



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y
MECÁNICA**

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO MECÁNICO**

**TEMA: EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y
MICROESTRUCTURA DE UNA ALEACIÓN DE COBRE Y UNA
ALEACIÓN DE ALUMINIO, MEDIANTE CUATRO PROCESOS
DE FUNDICIÓN**

AUTORES: MEDINA ANDRADE, ESTEBAN JAVIER

PEÑA AUCATOMA, ANDRÉS SEBASTIAN

DIRECTOR: ING. RIOFRÍO, PATRICIO MSC.

SANGOLQUÍ

2019



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

CERTIFICADO

Certifico que el trabajo de titulación, **“EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y MICROESTRUCTURA DE UNA ALEACIÓN DE COBRE Y UNA ALEACIÓN DE ALUMINIO, MEDIANTE CUATRO PROCESOS DE FUNDICIÓN”** realizado por los señores **PEÑA AUCATOMA, ANDRÉS SEBASTIAN** y **MEDINA ANDRADE, ESTEBAN JAVIER** el mismo que ha sido revisado en su totalidad y analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustenten públicamente.

Sangolquí, 04 de Enero del 2019



Ing. Patricio Quezada

Delegado del Director de Carrera



DEPARTAMENTO DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, **PEÑA AUCATOMA, ANDRÉS SEBASTIAN** con cédula de identidad N° 1719062471 y **MEDINA ANDRADE, ESTEBAN JAVIER**, con cedula de identidad N° 1721406435 declaramos que este trabajo de titulación, “**EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y MICROESTRUCTURA DE UNA ALEACIÓN DE COBRE Y UNA ALEACIÓN DE ALUMINIO, MEDIANTE CUATRO PROCESOS DE FUNDICIÓN**”, ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaro que este trabajo es de nuestra autoría, en virtud de ello nos declaramos responsables del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, 27 de agosto del 2018

Peña Aucatoma, Andrés Sebastian

Medina Andrade, Esteban Javier



DEPARTAMENTO DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

AUTORIZACIÓN

Nosotros, **PEÑA AUCATOMA, ANDRÉS SEBASTIAN**, con cédula de identidad N° 1719062471 y **MEDINA ANDRADE, ESTEBAN JAVIER**, con cedula de identidad N° 1721406435 autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en su totalidad en el repositorio Institucional el trabajo de titulación “**EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y MICROESTRUCTURA DE UNA ALEACIÓN DE COBRE Y UNA ALEACIÓN DE ALUMINIO, MEDIANTE CUATRO PROCESOS DE FUNDICIÓN**”, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 27 de agosto del 2018



Peña Aucatoma, Andrés Sebastian



Medina Andrade, Esteban Javier

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis Padres Martha y Eduardo que han sido el aliento y la motivación de seguir adelante cuando ya las fuerzas se terminaban, también a mis hermanos Wladimir y Mauricio que al observar sus logros generaban ese anhelo de alcanzar el lugar donde se encontraban, y hago referencia al Ingeniero Patricio Riofrío por permitir formar parte de su grupo de trabajo, y darnos facilidades para el desarrollo del tema.

Andrés Sebastian Peña Aucatoma

A mis padres, porque de su mano aprendí a disfrutar de la vida.

A mis hermanos, porque desde niño siempre quise ser como ellos.

A Daniel, quien siembra sonrisas y no le teme a nada.

Esteban Javier Medina Andrade

AGRADECIMIENTOS

Inicialmente agradezco a Dios, por haberme entregado a los mejores padres del mundo, los cuales han impulsado a este joven desde su temprana edad con cariño paciencia y valores, preparándolo para dar saltos, que rebasen cada uno de los obstáculos que presenta la vida, alcanzando éste triunfo, pero esto a su vez no hubiera sido posible si no contaba con el apoyo y fuerzas de mis dos grandes ejemplos, mis hermanos. Obviamente en el camino conocí a una gran cantidad de personas, que han estado a mi lado ayudándome para llegar a este objetivo, sobre todo mi amigo Esteban quien fue mi compañero en esta investigación.

Andrés Sebastian Peña Aucatoma

Agradezco a mi familia porque ellos fueron la motivación y quienes me impulsaron a tomar las mejores decisiones en mi vida, mis logros siempre serán dirigidos a ellos.

Al tutor ingeniero Patricio Riofrío, por quien se llevó a cabo este proyecto y se lo culminó de la mejor manera posible mediante su guía.

A mis primos y amigos que con consejos y su compañía hicieron de esta travesía algo memorable y llena de buenos recuerdos.

A mi compañero y amigo Andrés quien demostró que el trabajo puede llevarse a cabo con excelencia y calidad sin dejar de lado la camaradería.

Esteban Javier Medina Andrade

INDICE

CERTIFICADO	I
AUTORIA DE RESPONSABILIDAD	II
AUTORIZACIÓN.....	III
DEDICATORIA	IV
AGRADECIMIENTOS	V
ÍNDICE DE FIGURAS.....	5
RESUMEN.....	10
ABSTRACT	11
1. GENERALIDADES.....	12
1.1. Introducción	12
1.2. Antecedentes	12
1.3. Justificación e importancia.....	15
1.4. Objetivos	16
1.5. Objetivo general	16
1.6. Objetivos específicos.....	16
1.7. Alcance del proyecto	17
2. MARCO TEÓRICO	19
2.1 Aleaciones de aluminio fundido.....	19
2.2 Aleaciones de cobre fundido	20
2.3 Fundición.....	21
2.3.1 Clasificación de los sistemas de fundición.....	23
2.3.1.1 Fundición en molde de arena.....	25
2.3.1.2 Fundición en cáscara	26

	2
2.3.1.3 Fundición por molde permanente	28
2.3.1.4 Fundición centrifugada	29
2.4 Solidificación y enfriamiento	30
2.4.1 Tiempo de solidificación	30
2.4.2 Contracción	33
2.5 Diagramas de fase	34
2.5.2 Cantidad de cada fase	35
2.5.3 Diagrama eutéctico con insolubilidad total en estado sólido	35
2.5.4 Diagrama eutéctico con solubilidad parcial en estado sólido	36
2.6 Microestructura	37
2.6.1 Evolución de la microestructura durante el enfriamiento	38
2.7 Propiedades mecánicas	38
2.7.1 Ensayo de tensión	38
2.7.2 Ensayo Charpy	39
2.7.3 Ensayo de dureza	39
3. METODOLOGÍA	40
3.1 Metodología de trabajo	40
3.1.1 Etapa 1: Verificación y mantenimiento de equipos	41
3.1.2 Etapa 2: Elaboración de lingotes de latón y aluminio	42
3.1.3 Etapa 3: Preparación de los moldes de fundición	42
3.1.4 Etapa 4: Fundición del aluminio y cobre	46

3.1.5	Etapa 5: Extracción y Maquinado de probetas para ensayos	51
3.1.6	Etapa 6: Análisis de microestructura.....	53
3.1.7	Etapa 7: Ensayo Charpy, tensión y microdureza.....	55
3.1.8	Etapa 8: Análisis químico	58
3.1.9	Etapa 9: Simulación de solidificación	59
4	SOLIDIFICACIÓN Y SIMULACIÓN.....	60
4.1	Introducción	60
4.2	Simulación.....	60
4.2.1	Diagrama de Simulación	60
4.2.2	Parámetros de la Simulación	61
4.2.3	Análisis de convergencia y mallado.....	65
4.2.4	Colado del aluminio fundido.....	67
4.2.5	Análisis de temperatura en el interior del molde.....	68
4.2.6	Análisis de solidificación	70
4.2.7	Análisis teórico.....	72
4.2.8	Análisis experimental.....	73
5	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	75
5.1	Introducción	75
5.2	Resultados de la experimentación del Aluminio.....	75
5.2.1	Análisis Visual	75
5.2.2	Micrografía del Aluminio.....	77
5.2.3	Análisis químico.....	80
5.2.4	Diagrama de fase Al-Si	82

5.2.5 Propiedades Mecánicas	84
5.2.5.1 Ensayo de Tracción - Aluminio	84
5.2.5.2 Ensayo de impacto (Charpy) – Aluminio.....	86
5.2.5.3 Análisis de dureza – Aluminio	87
5.3 Resultados de la experimentación del Latón.....	89
5.3.1 Análisis Visual	89
5.3.2 Micrografía del Latón.....	90
5.3.3 Análisis químico - Latón	94
5.3.4 Diagrama de fase Cu-Zn	96
5.3.5 Propiedades Mecánicas - Latón.....	98
5.3.5.1 Ensayo Tracción - Latón	98
5.3.5.2 Ensayo de impacto - Latón.....	99
5.3.5.3 Análisis de dureza - Latón.....	100
5.4 Análisis de simulación	101
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	104
6.1 Conclusiones	104
6.2 Recomendaciones.....	106
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	111

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Proceso de fundición.....	22
Figura 2. Clasificación de los procesos de fundición, por tipo de molde.	23
Figura 3. Proceso de fundición en molde de arena.	26
Figura 4: Proceso de moldeo por cascara.	27
Figura 5: Proceso finalizado de fundición por cascara	28
Figura 6: Fundición en molde permanente por gravedad	29
Figura 7: Aplicaciones de fundiciones centrifugas	30
Figura 8. Distribución de temperatura en función del tiempo.	32
Figura 9. Evolución de la solidificación	33
Figura 10. Temperatura vs volumen en la contracción.	34
Figura 11. Esquema y ecuación de la regla de la palanca	35
Figura 12: Microestructuras características de las regiones de un diagrama de fases eutéctico binario con insolubilidad total.	36
Figura 13. Microestructuras características de las regiones de un diagrama de fases eutéctico binario con solubilidad parcial.	37
Figura 14: Microestructura de un material.....	38
Figura 15: Lingotes de aleación obtenida	42
Figura 16: a) Moldes de cáscara, b) Moldes listos para la fundición.	43
Figura 17: Molde de acero fabricado para maquina Polygram, proceso de fundición en cáscara.	44
Figura 18: Discos de silicona para proceso de fundición centrifugada.	44
Figura 19: Molde permanente de acero.	45
Figura 20: Molde de arena para fundición, con respiraderos.....	46

Figura 21: Obtención de la pieza fundida (Molde permanente)	47
Figura 22: Obtención de la pieza fundida (Centrifugado)	49
Figura 23: Obtención de pieza fundida (Molde de arena)	49
Figura 24: Obtención de la pieza fundida (Molde de cáscara)	50
Figura 25: Colado del latón; A) Molde permanente, B) Molde de cáscara, C) Molde de arena. .	51
Figura 26: Lugar de extracción de probetas para ensayos destructivos. A) Molde permanente, B) Centrifugado, C) Molde de arena, y D) Molde de cáscara.....	52
Figura 27: Probetas maquinadas para ensayos de: A) Tensión y B) Charpy.....	52
Figura 28: Maquinas utilizadas para preparación de probetas, lijado y pulido respectivamente.	53
Figura 29: Microscopio MEIJI TECHNO	54
Figura 30: Maquina de ensayos universales MTS TK/T5002 - ensayo de tensión	55
Figura 31: Probetas realizadas el ensayo de tensión.....	56
Figura 32: Máquina de ensayo Charpy MTS CK500, detalla la posición de la muesca opuesta al péndulo	57
Figura 33: Probetas realizadas ensayo Charpy	57
Figura 34: Máquina de Microdureza DUROLINE' - M, detalle de vista de la indentación generada sobre la superficie de la probeta.....	58
Figura 35: Espectrómetro de chispa BRUKER	59
Figura 36: Modelo para simulación de solidificación en molde permanente	59
Figura 37: Diagrama de análisis con sus condiciones de frontera.	60
Figura 38: Gráfica Conductividad térmica vs Temperatura	62
Figura 39: Gráfica Densidad vs Temperatura.....	63
Figura 40: Gráfica Tensión Superficial vs Temperatura.....	64
Figura 41: Gráfica Viscosidad vs Temperatura	65
Figura 42: Generación de mallas (Mesh) para el molde de análisis	66

Figura 43: Convergencia de simulación	66
Figura 44: Simulación de colado etapa 1 y 2, respectivamente.....	67
Figura 45: Simulación de colado etapa 3 y 4, respectivamente.....	67
Figura 46: Análisis de temperatura etapa 1 y 2, respectivamente.....	68
Figura 47: Análisis de temperatura etapa 3 y 4, respectivamente.....	69
Figura 48: Análisis de temperatura etapa 5 y 6, respectivamente.....	69
Figura 49: Análisis de solidificación etapa 1 y 2, respectivamente.....	70
Figura 50: Análisis de solidificación etapa 3 y 4, respectivamente.....	71
Figura 51: Análisis de solidificación etapa 5 y 6, respectivamente.....	71
Figura 52. Configuración de la termocupla.....	74
Figura 53. Puntos de extracción de fotografías micrográficas.....	78
Figura 54. Diagrama Al-Si y fases presentes en Al-8,9% Si. (Fuente propia)	82
Figura 55. Fases presentes en la aleación de aluminio.....	83
Figura 56. a) Dendritas en aleación de cobre en fundición en molde de cascara. b) Crecimiento dendrítico.....	92
Figura 57. Gráfica Tamaño de grano VS Velocidad de enfriamiento.....	93
Figura 58. Diagrama Cu-Zn y fases presentes en Cu-19,5% Zn.....	96
Figura 59. Fases presentes en el latón.....	97
Figura 60: Gráfica temperatura (K) vs tiempo (min), de simulación y experimental.....	102

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Propiedades típicas de algunas aleaciones de Aluminio</i>	20
Tabla 2 <i>Propiedades típicas de algunas aleaciones de cobre fundido</i>	21
Tabla 3 <i>Características generales de los procesos de fundición.</i>	24
Tabla 4 <i>Ventajas y limitaciones de los procesos de fundición</i>	24
Tabla 5 <i>Etapas de la metodología de trabajo</i>	40
Tabla 6 <i>Mantenimientos realizados en máquinas</i>	41
Tabla 7 <i>Tabla de reactivos utilizados para el ataque químico</i>	54
Tabla 8 <i>Ecuaciones de gobierno para el método de elementos finitos</i>	61
Tabla 9 <i>Condiciones de frontera y condiciones de la colada</i>	62
Tabla 10 <i>Variables obtenidas con las dimensiones del molde permanente</i>	73
Tabla 11 <i>Resultados de datos, de temperaturas en la Simulación y Experimental</i>	74
Tabla 12 <i>Micrografías de la aleación aluminio a 50X</i>	76
Tabla 13 <i>Micrografías de la aleación de aluminio a 100X</i>	77
Tabla 14 <i>Micrografías de la aleación de aluminio a 500X</i>	77
Tabla 15 <i>Micrografías de la aleación de aluminio en F. molde permanente a 200X, 500X</i>	79
Tabla 16 <i>Componentes de la aleación de aluminio</i>	80
Tabla 17 <i>Familias de Aleaciones de aluminio, extracto.</i>	81
Tabla 18 <i>Cambio de fases en el punto eutéctico de la aleación Al-Si</i>	83
Tabla 19 <i>Morfología de las fases encontradas.</i>	84
Tabla 20 <i>Propiedades mecánicas obtenidas % elong, E, Sy, Sut</i>	85
Tabla 21 <i>Resultados obtenidos en el ensayo de impacto.</i>	86
Tabla 22 <i>Resultados obtenidos en el ensayo de microdureza</i>	87

