:25 AM HV:10.0kV D. imp.:11.04kcps
 Suma Fecha:12/20/2021 11:19:25 AM HV:10.0kV D. imp.:9.01kcps

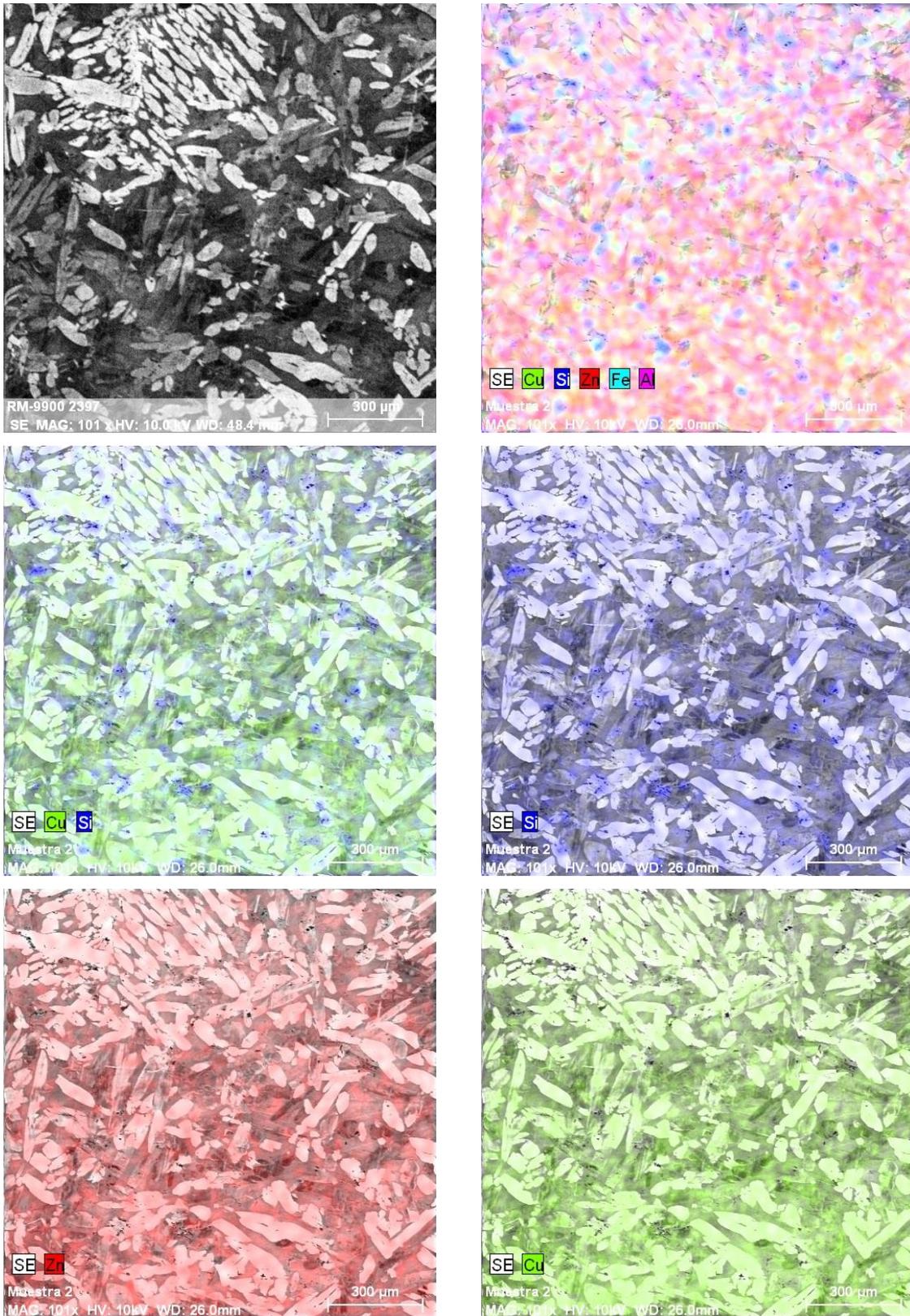
Spectrum: Muestra 1

Element	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
Cobre	L-series	134.15	68.97	61.76	14.24
Carbono	K-series	3.89	2.00	9.47	0.64
Silicio	K-series	1.55	0.80	1.61	0.09
Oxígeno	K-series	1.76	0.91	3.23	0.30
Hierro	K-series	1.13	0.58	0.59	0.10
Cinc	L-series	51.94	26.70	23.24	3.20
Aluminio	K-series	0.09	0.05	0.10	0.03
Total:		194.51	100.00	100.00	