Tabla 23 <i>Micrografías del latón a 50X</i>	89
Tabla 24 <i>Micrografías del latón a 100X</i>	90
Tabla 25 <i>Micrografías del latón a 500X</i>	91
Tabla 26 <i>Micrografías del latón en F. molde permanente a 200X, 500X</i>	93
Tabla 27 <i>Componentes del latón</i>	95
Tabla 28 <i>Familia C8XXXX de latones</i>	96
Tabla 29 <i>Propiedades mecánicas obtenidas % elong, E, Sy, Sut</i>	98
Tabla 30 <i>Resultados obtenidos en el ensayo de impacto.</i>	99
Tabla 31 <i>Resultados del análisis de dureza en el latón</i>	100

RESUMEN

En la presente investigación se analiza las propiedades mecánicas y microestructura de una aleación de Al-Si y una aleación de Cu-Zn (Latón), producidas mediante cuatro procesos de fundición usados industrialmente: molde permanente, centrifugado, molde de cáscara y molde en arena, con el objetivo principal de reconocer cuál es el proceso que presenta mejores propiedades mecánicas. Se establece las características y pasos de cada uno de los cuatro procesos de fundición, para las dos aleaciones. Se caracterizan las aleaciones en cuanto a su composición química y su microestructura. Se obtuvieron las propiedades mecánicas de cada proceso de fundición mediante los ensayos de tracción, impacto (Charpy) y microdureza cumpliendo los requerimientos detallados en las normas ASTM. Se presenta una simulación mediante el método de elementos finitos (MEF) de la solidificación de la fundición por molde permanente de la aleación de Al-Si, la cual hace un análisis del tiempo de solidificación, para compararlo con el tiempo obtenido teóricamente. Se determinó cómo afecta la velocidad de enfriamiento en las microestructuras y la microdureza de los diferentes procesos de fundición.

Palabras claves:

- **FUNDICIÓN**
- **MICROESTRUCTURA**
- **PROPIEDADES MECÁNICAS**
- **SOLIDIFICACIÓN**

ABSTRACT

In the present investigation we seek to analyze in a complete way the mechanical properties and microstructure of an Al-Si alloy and a Cu-Zn alloy (Brass), through four processes of casting that is used in the production of parts in the industry: permanent mold, centrifugation, shell mold and sand mold, with the main objective of recognizing which process has the best characteristics among the four, both mechanical and physical. The document details the characteristics and their respective steps of each of the casting processes, both Al-Si and Cu-Zn alloy, and identifies what were the exact percentages of the metal components of these alloys and how these components intervene in the formation of their intermetallics and characterize their phase diagram as well as their microstructures, which detail the phases generated in the alloy and its grain size. Also it presents in a detailed way the obtaining of the mechanical properties by means of the tests of traction, impact (Charpy) and microhardness fulfilling the requirements detailed in the ASTM norms. A simulation using the finite element method (FEM) of the solidification of the casting by permanent mold of the Al-Si alloy is presented, which makes an analysis of the solidification time, to compare it with the theoretically obtained time. In the data analysis it is indicated how the cooling speed affects the microstructures and the microhardness of the different casting processes.

Keywords:

- **CASTING**
- **MICROSTRUCTURE**
- **MECHANICAL PROPERTIES**
- **SOLIDIFICATION**

CAPÍTULO I

1. GENERALIDADES

1.1. Introducción

Este proyecto pretende la investigación, de la evaluación de las propiedades mecánicas, a través de un análisis en probetas, obtenidas por medio de cuatro procesos de fundición: molde de arena, molde permanente, centrifugada, en cáscara. Donde se determinará; dureza, tenacidad, resistencia y la microestructura, de dos aleaciones de bajo punto de fusión, una aleación de cobre (950 °C) y una aleación de aluminio (660 °C), junto con los componentes que forman estas aleaciones a través de un análisis químico.

El principal interés que lleva a cabo esta investigación, es la escasa información de un análisis comparativo que enfoque estos cuatro procesos de fundición para determinar sus diferencias, similitudes y encontrar el más adecuado para una aplicación requerida.

En este proyecto se presenta una simulación mediante elementos finitos, que analiza la velocidad de enfriamiento durante la solidificación del material.

1.2. Antecedentes

La necesidad e importancia actual de metales con base en aleación de aluminio y base en aleación de cobre es alta, indispensable en la industria en general y con los cuales nos vemos rodeados en el diario vivir.

En el trabajo de titulación de fundición de cobre y aluminio en el país, se plantea que la producción obtenida en el Ecuador de fundición de Aluminio y Cobre es muy baja, importando la mayor parte de estos. Se determina que la fundición es totalmente viable y se puede obtener grandes resultados (Saavedra, 2017). Exceptuando este trabajo antes mencionado, es escasa la investigación en cuanto a fundición dentro del Ecuador.

El uso de herramientas y maquinaria fue brindado por la Universidad de las Fuerzas Armadas, los cuales se usaron en el proceso de fundición y ensayos; agradeciendo esto, nos vemos en la posibilidad de utilizar los equipos del laboratorio de Ciencia de Materiales con certeza de un trabajo óptimo.

En cuanto a trabajos previos en general, se tiene como base algunos escritos científicos de los cuales nos apoyamos, mencionados a continuación:

En el estudio sobre “Metalurgia aplicada en la obtención de un bronce complejo, al aluminio”, destaca la fundición de bronce, el cual es un metal aleado proveniente de una relación en su composición de cobre, aluminio y hierro. Este trabajo brinda conocimiento en cuanto a los porcentajes y tipos de bronce, y ayudan al entendimiento de la fundición del cobre y el aluminio. (Valdez, 2012).

Para el moldeo en arena nos apoyamos en diferentes trabajos, de entre el cual destacamos la Tesis de grado de Guzmán y Caiza de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, en

donde establecen un procedimiento óptimo de moldeo en fundición de arena. (Guzmán & Caiza, 2011),

El estudio que se presenta aquí hace énfasis en la fundición en Molde Permanente, ya que es aquí en donde se analizará el descenso de temperatura en la solidificación; Alfredo Flores brinda información importante en este tipo de fundición en tanto a las variables que afectan la porosidad como el efecto que tienen las temperaturas de molde y metal fundido, la velocidad de inclinación, el porcentaje de Al y sus interacciones sobre la obtención de piezas libres de defectos. (Flores, 2013).

De estos estudios, y trabajos, se obtendrá el conocimiento y experiencia en cuanto a la fundición centrifugada, en molde de arena, molde permanente y en molde de cáscara.

Los ensayos que se realizarán en este trabajo son: ensayo de tensión, ensayo Charpy, ensayo de dureza, análisis de microestructura y una simulación de la velocidad de enfriamiento mediante elementos finitos. Cabe recalcar que el proyecto en todo su proceso se regirá con un correcto cumplimiento de las normas establecidas tanto para la fundición como para los ensayos.

El horno usado para el proceso de fundición es el creado por Jorge Bone y David Crespo en su tesis, como dato sumamente importante, destacamos la temperatura máxima del horno, la cual es de 1200°C (Bone & Crespo, 2015), por esta razón se ve en capacidad de fundir tanto la aleación de cobre como la de aluminio que van a ser utilizadas en nuestra investigación.

1.3. Justificación e importancia

La fundición es una rama muy importante dentro de la manufactura, debido a que con este proceso se pueden producir piezas u objetos de formas complejas y de gran tamaño.

Con respecto a la fundición dentro de la industria ecuatoriana las aleaciones más utilizadas en producción de piezas son las de aluminio y cobre. Por ello el estudio de este tipo de aleaciones es de gran importancia.

En el proceso de fundición existen varios parámetros a considerar, que determinan las propiedades del material, entre los más importantes la relación entre; propiedades mecánicas, microestructura y su velocidad de enfriamiento, que pueden estar determinadas por el tipo de fundición en el cual hayan sido realizados. Dando como resultado un tamaño de grano característico el cual necesita un análisis macro, para determinar las propiedades del elemento fundido, y poder hacer una comparativa entre los diferentes procesos de fundición versus el enfriamiento dado en cada uno de ellos.

Por lo expuesto anteriormente, este trabajo realizará un estudio que pretende comparar entre los cuatro procesos de fundición; en arena, en molde permanente, centrifugada y molde de cáscara, obteniendo un tamaño de grano que estará sujeto a la velocidad de enfriamiento de cada proceso, para determinar las propiedades mecánicas, químicas y físicas de cada aleación planteada en el proyecto dentro de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, con el fin de aportar al campo de investigación.

Ya que existen parámetros que determinan la velocidad de enfriamiento del material, tanto como temperatura del molde inicial, temperatura de la colada y velocidad de vertido; se utilizará un programa que maneja la metodología de cálculo de elementos finitos para simular el tiempo de solidificación del molde permanente.

1.4.Objetivos

1.5.Objetivo general

Evaluar las propiedades mecánicas y microestructura obtenidas de una aleación de cobre y una aleación de aluminio, por cuatro procesos de fundición: molde permanente, molde de arena, molde en cáscara, centrifugada.

1.6.Objetivos específicos

- Revisión del estudio del arte de la relación entre los procesos de fundición y su efecto en la microestructura y sus propiedades mecánicas
- Obtener probetas mediante cuatro procesos de fundición: molde de arena, molde permanente, molde de cáscara, centrifugada.
- Caracterizar la microestructura de una aleación de aluminio y una aleación de cobre de bajo punto de fusión mediante los cuatro procesos de fundición, comparar el tamaño de grano del centro al borde de las probetas obtenidas
- Ejecutar ensayos de tracción y Charpy, y medición de dureza a las probetas de aleación de aluminio y la aleación de cobre obtenidas en los cuatro procesos de fundición.

- Analizar la velocidad de enfriamiento de la fundición en molde permanente con una termocupla tipo K y realizar una simulación, mediante elementos finitos, donde se verifique el tiempo de solidificación.
- Analizar y concluir sobre los resultados obtenidos

1.7. Alcance del proyecto

En la presente investigación se plantea evaluar las propiedades mecánicas mediante ensayos no destructivos y ensayos destructivos los cuales son: ensayo de Tensión, ensayo Charpy, ensayo de dureza, análisis de microestructura y tamaño de grano para cada tipo de fundición (fundición por molde de arena, centrifugada, en cascara y en molde permanente) de una aleación de cobre de bajo punto de fusión y una aleación de aluminio, mediante cuatro procesos de fundición.

En la experimentación se realizará diferentes ensayos, que permitan la correcta medición de las propiedades mecánicas de las aleaciones, cumpliendo los protocolos de las normas, ASTM E8 para el ensayo de tensión; ASTM E23 para el ensayo de impacto (Charpy) y ASTM E18 para el ensayo de dureza. Con el fin de obtener datos confiables y reproducibles. Estos ensayos se realizarán en el laboratorio de Mecánica de Materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE.

De igual forma se utilizarán los equipos de fundición que se encuentran ubicados en el laboratorio de Ciencia de los Materiales, con el afán de extraer probetas, de una aleación de aluminio y una aleación de cobre de bajo punto de fusión.

Se fabricará un matriz de un elastómero con la forma de la probeta para la máquina de fundición centrífuga, también se fabricará piezas con forma de las probetas que sirvan como molde de la matriz de cascarilla.

El laboratorio de Ciencia de los Materiales permitirá realizar las distintas metalografías para diferentes probetas de los dos tipos de aleaciones, correspondientes a cada proceso de fundición descrito. Haciendo uso de estas herramientas es posible y obligatorio presentar las diferencias de cada caso y proponer aplicaciones, características y resultados obtenidos.

Para la fundición por molde permanente de la aleación Al-Si se realizará un análisis de velocidad de enfriamiento mediante el uso de una termocupla tipo K y la comparativa mediante una simulación por Elementos Finitos.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Aleaciones de aluminio fundido

El Aluminio, un metal no ferroso y ligero, con símbolo Al y número atómico 13 posee una densidad de 2.70 g/cm^3 y se funde a $660.3 \text{ }^\circ\text{C}$; siendo el tercer metal más abundante dentro del planeta y se lo encuentra en su estado natural como mineral de nombre bauxita para su procesamiento. (Askeland, 2013)

El Aluminio posee propiedades que son indispensables dentro de la ingeniería mecánica, como un fácil mecanizado, alta maleabilidad, alta ductilidad, resistencia a la corrosión y posee una relación de resistencia - peso muy buena ya que, mediante aleaciones, su resistencia mecánica es capaz de aumentar hasta 620 Mpa (Groover, 2012). Entre sus aplicaciones principales se utiliza en la industria eléctrica, aeronáutica, automotriz y en la construcción que son campos en los que el peso es un factor importante en la fabricación de elementos. Con limitaciones, por su bajo punto de fusión no es capaz de trabajar a altas temperaturas y su poca dureza genera poca resistencia al desgaste abrasivo. La tabla 1 muestra las propiedades de aleaciones de aluminio y para qué son usadas.

Tabla 1
Propiedades típicas de algunas aleaciones de Aluminio

Aleación número	Análisis químico porcentaje	Resistencia a la tracción	Resistencia a la fluencia	Alargamiento %	Dureza	Uso típico
356	7 Si, 0.4 MG	25	20	2	BHN 60	Transmisión de automóvil, carcazas, ruedas
		38	27	5	BHN 80	
40E	5.5 Zn, 0.6 Mg, 0.5 Cr, 0.15 Ti	35	25	3	BHN 75	Partes para máquinas
108	3 Si, 4 Cu	21	14	2	BHN 55	General
380	8 Si, 3.5 Cu	47	23	4	BHN80	Fundición de molde permanente
390	17 Si, 1 Fe, 4.5 Cu, 0.5 Mg	41	35	3	BHN 120	Fundición de molde permanente

Fuente: (Finn, 1979)

2.2 Aleaciones de cobre fundido

El cobre, con símbolo Cu, que se funde a 1084 °C (Askeland, 1987), es utilizado en piezas fundidas en las que se requiere alta conductividad térmica y eléctrica, además de ser imprescindible en la industria por sus buenas propiedades como resistencia a la corrosión, gran ductilidad y maleabilidad, y un color llamativo. Son importantes las aleaciones de cobre con plomo en la fabricación de bujes, y las aleaciones con estaño en engranajes como se presenta a continuación en una tabla 2 con las propiedades en fundiciones de cobre y su uso típico.

Tabla 2*Propiedades típicas de algunas aleaciones de cobre fundido (Finn, 1979)*

Aleación número	Análisis químico porcentaje	Resistencia a la tracción	Resistencia a la fluencia	Alargamiento %	Dureza	Uso típico
801	Cu	25	9	40	BHN 44	Conductores eléctricos
836	85 Cu, 5 Sn, 5 Zn, 5 Pb	37	17	30	BHN 60	Válvulas, bujes
937	80 Cu, 10 Sn, 10 Pb	35	18	20	BHN 60	Bujes, bombas
964	70 Cu, 30 Ni	68	37	28	BHN 140	Válvulas marinas
824	98 Cu, 2 Be	150	140	1	38 Rc	Matrices, herramientas
916	88 Cu, 10 Sn, 2 Ni	44	22	6	BHN 85	Engranajes
953	89 Cu, 10 Al, 1 Fe	75	27	25	BHN 140	Engranajes, bujes
		85	42	15	BHN 174	

Fuente: (Finn, 1979)

2.3 Fundición

La fundición de metales basa su proceso en: fundir el metal, vaciarlo en un molde y dejar enfriar el mismo. Su principal ventaja es la producción de piezas con geometrías complejas y de gran tamaño. Los materiales a fundir deberán tener propiedades óptimas de fusibilidad y

colabilidad, necesarias para la fundición, como en aleaciones de hierro, cobre y aluminio. En la Figura 1 se explica el proceso de manera detallada. (Ferrer & Amigó, 2005).

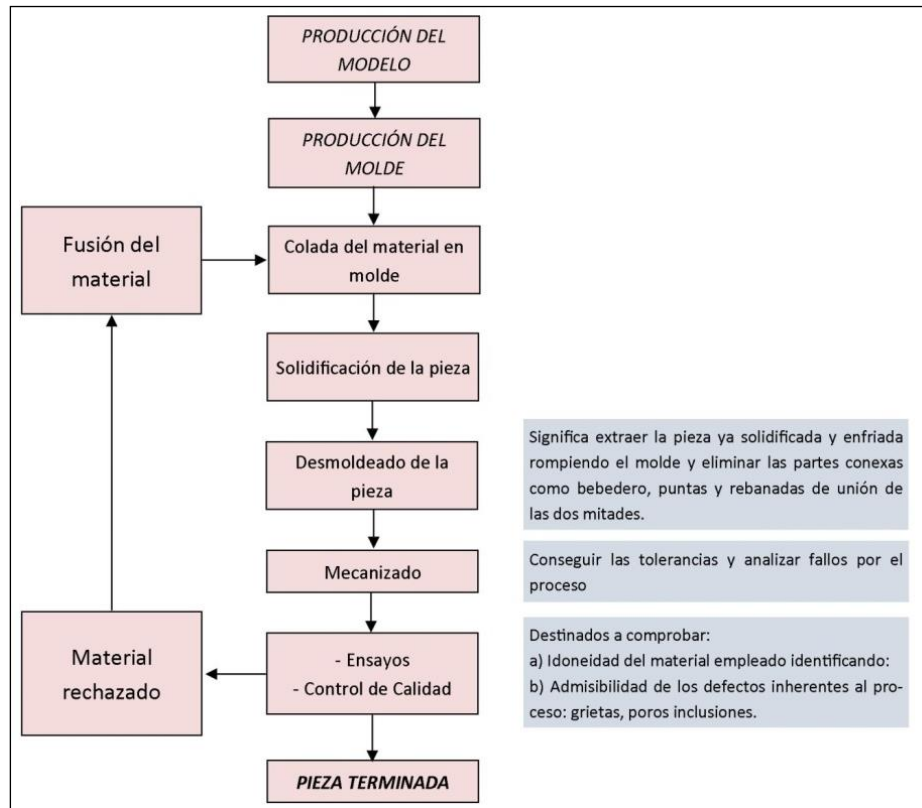


Figura 1. Proceso de fundición.
Fuente: (Ferrer & Amigó, 2005)

En el proceso de fundición cuando el metal fundido empieza a enfriarse se provoca un cambio de fase en el material, lo cual provoca que se disipe una considerable cantidad de calor con lo cual se establecen muchas de las propiedades y características del metal fundido como son las propiedades mecánicas y microestructura que dependen de la velocidad de enfriamiento; las mismas que pueden estar determinadas por el tipo de fundición en el cual hayan sido realizados. Dando como resultado un tamaño de grano característico.

2.3.1 Clasificación de los sistemas de fundición

Son varios los criterios de clasificación de los procesos de fundición, entre los más representativos están la clasificación por tipo de molde, *Figura 2*, y la clasificación por la forma de ingreso de metal al molde.

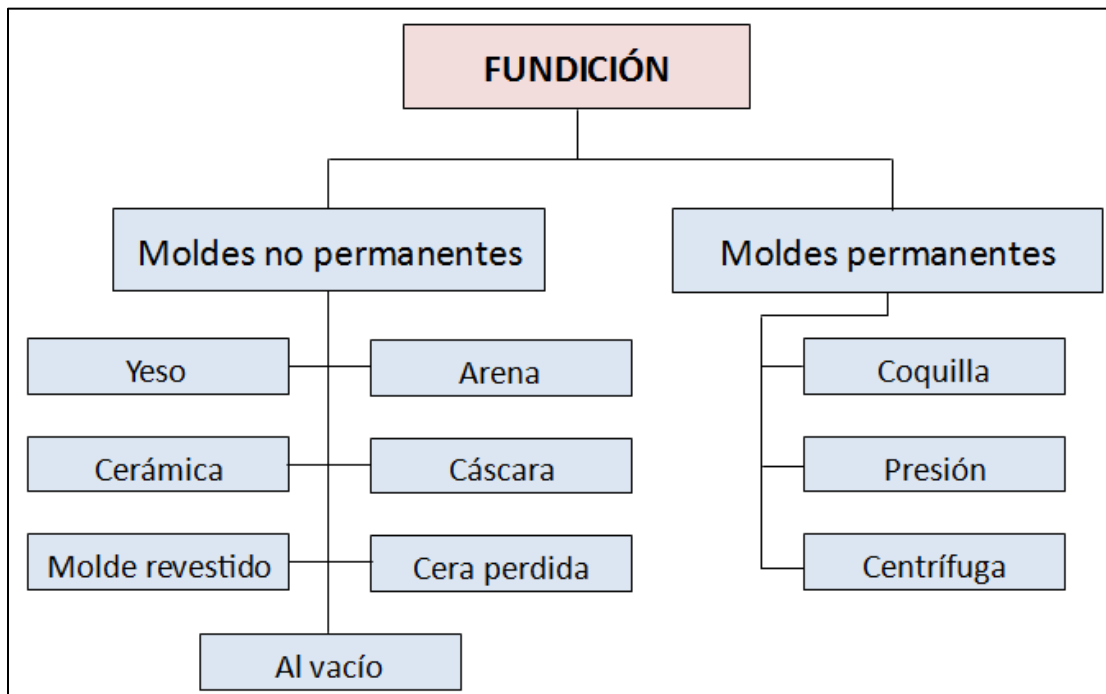


Figura 2. Clasificación de los procesos de fundición, por tipo de molde.

Fuente: (PRESS FORJA S.A., 2012)

Cabe recalcar que a cada tipo de fundición le acompañan diferentes resultados obtenidos al final del proceso, y según esto será beneficioso o no el tipo de fundición escogida. En la *Tabla 3* se presentan este análisis entre los diferentes tipos de fundición.

Tabla 3
Características generales de los procesos de fundición.

Proceso	Materiales fundiciones típicos	Peso (Kg)		Complejidad de forma	Espesor sección (mm)	
		Min	Max		Min	Max
Arena	Todos	0.05	Sin Límite	1 a 2	3	Sin límite
Moldeo Cascara	Todos	0.05	100+	2 a 3	2	–
Molde permanente	Todos	0.05	300	3 a 4	2	50
Centrífugo	Todos	–	5000+	3 a 4	2	100

Fuente: (Groover & Mikell)

Tabla 4
Ventajas y limitaciones de los procesos de fundición

Proceso	Ventajas	Limitaciones
Arena	Se puede colocar prácticamente cualquier metal; no hay límite de tamaño, forma o peso; costo de herramienta bajo.	Se requiere acabado posterior; acabado áspero; tolerancias amplias.
Moldeo cascara	Buena precisión dimensional y acabado superficial; alta velocidad de producción	Restricción del tamaño del producto; se requieren modelos y equipos costosos.

CONTINUA

Molde permanente	Acabado superficial y precisión dimensional aceptable; porosidad baja; velocidad de producción alta.	Costo del molde elevado; forma y complejidad limitados; no adecuado para metales de alto punto de fusión
Centrífugo	Grandes piezas cilíndricas de buena calidad; alta velocidad de producción.	El equipo es costoso; la forma de producto es limitada

Fuente: (Lee, 2016).

2.3.1.1 Fundición en molde de arena

En los moldes de arena su uso es único, es decir, una vez solidificado el producto el molde se lo destruye; a estos moldes se los conoce como moldes temporales.

Los moldes de arena permiten trabajar con metales de alto punto de fusión como son el acero y níquel. La fundición en arena comienza con la fabricación del modelo de la pieza a fundir, luego este modelo se coloca entre la arena, con una humedad del 9%, para generar una cavidad negativa y se ubican los sistemas de alimentación que guían el metal fundido hacia las cavidades del molde, una vez solidificado y enfriado se destruye el molde y se extrae la pieza para su posterior maquinado o tratamientos térmicos requeridos. (Protocolo de Fundición, 2008)

En la figura 3 se representa el proceso de fundición por molde de arena:

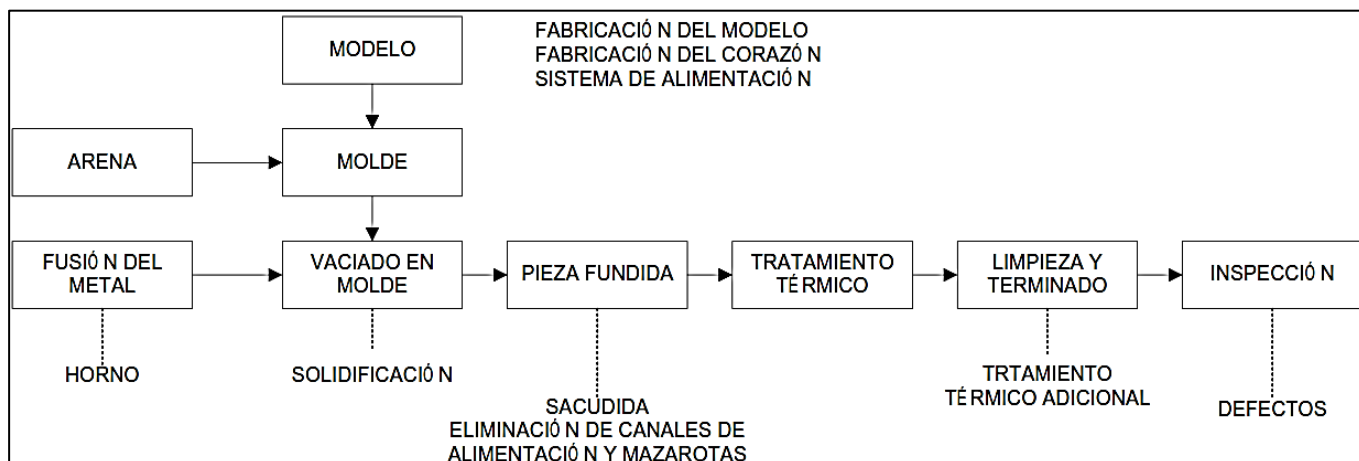


Figura 3. Proceso de fundición en molde de arena.
Fuente: (Facultad de Ingeniería Industrial, 2008)

2.3.1.2 Fundición en cáscara

Este proceso de fundición es utilizado en la fabricación en serie de piezas con geometría simple y compleja, además brindando un buen acabado superficial, lo que evita el maquinado excesivo para obtener la pieza final. (Monroy, s.f.)

Proceso de moldeo

1. Para la obtención del molde se realiza una mezcla que consiste en arena de sílice seca con resina fenólica formaldehído en un intervalo de 6 - 10 %, que depende del tamaño de grano de la arena. La mezcla es depositada en la caja de la máquina. Se maquinan dos superficies metálicas complementarias, en forma de la pieza a ser fabricada, fijándola en la tapa de la caja, estas superficies deben ser precalentadas de forma eléctrica a una temperatura de 150 a 300°C y lubricada, para evitar la adherencia de la arena por completo y una fácil extracción.
2. A través de un mecanismo manual la caja es volteada para que la mezcla de arena y aglutinante se fije completamente a la superficie metálica.

3. La caja se coloca en posición para generar el revestimiento sobre la superficie, generando una capa de espesor que va de 5mm a 10mm. Por la propiedad de la resina permite un enfriamiento rápido.
4. La caja vuelve a voltearse a su posición inicial, para quitar los excesos de la mezcla. Se retira la superficie de la caja, que está adherida a la costra formada por el proceso, introduciéndola a un horno a una temperatura de 300°C para que se produzca el endurecimiento, convirtiéndola en una cascara rígida.
5. Se realiza el mismo procedimiento para la superficie complementaria generando otra cascara rígida, la unión de las dos cascara conformara el molde.
6. El molde para tener una mayor fijación se coloca en una caja rectangular, y se la llena de arena o perlas metálicas dejándolo inmóvil y listo para realizar el proceso de fundición.