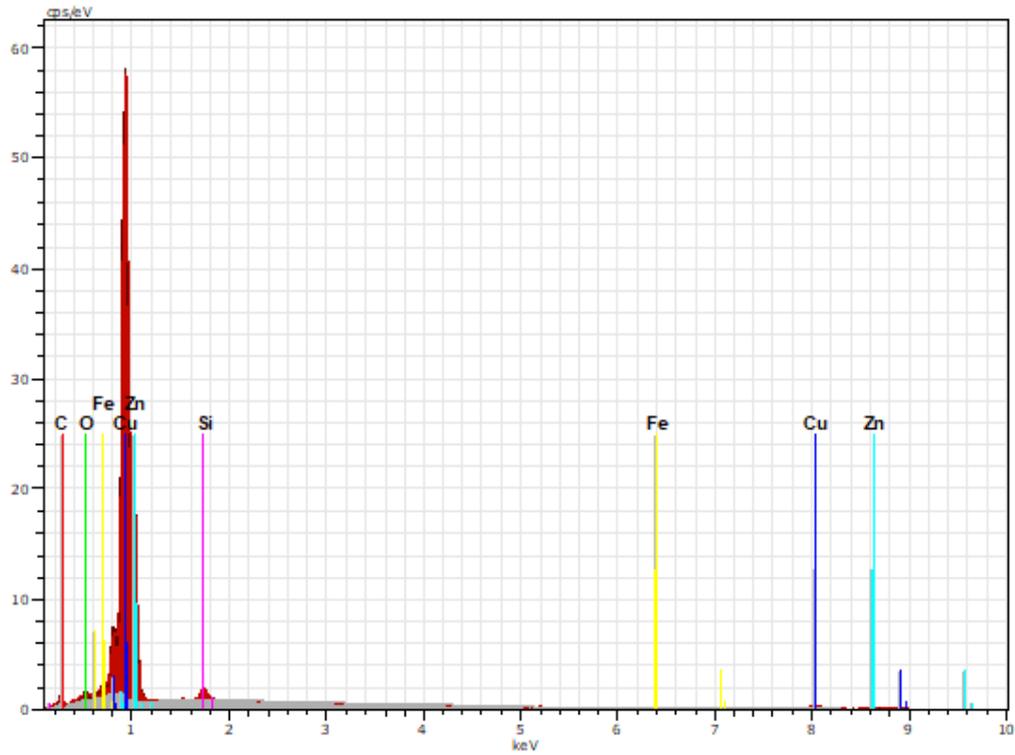
Figura Espectro de rayos X característicos y la composición química obtenida de la técnica de espectrometría por dispersión de energía de rayos X (EDS) de la probeta con un contenido de 1,5 % de ferro-silicio.

(Fuente: Departamento de Metalurgia Extractiva (DEMEX) de la Escuela Politécnica Nacional)

Tabla Mapeo de rayos X de los diferentes elementos que contiene la zona de fractura mediante la técnica de espectrometría por dispersión de energía de rayos X (EDS) de la probeta con un contenido de 1,5 % de ferro-silicio.



(Fuente: Departamento de Metalurgia Extractiva (DEMEX) de la Escuela Politécnica Nacional)



Bremsstrahlung Fecha:12/20/2021 11:29:49 AM HV:10.0kV D. imp.:3.50kcps
 Muestra 2 Fecha:12/20/2021 11:29:49 AM HV:10.0kV D. imp.:11.93kcps
 Suma Fecha:12/20/2021 11:29:49 AM HV:10.0kV D. imp.:10.25kcps

Spectrum: Muestra 2

Element	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
Carbono	K-series	3.94	1.97	9.35	0.65
Oxígeno	K-series	1.85	0.92	3.29	0.32
Cobre	L-series	136.93	68.48	61.42	14.53
Cinc	L-series	54.83	27.42	23.90	3.38
Silicio	K-series	1.62	0.81	1.64	0.09
Hierro	K-series	0.79	0.39	0.40	0.08
Total:		199.95	100.00	100.00	

Figura Espectro de rayos X característicos y la composición química obtenida de la técnica de espectrometría por dispersión de energía de rayos X (EDS) de la probeta con un contenido de 1,5 % de ferro-silicio.

(Fuente: Departamento de Metalurgia Extractiva (DEMEX) de la Escuela Politécnica Nacional)