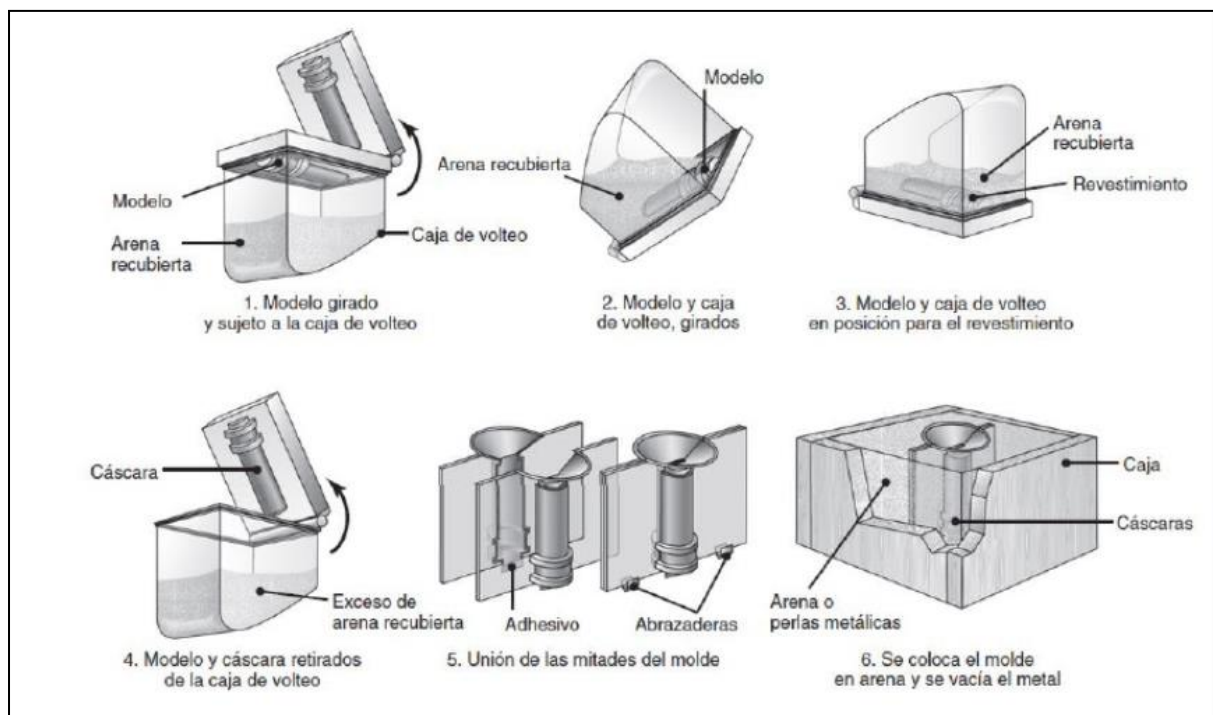


Figura 4: Proceso de moldeo por cascara.

Fuente: (Villareal, 2013)

Una vez terminado el proceso cuando se solidifique, el molde de cáscara debe ser removido y se obtendrá la pieza deseada con un buen acabado superficial.

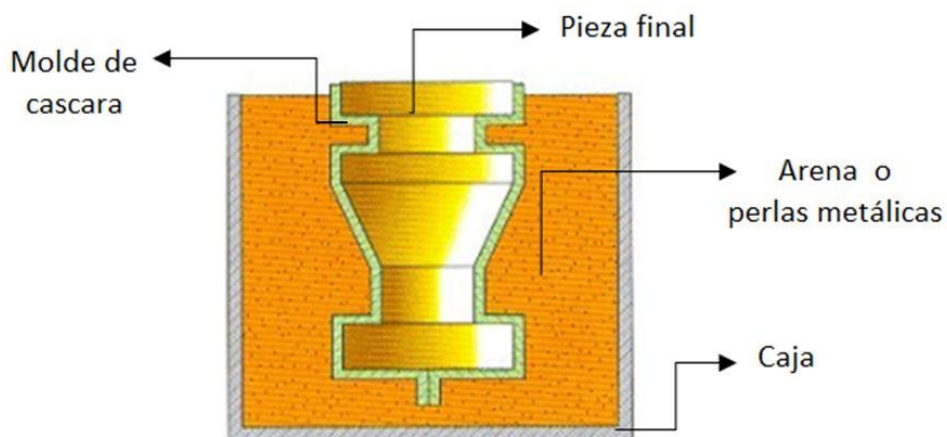


Figura 5: Proceso finalizado de fundición por cascara
Fuente: (I.E.S, Monroy)

2.3.1.3 Fundición por molde permanente

Es un método donde se puede reutilizar su molde para una serie de piezas realizadas por fundición, está hecho de grafito, metal o hierro fundido, y consta de dos o más partes desmontables, generando una cavidad, estas son fabricadas a través de maquinado por lo que garantizan un buen acabado superficial. Los moldes se cubren con negro de humo, con el fin de una fácil extracción de las piezas, asegurando también un mayor tiempo de vida útil del molde. (Rojas, 2017)

El molde se debe precalentar con el fin de evitar un choque térmico entre el metal fundido y la cavidad, donde se vierte la colada, únicamente con la fuerza de gravedad para que llene toda la cavidad, esto garantiza la calidad de la fundición. El molde empieza su enfriamiento mediante canales de refrigeración facilitando la extracción de la pieza final.

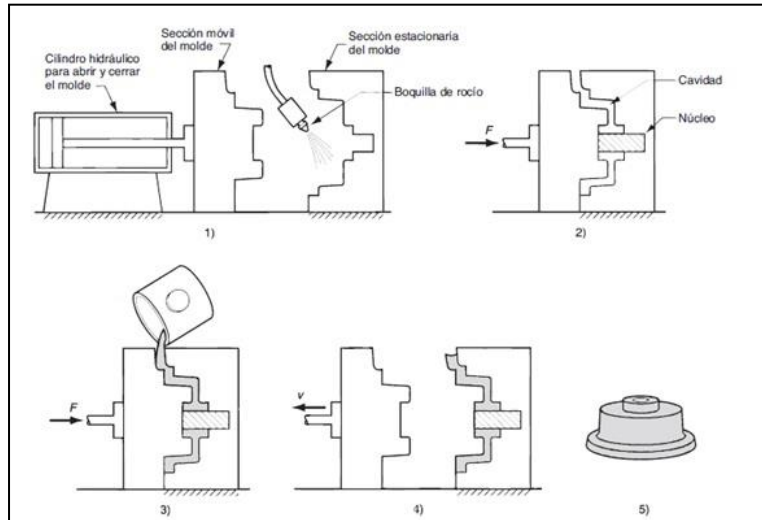


Figura 6: *Fundición en molde permanente por gravedad*
Fuente: (Rojas, 2017)

2.3.1.4 Fundición centrífuga

El proceso de fundición centrífuga nace a partir de la necesidad de alcanzar altos detalles en piezas fabricadas por fundición, mediante el efecto centrífugo, las cavidades del molde son capaces de llenarse por completo permitiendo alcanzar un nivel de detalles alto.

La fundición centrífuga se clasifica en:

- 1) Fundición centrífuga real
- 2) Fundición semicentrífuga
- 3) Fundición centrifugada o centrifugado

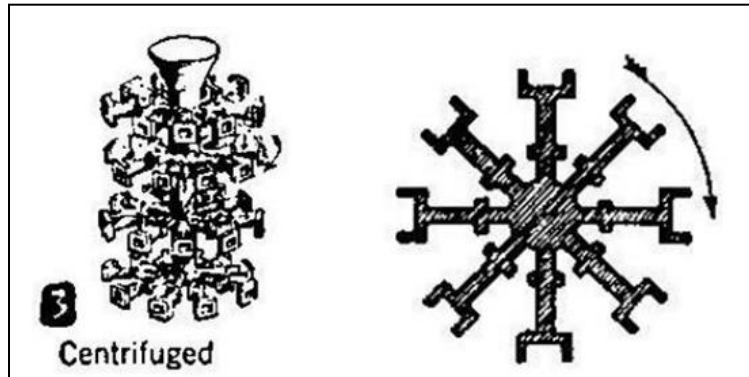


Figura 7: Aplicaciones de fundiciones centrifugas
Fuente: (Askeland, 1984)

Entre las aplicaciones están: piezas con cavidades complejas, piezas con simetría rotacional, tubulares, piezas con alto requerimiento de tenacidad (propiedad que se logra mejorar mediante este método).

2.4 Solidificación y enfriamiento

Una vez colado el metal en el molde, éste se enfría y solidifica pasado un tiempo específico según: el material fundido, el tipo de molde, factores ambientales, etc.

Dentro de los aspectos asociados al enfriamiento están:

- El tiempo de enfriamiento del metal
- La contracción
- La solidificación direccional
- El diseño de las mazarotas.

2.4.1 Tiempo de solidificación

El tiempo total de solidificación es el tiempo necesario para que la fundición solidifique después del vaciado. Este tiempo depende del tamaño y de la forma de la fundición expresada por una relación empírica conocida como regla de Chvorinov.

$$t_s = C_m \left(\frac{V}{A}\right)^n \quad (\text{Groover M. P., 2012, pág. 48})$$

Dónde:

t_s = Tiempo de solidificación [min]

V = Volúmen de fundición [m^3]

A = Área superficial de la fundición [m^2]

n = Exponente que toma usualmente el valor de 2

C_m = Constante del molde

* C_m : Depende de las propiedades del molde y del metal, como se muestra a continuación.

$$C_m = \left[\frac{\rho_m \cdot L}{T_m - T_o}\right]^2 \cdot \left[\frac{\pi}{4 \cdot k \cdot \rho \cdot c}\right] \cdot \left[1 + \left(\frac{C_m \cdot \Delta T_s}{L}\right)^2\right] \cdot \left(\frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}}\right) \cdot \left(\frac{1 \text{ m}^2}{10\,000 \text{ cm}^2}\right) \quad (\text{Groover M. P., 2012})$$

Donde:

- T_m = temperatura de fusión o solidificación del líquido (en Kelvin)
- T_o = temperatura inicial del molde (en Kelvin)
- $\Delta T_s = T_{\text{vertido}} - T_m$ = sobrecalentamiento (en Kelvin)
- L = calor latente de fusión (en [$J \cdot kg^{-1}$])
- k = conductividad térmica del molde (en [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$])
- ρ = densidad del molde (en [$kg \cdot m^{-3}$])
- c = calor específico del molde (en [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$])
- ρ_m = densidad del metal (en [$kg \cdot m^{-3}$])
- c_m = calor específico del metal (en [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$])

Este factor C_m puede venir dado por experimentación previa realizada con el material del molde, metal y temperatura de vaciado para diferentes modelos de fundición.

El principio de Chvorinov indica que con una relación de volumen a área superficial se enfriará y solidificará más lentamente que otra con una relación más baja (Groover, 2012).

Este principio posteriormente ayudará en el diseño de la mazarota del molde, el cual es el sistema de alimentación.

En la solidificación el intercambio de calor se produce en mayor medida mediante convección y conducción en las zonas en las que el molde está en contacto con el medio ambiente o en las que el metal aún no se ha solidificado, y en menor medida en radiación para las partes no cubiertas por el molde. (García, 2016)

El perfil de temperaturas tanto en el molde como en el material se grafica como se muestra en la figura 8, en donde se observa como la temperatura disminuye a lo largo del centro del molde hasta la pared externa del mismo, en donde se presenta la convección con el medio ambiente.

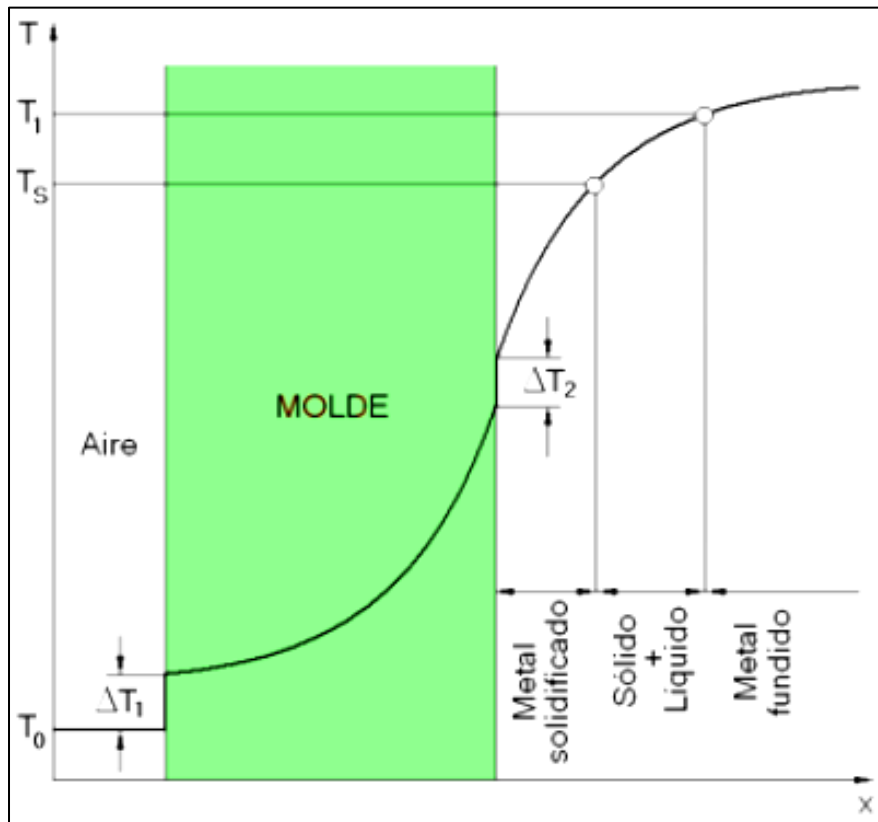


Figura 8. Distribución de temperatura en función del tiempo.
Fuente: (García, 2016)

Las distribuciones térmicas están directamente influenciadas por las características de forma de la pieza que producen desviaciones de las condiciones de superficie plana (García, 2016).

Así también es importante el descenso de temperatura una vez colado el metal, la figura 9 muestra la evolución de la solidificación a través del tiempo.

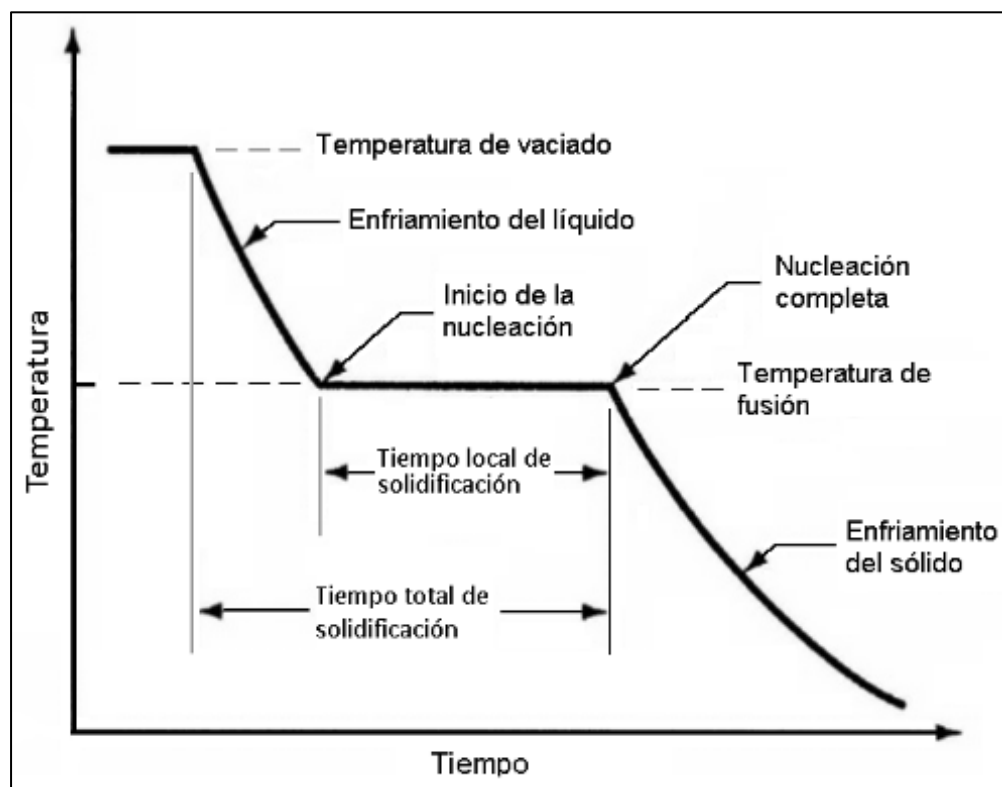


Figura 9. Evolución de la solidificación
Fuente: (García, 2016)

2.4.2 Contracción

La contracción se produce durante la solidificación y enfriamiento del metal, causando cambios dimensionales importantes que pueden llegar a producir agrietamiento o rechupes internos. Este proceso de contracción ocurre en tres pasos y como se muestra en la figura 10:

1. Contracción líquida durante el enfriamiento antes de la solidificación.
2. Contracción durante el cambio de fase de líquido a sólido.
3. Contracción del metal solidificado durante el enfriamiento hasta temperatura ambiente.

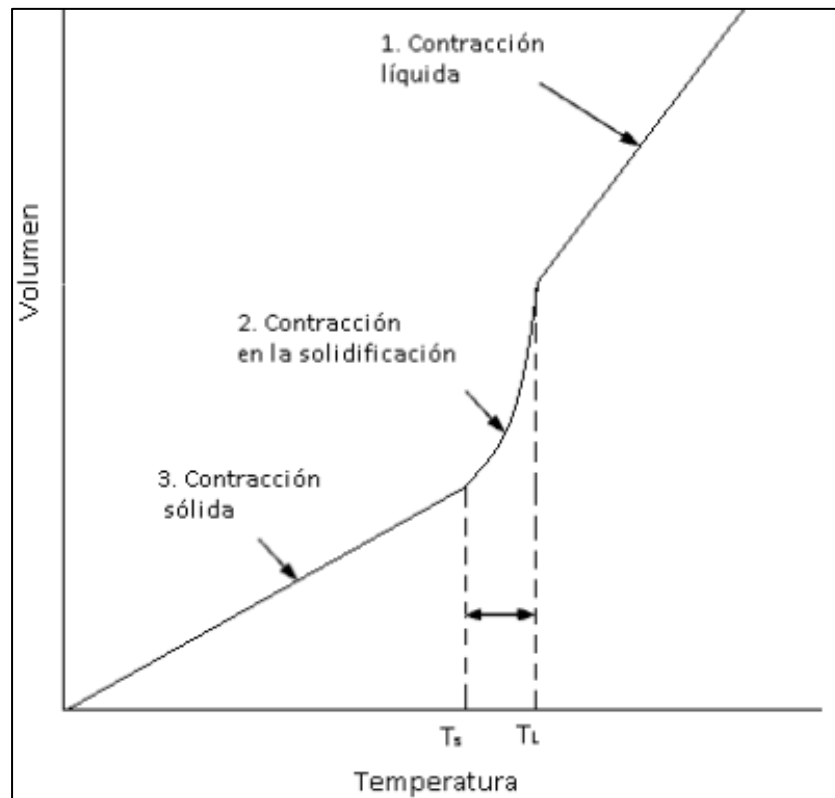


Figura 10. Temperatura vs volumen en la contracción.
Fuente: (García, 2016)

2.5 Diagramas de fase

El diagrama de fases es un medio para representar las relaciones existentes entre la estructura, composición y cantidades de cada fase en equilibrio; por lo general estos diagramas de fase se los encuentra a una presión de 1 atm. Una fase es una porción homogénea de un sistema de tiene características físicas y químicas uniformes. (Avner, 1988)

2.5.2 Cantidad de cada fase

Es importante conocer las cantidades relativas de cada fase presente en ciertos puntos del diagrama, para esto se utiliza la regla de la palanca, la cual determina las fases en porcentaje en peso y se determina como se muestra en la figura 11.

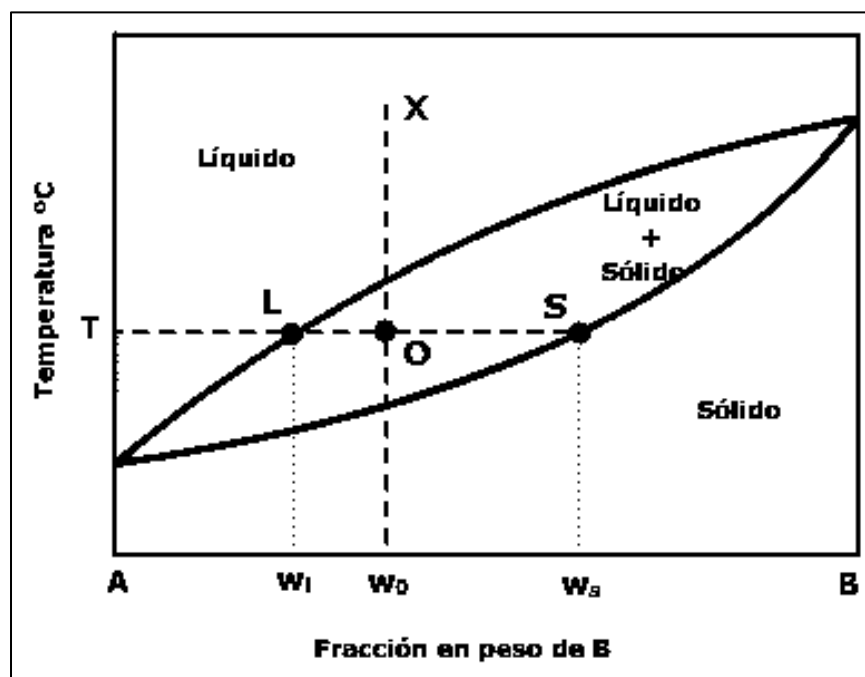


Figura 11. Esquema y ecuación de la regla de la palanca
Fuente: (CATEDU, 2016)

2.5.3 Diagrama eutéctico con insolubilidad total en estado sólido

Es un diagrama binario donde la solubilidad de los materiales es casi despreciable. La temperatura eutéctica viene de la palabra eutektos, que significa fundir bien, por lo tanto las aleaciones a ser fundidas deberían tener una composición eutéctica confiriendo a las aleaciones puntos bajos de fusión y una rapidez relativa de enfriamiento. Estas composiciones entregan una microestructura de grano fino, como se puede ver en la figura 12.

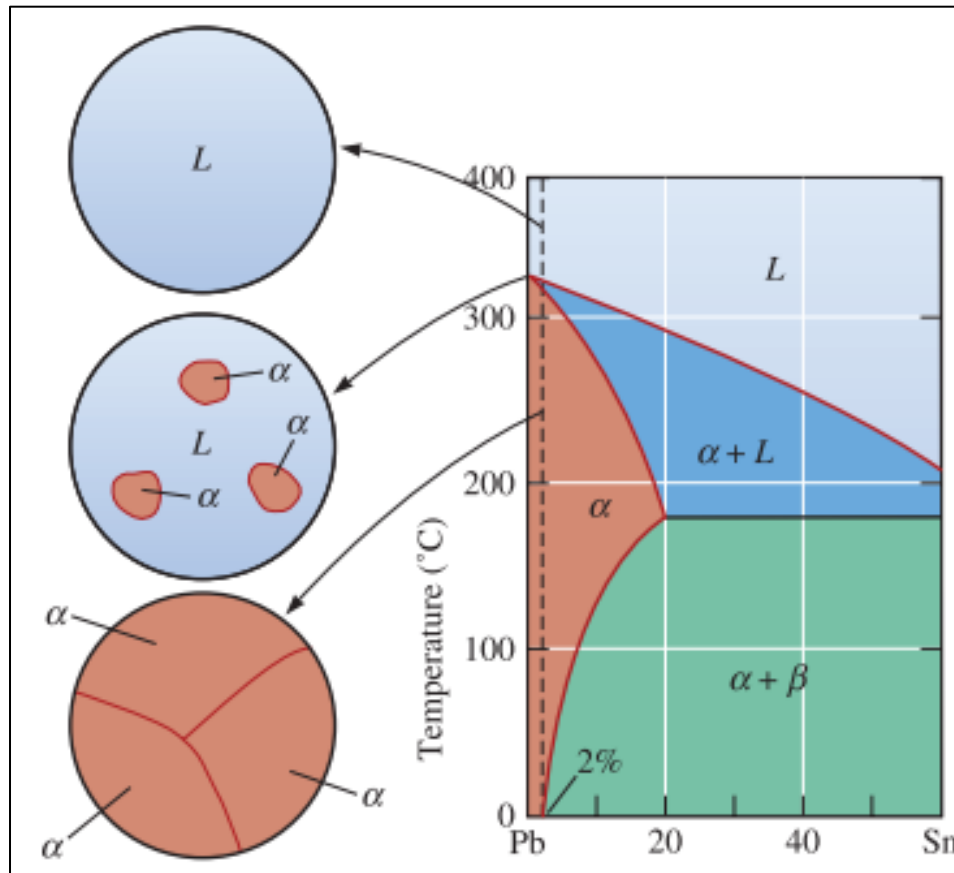


Figura 12: Microestructuras características de las regiones de un diagrama de fases eutéctico binario con insolubilidad total.

Fuente: (Askeland, 2010)

2.5.4 Diagrama eutéctico con solubilidad parcial en estado sólido

Es un diagrama binario donde los materiales son parcialmente solubles, a diferencia de la figura 12 este posee a sus contornos zonas de solución sólidas, generando una variación en las microestructuras, como se puede observar en la figura 13.

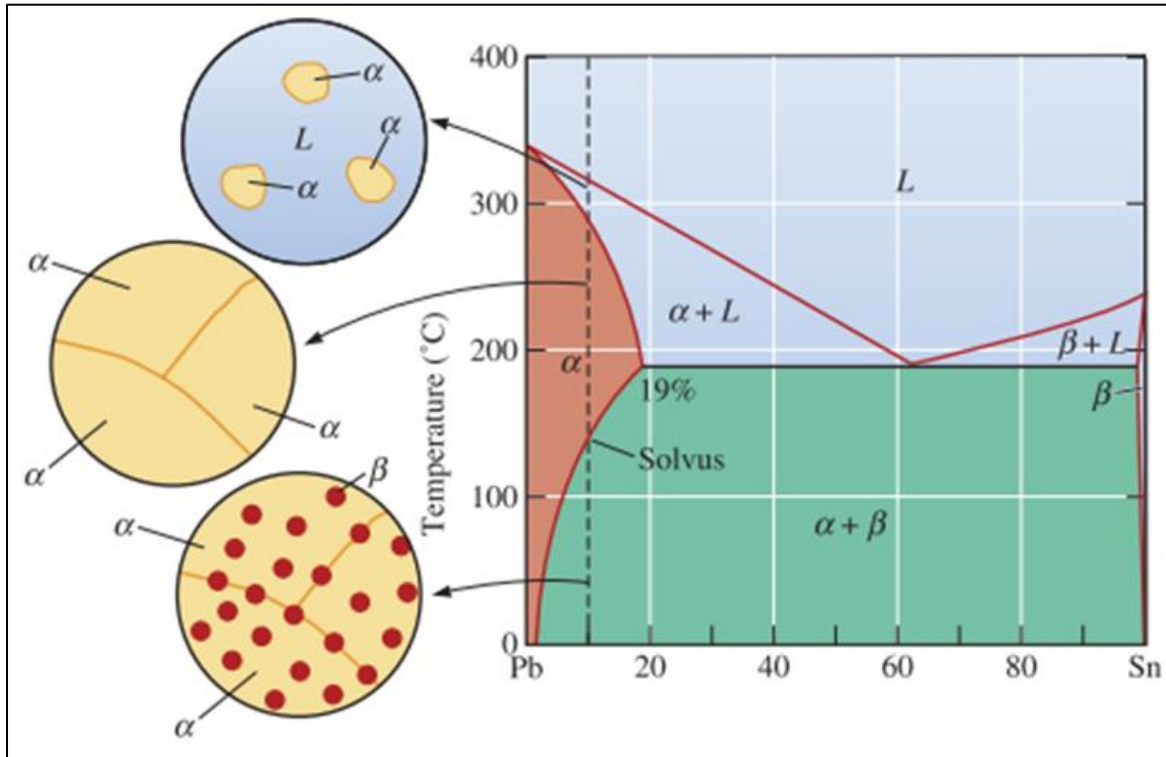


Figura 13. Microestructuras características de las regiones de un diagrama de fases eutéctico binario con solubilidad parcial.

Fuente: (Askeland, 2010)

2.6 Microestructura

Los metales, el estado en el que se encuentran es cristalino, formado por pequeños cristales, cada uno con una estructura atómica, que pueden ser observados en un tamaño microscópico por esto toma el nombre de microestructura, que se caracterizan por el número de fases que posee cada material siendo las aleaciones las que dependen de las sustancias aleantes que las conforman. (UCA, 2003)

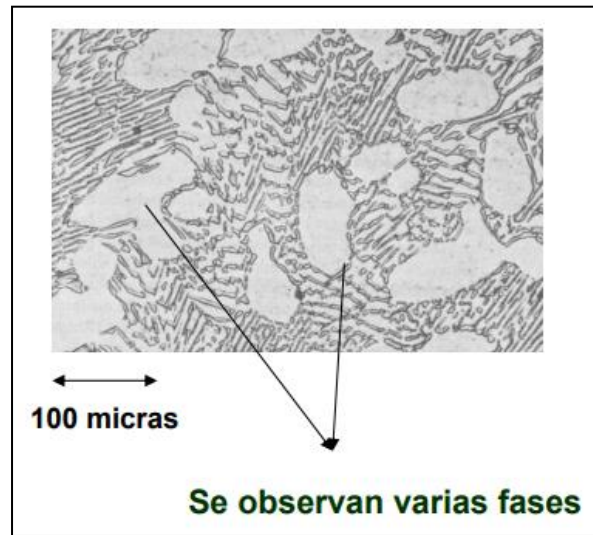


Figura 14: Microestructura de un material
Fuente: (Universidad de Valladolid, 2003)

2.6.1 Evolución de la microestructura durante el enfriamiento

Es posible hacer un seguimiento de la evolución de la microestructura de un diagrama de fase. El desarrollo de la estructura comienza con la formación de granos en la pared del molde que es donde se forma la zona de enfriamiento; se produce una zona de crecimiento columnar la cual disminuye a granos más pequeños en el núcleo.

2.7 Propiedades mecánicas

2.7.1 Ensayo de tensión

El ensayo de tensión o de compresión consiste en someter con una carga mono axial gradualmente creciente, a una probeta preparada según normas establecidas.

Cuando se realizan debidamente en probetas adecuadas, estos ensayos pueden brindar información de las propiedades mecánicas fundamentales, con el diseño como finalidad, sin

embargo, es necesario valerse de otros ensayos para conocer de manera real el comportamiento del material.

La norma *ASTM E 8* detalla las dimensiones de las probetas para su ensayo, las cuales se pueden encontrar en el ANEXO A.

2.7.2 Ensayo Charpy

La mecánica de impacto involucra a los esfuerzos inducidos y considera también la transferencia de energía y la absorción y disipación de esa energía. La propiedad de un material en relación con el trabajo requerido para causar la ruptura ha sido designada como tenacidad, la cual depende fundamentalmente de la resistencia y la ductilidad.

La norma *ASTM E 23* detalla las dimensiones de las probetas para su ensayo, las cuales se pueden encontrar en el ANEXO B. Se recomienda realizar el ensayo Charpy a bajas temperaturas, tal como define la norma, (probeta a -40 °F)

2.7.3 Ensayo de dureza

La dureza se describe como la propiedad de un material a ser penetrado, de aquí la naturaleza de su ensayo (ensayo Rockwell), el cual consiste en oprimir una bola o un cono de diamante bajo una carga estática e indentarla en el material ensayado.

Se debe calibrar el aparato de dureza Rockwell antes de usarlo y aplicar la precarga y carga según lo recomendado por la norma.

La norma *ASTM E 18* detalla el procedimiento para realizar el ensayo de dureza Rockwell.

CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA

3.1 Metodología de trabajo

La metodología de trabajo para realizar los procedimientos de fundición, análisis de las propiedades mecánicas y microestructura, se realizaron en los laboratorios de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE. Además del análisis de la composición química las aleaciones y la simulación de solidificación. Se describe de la siguiente manera:

Tabla 5

Etapas de la metodología de trabajo

ETAPAS	PROCESO	DESCRIPCIÓN
ETAPA 1	Verificación y mantenimiento de equipos	Mantenimiento de equipos para la fundición
ETAPA 2	Elaboración de lingotes de latón y aluminio	Obtención de las aleaciones
ETAPA 3	Preparación de moldes de fundición	Molde permanente, cáscara, arena, centrifugado
ETAPA 4	Fundición del aluminio y cobre	Fundición del aluminio y el cobre por medio de los cuatro procesos
ETAPA 5	Maquinado de probetas para ensayos	Preparación de probetas según normativa ASTM
ETAPA 6	Análisis de microestructura	Lijado, pulido de probetas y análisis de microestructura
ETAPA 7	Ensayo Charpy, tensión y microdureza	Obtención de propiedades mecánicas
ETAPA 8	Análisis químico	Determinación de los componentes de cada aleación
ETAPA 9	Análisis de solidificación	Análisis de velocidad de enfriamiento y solidificación

3.1.1 Etapa 1: Verificación y mantenimiento de equipos

Previamente al proceso de fundición se verifico los equipos, sobre su estado de funcionamiento donde se realizó diferentes trabajos como:

Tabla 6

Mantenimientos realizados en máquinas

MÁQUINA	ESTADO	MANTENIMIENTO
Horno	Operable	Revisión de la entrada de aire del quemador. Reparación de fisuras en el horno. Limpieza externa e interna del horno.
		
Polygram	Operable	Revisión de las resistencias. Limpieza y cambio de placas
		
Centrifuga	Inopeable	Cambio de mangueras neumáticas. Limpieza del pistón. Mantenimiento del tomacorriente de 220V.
		

3.1.2 Etapa 2: Elaboración de lingotes de latón y aluminio

El material que sirvió de estudio en esta investigación fue adquirido mediante la fundición de chatarra tanto de aluminio como de cobre (latón). La fundición de los lingotes se realizó en la empresa FUNDIALEACIONES, obteniendo como materia prima para el estudio lingotes de 800 y 1200 gramos, de aluminio y latón, respectivamente. La composición de estas aleaciones se detalla más adelante en el análisis químico realizado a las mismas.



Figura 15: Lingotes de aleación obtenida
Fuente: (Fundialeaciones, 2018)

3.1.3 Etapa 3: Preparación de los moldes de fundición

3.1.3.1 Elaboración del molde de cáscara

Para la realización de la fundición mediante este proceso, se realizó los moldes de cáscara, que deben ser complementarios entre sí para la obtención de la pieza requerida.

*a)**b)*

Figura 16: a) Moldes de cáscara, b) Moldes listos para la fundición.

Proceso de moldeo de cáscara:

Se fabricó un modelo de acero adaptado a la máquina Polygram, detallado en la figura 17; la cual tiene la forma base de 12x12x200 (mm) (ANEXO I), para la obtención de las probetas para ensayos que serán maquinadas. Se realiza la mezcla de arena de sílice con el 10% en peso de resina fenólica (AkzoNobel 6500 – ANEXO C), la cual será depositada en la caja de volteo de la máquina Polygram. El modelo de acero se lubrica con cera de carnouva para su fácil extracción y se precalienta hasta una temperatura de 180°C aproximadamente. Manualmente se voltea el molde a 180 grados, siguiente a esto se gira la caja completa, para que la arena cubra en su totalidad al molde durante 3 minutos para asegurar su adherencia y un grosor de la cáscara adecuado. Se retorna el molde a su posición inicial y se lo calienta durante 10 minutos a 300° para que se produzca el endurecimiento cáscara. Se extrae la cáscara y se repite el proceso para la segunda cáscara.



Figura 17: Molde de acero fabricado para maquina Polygram, proceso de fundición en cáscara.

3.1.3.2 Elaboración del molde para fundición centrífuga

Partimos de la obtención de discos formados a partir de una mezcla de caucho y silicona de alta resistencia a la temperatura, estos discos fueron importados de España; ya que en el mercado ecuatoriano no se los encuentra. Estos discos son maquinados para la obtención de la pieza a ser fabricada con dimensiones 14x14x158 [mm] (ANEXO I), mostrados en la figura 18:



Figura 18: Discos de silicona para proceso de fundición centrífuga.

3.1.3.3 Elaboración del molde permanente

Para la investigación se utilizó un molde de acero, el mismo que se detalla en la figura 19. El molde consta de 3 cavidades por las cuales puede ingresar el material fundido, estas sirven también como conductos de escape de gases.

El molde consta de un mecanismo de tornillo sin fin para la apertura y cierre.



Figura 19: Molde permanente de acero.

3.1.3.4 Elaboración del molde de arena

La arena de moldeo está compuesta por arena y arcilla (bentonita), esta arcilla es el aglutinante y proporciona la cohesión que la mezcla necesita; mientras que la arena, en mayor proporción, contribuye a la resistencia necesaria para evitar desmoronamientos y mantener las formas requeridas del molde.

En primer lugar se debe tamizar la arena, para garantizar una uniformidad y evitar grumos en la mezcla, siguiente a esto y con la ayuda de una caja de madera con las dimensiones

adecuadas para las probetas obtenidas, se fabrica el molde a partir de un modelo de probeta comparable con el proceso de molde permanente de 50x50 mm.

Es necesario e indispensable el uso de conductos para el escape de gases, y evitar así defectos tales como una alta porosidad en el material. La figura 20 muestra la disposición del molde y el modelo, en donde se aprecian los respiraderos.



Figura 20: Molde de arena para fundición, con respiraderos.

3.1.4 Etapa 4: Fundición del aluminio y cobre

3.1.4.1 Fundición del aluminio

Con la obtención de los lingotes de aleación de aluminio se procede a realizar la fundición en el horno de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE.

Se depositan 21 Kg de aleación de aluminio en forma de lingotes dentro del crisol, siguiente se enciende el horno el cual elevará la temperatura del crisol hasta llegar al punto de fusión del aluminio. Para este proceso se llevó un control de temperatura a través de una termocupla tipo K.

Alcanzada la temperatura de fusión, y en un tiempo de aproximadamente 90 minutos, se vertió sal con el objetivo de agrupar la escoria y extraerla para obtener un material fundido libre de impurezas.

Es necesario alcanzar una temperatura mayor a la de fusión ($660\text{ }^{\circ}\text{C}$) antes de colar, se recomienda entre $50 - 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ por sobre la temperatura de fusión para asegurar la fluidez del material. Se vierte en los cuatro moldes antes preparados como se describe a continuación:

Colado en molde permanente:

El molde se lubrica y precalienta a 200°C , con el objetivo de evitar un choque térmico entre el material fundido y el molde. Se cola el material dentro de las cavidades del molde y por motivos de nuestra investigación se lo dejó enfriar a temperatura ambiente sin retirar la pieza del molde, llevando un control de la temperatura desde el ingreso de la colada hasta la solidificación.



Figura 21: Obtención de la pieza fundida (Molde permanente)

Colado en molde de fundición centrifugada

Se ubican los discos dentro de la máquina centrífuga los cuales son aprisionados a través de aire comprimido. Siguiendo se enciende el motor que hace girar los discos a una velocidad de 733 rpm, calculado con la ecuación de velocidad rotacional (UMSS, s.f.). el efecto centrífugo para el ingreso de la colada a 850°C, como se muestra en la ecuación a continuación:

$$N = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{2g * GF}{D}} \quad (\text{UMSS, s.f.}).$$

Donde:

g: gravedad [m/s²]

GF: Factor G, relación entre la fuerza centrífuga a la que está sometido el material. (GF=15, para fundición centrifugada)

D: diámetro [m]

N: Velocidad rotacional [rpm]

$$N = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{2(9.81) * (15)}{0.05}}$$

$$N = 732.6 \text{ rpm}$$

Se vierte el material fundido por la boca superior controlando no sobrepasar el volumen de la cavidad del disco. El disco se mantiene girando hasta que el aluminio solidifique y enfríe, aproximadamente en un tiempo de 5 minutos.



Figura 22: Obtención de la pieza fundida (Centrifugado)

Colado en molde de arena

Con el molde de arena preparado se procede a verter el material por la cavidad de ingreso y se lo deja enfriar hasta que solidifique.



Figura 23: Obtención de pieza fundida (Molde de arena)

Colado en molde de cascara

Se juntan las dos cascara de forma tal que se generen la cavidad de la pieza a ser fundida. Para tener una mayor fijación se recomienda enterrar sobre la mitad del molde dentro de arena y se fija con pinzas o prensas en sus extremos superiores para asegurar aún más la fijación como se muestra en la figura 16b.

Una vez fijado el molde se vierte la colada, se lo deja enfriar hasta su solidificación y se rompe la cascara para la obtención de la pieza.



Figura 24: Obtención de la pieza fundida (Molde de cáscara)

3.1.4.2 Fundición del latón

Debido a la falta de un crisol para la fundición de cobre dentro de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, se optó por realizar la práctica en la empresa privada “FUNDIALEACIONES”, la cual facilitó un horno de fundición de cobre.

Se depositan 20Kg de latón dentro del crisol, a continuación se enciende el horno que elevará la temperatura del crisol alcanzando el punto de fusión del latón. En un tiempo

aproximado de 180 minutos, se alcanzó una temperatura de 1150°C, se coloca una botella de vidrio la cual se encarga de agrupar la escoria que posteriormente se extrae obteniendo un material fundido libre de impurezas.

Al igual que con el aluminio es necesario alcanzar una temperatura mayor a la de fusión de 950°C antes de colar, para asegurar la fluidez del material. De igual manera se realiza el colado para tres procesos: molde de arena, molde permanente y molde en cascara; ya que el proceso por centrifugado no se realiza en dicha empresa.

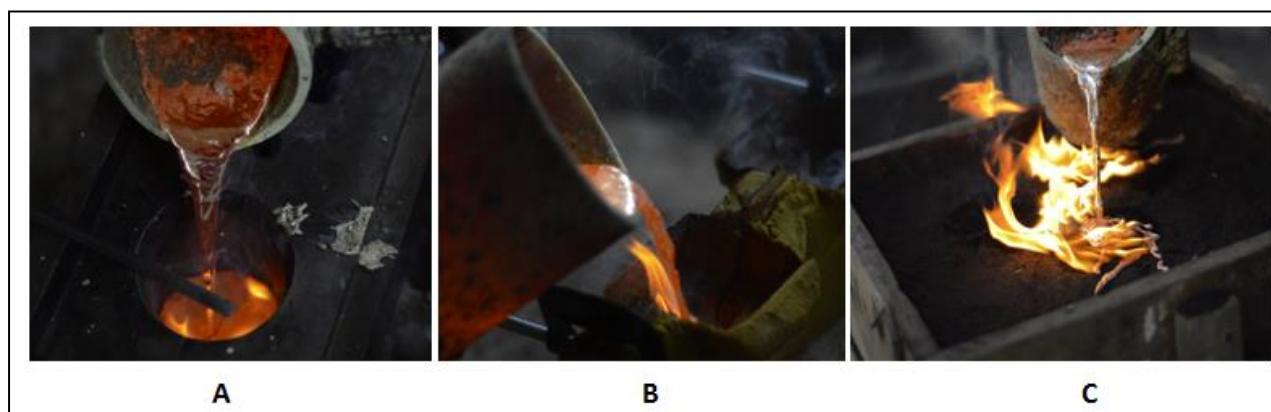


Figura 25: Colado del latón; A) Molde permanente, B) Molde de cáscara, C) Molde de arena.

3.1.5 Etapa 5: Extracción y Maquinado de probetas para ensayos

Extracción de probetas para ensayos

Según la norma B557M para fundiciones en donde el espesor supera los 40 mm, se debe tomar el centro de la fundición para extraer las probetas mediante maquinado, como se observa en la figura 26. Además, las probetas tienen que tener un acabado superficial de 1.6 μm RMS como mínimo.

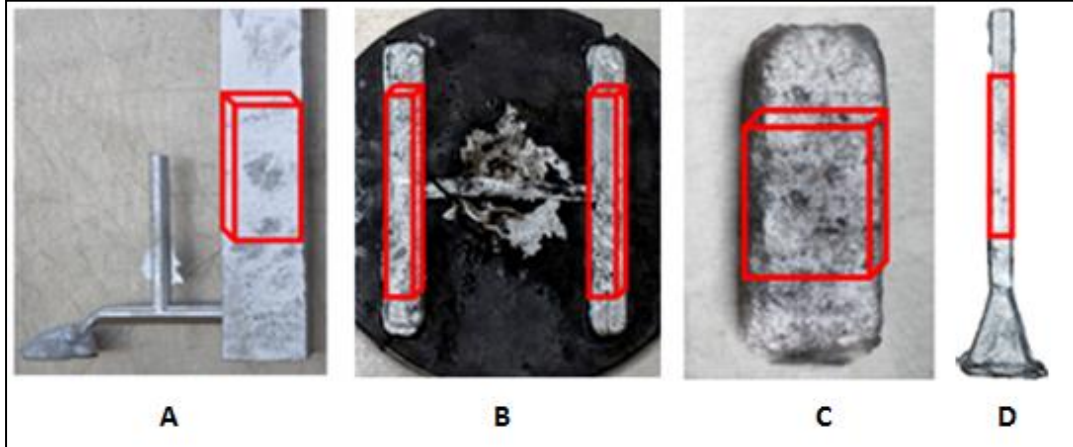


Figura 26: Lugar de extracción de probetas para ensayos destructivos. A) Molde permanente, B) Centrifugado, C) Molde de arena, y D) Molde de cáscara.

Maquinado de probetas para ensayos

El maquinado de probetas partió de las piezas fabricadas en la fundición como se muestra en la figura 26 a través de los diferentes procesos como fresado, torneado, y corte. Se obtuvo las diferentes probetas tanto para los ensayos de tracción, impacto (Charpy), microdureza y análisis de micrografía, según las normas ASTM como se muestran en la figura 27, que se detallan en el ANEXO A y ANEXO B.

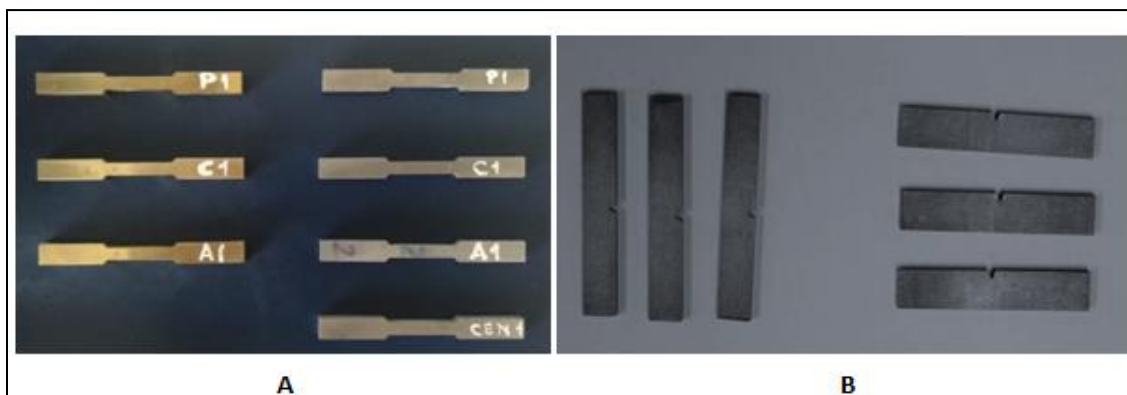


Figura 27: Probetas maquinadas para ensayos de: A) Tensión y B) Charpy.

3.1.6 Etapa 6: Análisis de microestructura

Para hacer un estudio de la microestructura de los materiales, fue necesario llevar a cabo un proceso de lijado y pulido para limpiar la superficie. En el proceso de lijado es necesario usar lijas No 80, 150, 320, 600, 1000, 1200, 1500; posterior a esto se pulen las superficies con la ayuda de un paño y pasta de diamante (especificaciones en el ANEXO E) para obtener mejores resultados. La figura 28 muestra tal procedimiento.



Figura 28: Maquinas utilizadas para preparación de probetas, lijado y pulido respectivamente.

Con la superficie pulida se realiza el ataque químico, se usó una solución para el aluminio y otra para el latón, la Tabla 7 detalla el uso de los reactivos determinados por la norma ASTM 407.

Tabla 7*Tabla de reactivos utilizados para el ataque químico*

METAL	REACTIVO	REACTIVO	PROCEDIMIENTO
Aleación Aluminio	# 3	2 mL HF	Sumergir 10 - 20 s. Lavar en una corriente de agua tibia. Revela la estructura general
		3 mL HCl	
		5 mL HNO ₃	
		190 mL H ₂ O	
Aleación Cobre	#40	5 g FeCl ₃	Sumerja o frote unos segundos hasta obtener los resultados deseados
		15 mL HCL	
		60 mL ethanol (95%) o methanol (95%)	

Fuente: (ASM International, 1998)

Una vez realizado el ataque químico se procede a la toma de fotografías a diferentes ampliaciones: 50x, 100x, 200x, 500x, con el microscopio de marca MEIJI TECHNO.

**Figura 29:** Microscopio MEIJI TECHNO

3.1.7 Etapa 7: Ensayo Charpy, tensión y microdureza

3.1.7.1 Ensayo de tensión

Consiste en someter con una carga mono axial que aumenta gradualmente, con el objetivo de obtener las propiedades mecánicas del material tales como esfuerzo de fluencia, esfuerzo ultimo a la tracción, módulo de elasticidad y porcentaje de elongación del material.

El procedimiento para el ensayo se realizó en la máquina universal MTS TK/T5002 ubicada en el laboratorio de Mecánica de Materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas, ésta máquina trabaja como prensa hidráulica, se sujeta la probeta mediante mordazas, posterior a esto se aplica una carga que genera el estiramiento del material hasta su rotura.



Figura 30: Máquina de ensayos universales MTS TK/T5002 - ensayo de tensión



Figura 31: Probetas realizadas el ensayo de tensión.

3.1.7.2 Ensayo de impacto Charpy

A través del ensayo Charpy se puede conocer el comportamiento de un material frente a un impacto, generando fracturas o deformaciones que dan muestra de si un material es dúctil o frágil. La resistencia al choque es una medida que muestra la tenacidad del material, es decir, la capacidad de absorber energía.

Para la realización del ensayo partimos por sumergir las probetas en una solución con alcohol industrial y hielo seco, con el propósito de enfriar las probetas hasta alcanzar la temperatura de $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$; se deja sumergida la probeta por 5 minutos, controlando su temperatura. Siguiendo se extrae de la solución y se coloca de tal manera que la muesca esté opuesta al golpe del péndulo, como se muestra en la figura 32.

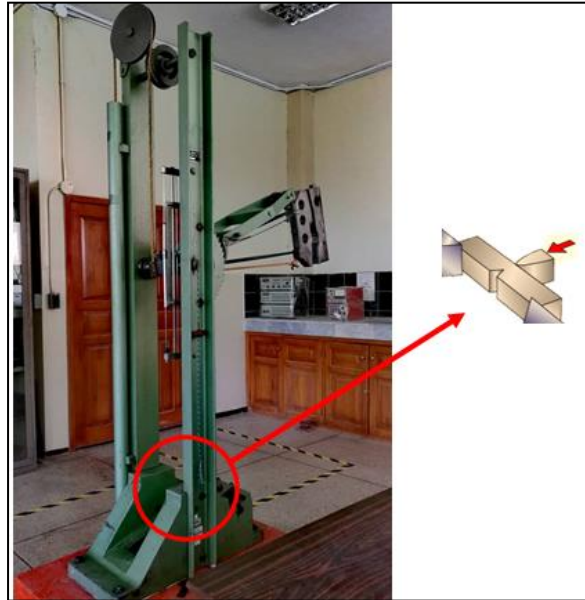


Figura 32: Máquina de ensayo Charpy MTS CK500, detalla la posición de la muesca opuesta al péndulo

Luego se eleva la carga de masa M hasta su soporte encerrando los mecanismos para que los datos sean los más acertados. Siguiendo se suelta la carga que impacta la probeta, en nuestro caso fracturándose esto arroja datos de energía (Kg.m) absorbida en el impacto.



Figura 33: Probetas realizadas ensayo Charpy

3.1.7.3 Ensayo de microdureza:

Este ensayo determina la resistencia de un material a ser rayado o penetrado, el cual consiste en aplicar una carga mediante un cono o una esfera de diamante sobre una superficie totalmente plana durante un tiempo determinado según la escala requerida.

Para este proceso utilizamos el equipo de microdureza DUROLINE' - M ubicada en el Laboratorio de Ciencia de los Materiales en la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE. Como parámetros iniciales en el equipo utilizamos una fuerza de 300 gf debido a que las aleaciones son materiales suaves, la cual será aplicada a través de una pirámide rectangular de diamante en un tiempo de 10 seg sobre la superficie plana de nuestra probeta, esto generará una indentación sobre la superficie la cual a través del microscopio del equipo mediremos para obtener los valores de la dureza en escala Vickers y Brinell, siendo las escalas recomendadas para la medición de dureza en fundiciones.

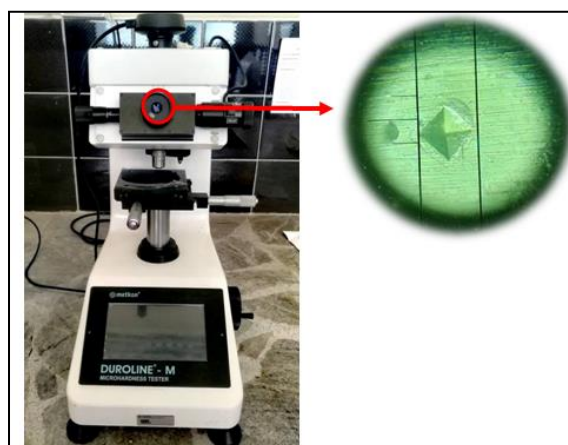


Figura 34: Máquina de Microdureza DUROLINE' - M, detalle de vista de la indentación generada sobre la superficie de la probeta.

3.1.8 Etapa 8: Análisis químico

En este análisis determinamos los porcentajes, de los diferentes metales que contienen nuestras aleaciones de aluminio y de cobre. Este proceso se lleva a cabo en un Espectrómetro de chispa marca Bruker, que consiste en generar una chispa a través de dos electrodos, produciendo un plasma de vapor en el cátodo a una temperatura de 100000 K, permitiendo determinar los

componentes de la aleación. Este proceso se lo llevo a cabo en la Universidad Politécnica Nacional.



Figura 35: Espectrómetro de chispa BRUKER

3.1.9 Etapa 9: Simulación de solidificación

Se realizó una simulación de la solidificación, de la fundición del aluminio por molde permanente, en un software libre para estudiantes, por el método de elementos finitos en el cual se consideró sus condiciones de frontera para acercarlo a la realidad y comparar con los datos experimentales obtenidos durante la fundición. De esta manera se busca un mejor entendimiento en el proceso de solidificación. Más adelante se detallara en el Capítulo IV.

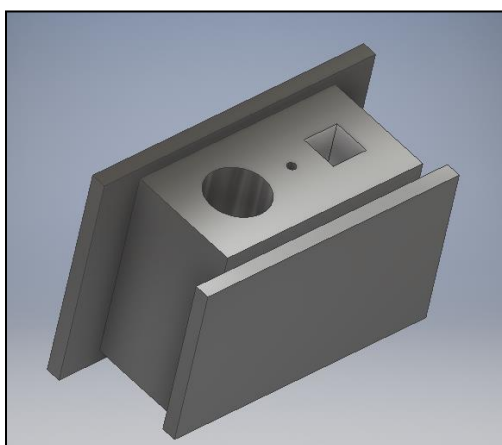


Figura 36: Modelo para simulación de solidificación en molde permanente

CAPÍTULO IV

4 SOLIDIFICACIÓN Y SIMULACIÓN

4.1 Introducción

Se realizó una simulación de solidificación en una fundición por molde permanente de la aleación de Aluminio. El software utilizado en este proceso de simulación permite analizar flujos bidimensionales y tridimensionales (en este estudio se realizó un análisis bidimensional), que se producen a lo largo de todo el proceso desde el momento de colado hasta su solidificación total, permitiendo analizar el fenómeno de solidificación, la temperatura y densidad del aluminio dentro del molde permanente, a través de un método de elementos finitos. Este software consta con un proceso de mallado automático, pero a su vez se puede aumentar el número de mallado para obtener datos más acercados a la realidad.

4.2 Simulación

4.2.1 Diagrama de Simulación

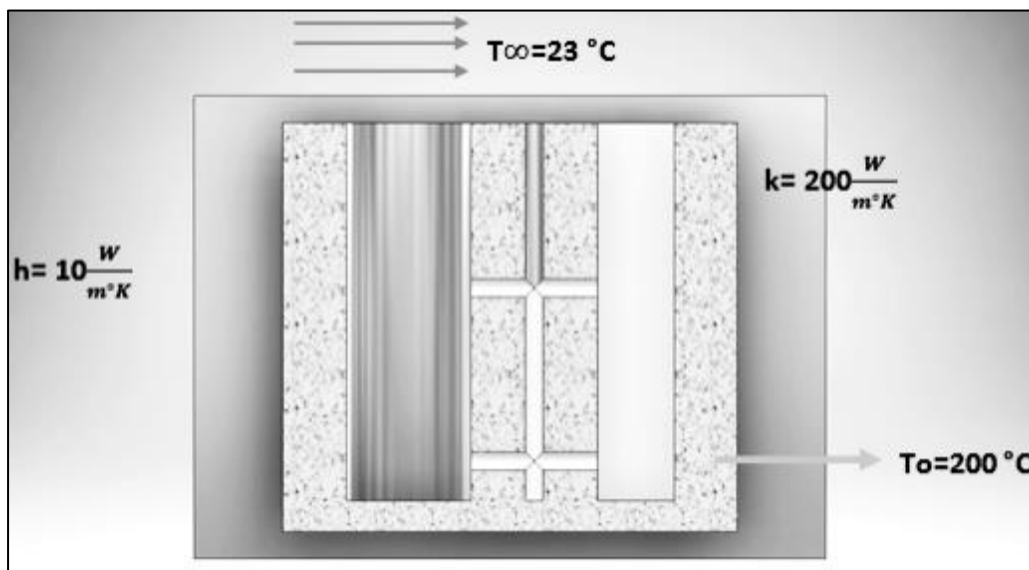


Figura 37: Diagrama de análisis con sus condiciones de frontera.

4.2.2 Parámetros de la Simulación

El método utilizado para el llenado del molde en la simulación fue VOF (Volume Of Fluid), el cual es recomendado para la solidificación (ANSYS FLUENT, 2018). La ecuación que rige la solidificación se presenta a continuación:

$$\frac{\delta}{\delta t}(\rho H) + \nabla \cdot (\rho v H) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S \quad (\text{ANSYS, 2009})$$

Dónde:

H = entalpía

ρ = densidad

v = velocidad del fluido

S = término fuente

La tabla 8 presenta las ecuaciones que gobiernan el fenómeno de solidificación de un metal, y en la tabla 9 se detallan las condiciones de frontera y condiciones de la colada, datos que son necesarios para que la simulación se acerque lo máximo a la realidad.

Tabla 8

Ecuaciones de gobierno para el método de elementos finitos

Ecuaciones de gobierno		
Densidad	$\rho = 2911 - 0.376T$	$\left[\frac{Kg}{m^3} \right]$
Viscosidad	$n = 0.987 \times 10^{-3}$	$[mPa \cdot s]$
Tensión superficial	$\gamma = 871 - 0.155(t - 660)$	$\left[\frac{mN}{m} \right]$

Tabla 9
Condiciones de frontera y condiciones de la colada

Condiciones de frontera			
Pre calentado del molde	T_o	200	[°C]
Temp. Medio Ambiente	T_∞	23	[°C]
Coefficiente de convección	H	10	$\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$
Coefficiente de conductividad	K	200	$\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$
Condiciones de la colada			
Temperatura de colada	T_c	850	[°C]
Velocidad de vertido	V_v	0.5	[m.s]

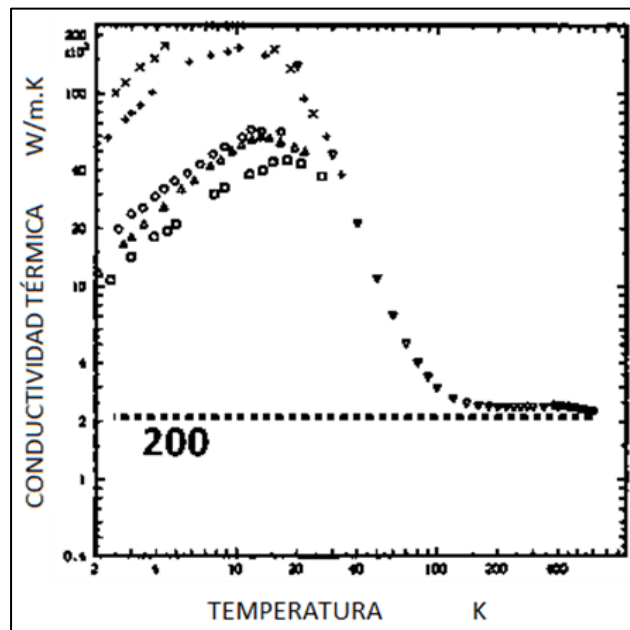


Figura 38: Gráfica Conductividad térmica vs Temperatura
 Fuente: (Hust, Lankford, 1984)

De la figura 38 (Conductividad térmica - Temperatura), obtenemos el valor del coeficiente de conductividad debido a que la curva converge en $200 \frac{W}{m \cdot K}$.

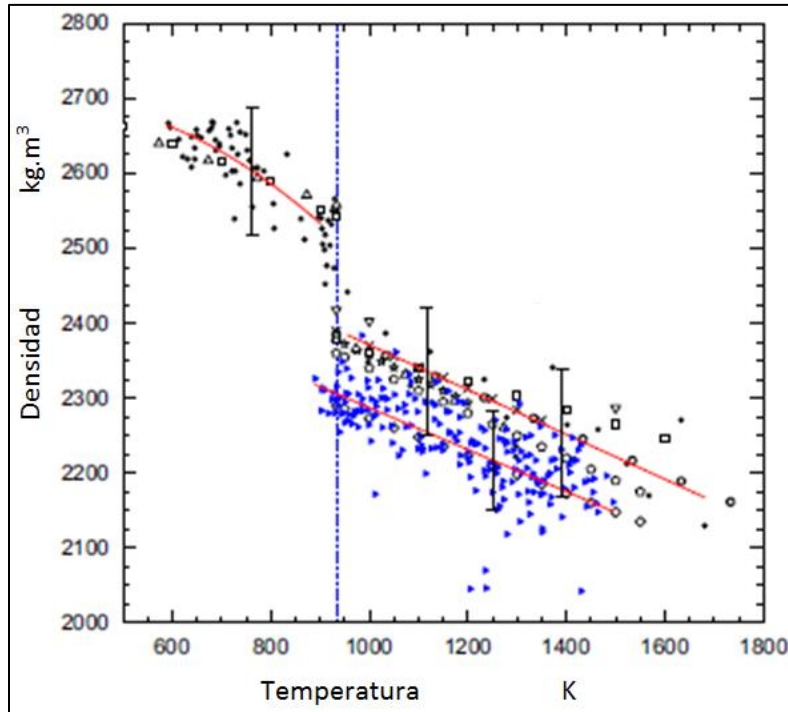


Figura 39: Gráfica Densidad vs Temperatura
Fuente: (Leitner, Schmon, Azir, 2015)

De la figura 39 se obtiene la ecuación que gobierna el parámetro de densidad, para la cual nuestra temperatura fue de 1123 K, obteniendo la ecuación:

$$\rho = 2911 - 0.376T \left[\frac{Kg}{m^3} \right] \quad (\text{Leitner, Schmon, Azir, 2015})$$

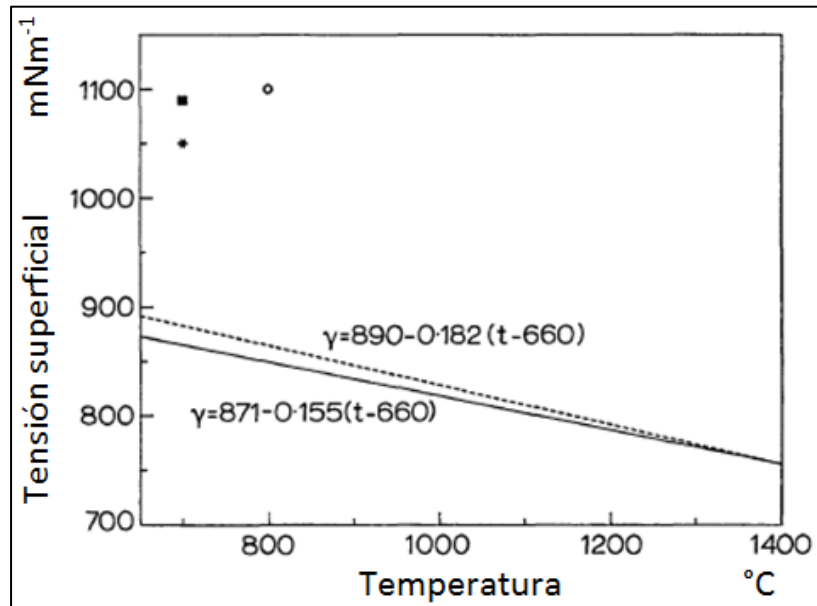


Figura 40: Gráfica Tensión Superficial vs Temperatura
Fuente: (Keene,1993)

Para encontrar el valor de la tensión superficial trabajamos con nuestra temperatura de 850°C y la remplazamos en la ecuación de la gráfica obteniendo lo siguiente:

$$\gamma = 871 - 0.155(t - 660)$$

$$\gamma = 871 - 0.155(850 - 660)$$

$$\gamma = 841.55 \left[\frac{mN}{m} \right]$$

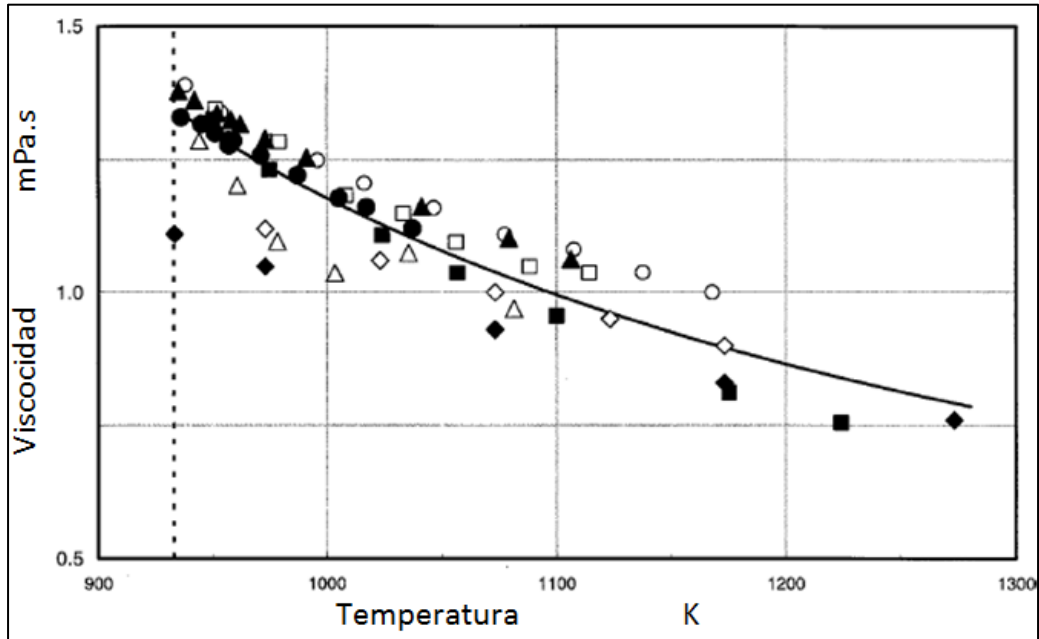


Figura 41: Gráfica Viscosidad vs Temperatura
 Fuente: (Assael, Banish, Egry, Mills, 2005)

De la gráfica obtenemos un valor aproximado de la viscosidad, tomando como dato nuestra temperatura de 1123 K donde obtendremos un valor de viscosidad de

$$n = 0.987 \times 10^{-3} \text{ [mPa.s]}$$

4.2.3 Análisis de convergencia y mallado

Mediante el software generamos un mallado, donde la distancia entre cada nodo será de 2.5mm, se presenta el mallado en la figura 42.

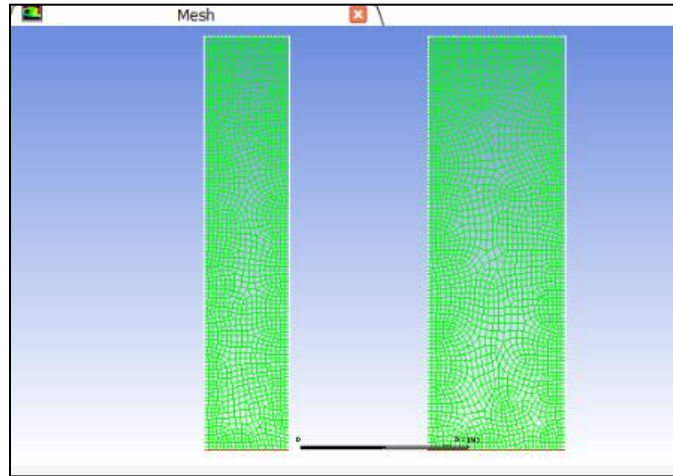


Figura 42: Generación de mallas (Mesh) para el molde de análisis

Antes de estudiar el fenómeno de solidificación de la fundición por molde permanente del aluminio, es importante garantizar la convergencia, en el método de elementos finitos (MEF). Se dice que es convergente al tener una tendencia, aumentando el número de elementos y por tanto el número de nodo, permitiendo obtener el tamaño de malla óptimo para reducir la variabilidad de los resultados. Realizado el análisis de convergencia, se ha llegado a un número de iteraciones de 7000 (figura 43), minimizando los errores obteniendo una simulación más real.

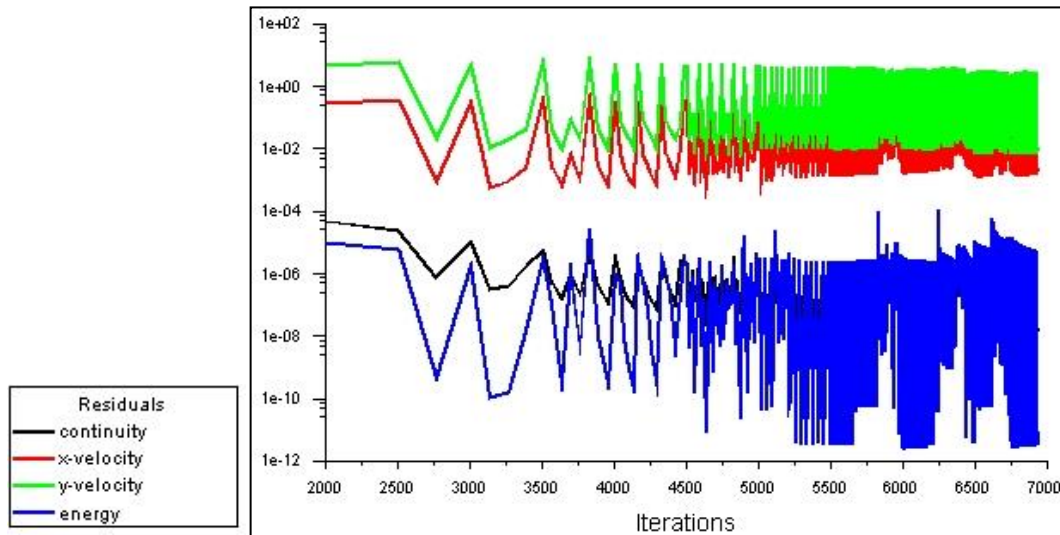


Figura 43: Convergencia de simulación

4.2.4 Colado del aluminio fundido

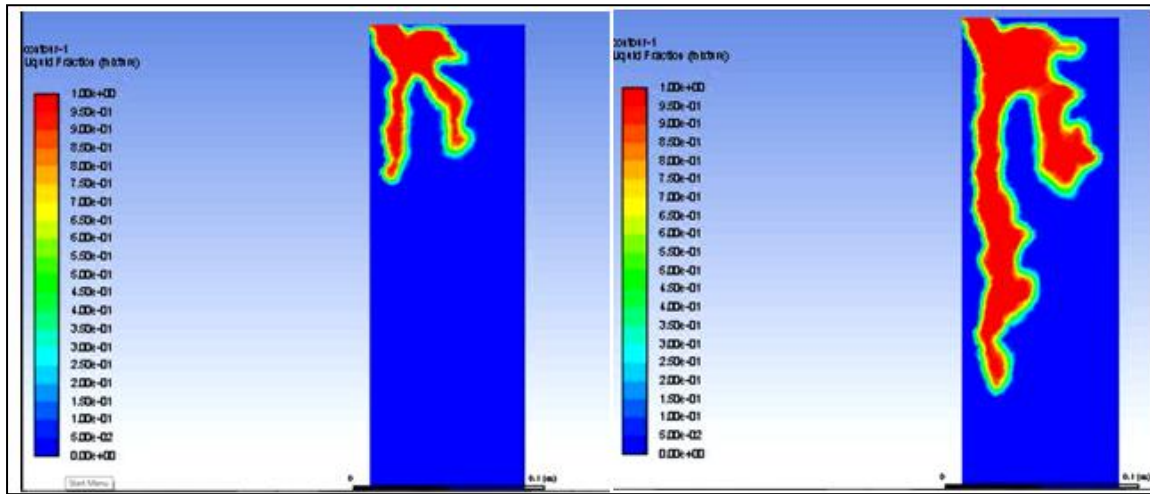


Figura 44: Simulación de colado etapa 1 y 2, respectivamente.

En la simulación presentada, se puede observar el ingreso de la colada de aluminio por la cavidad del molde permanente, donde la temperatura de ingreso es 1125K siendo mayor a la del molde que se encuentra a 473K. En la escala se muestra que el color rojo indica el llenado del molde en una fracción de volumen de 1 (100% de llenado).

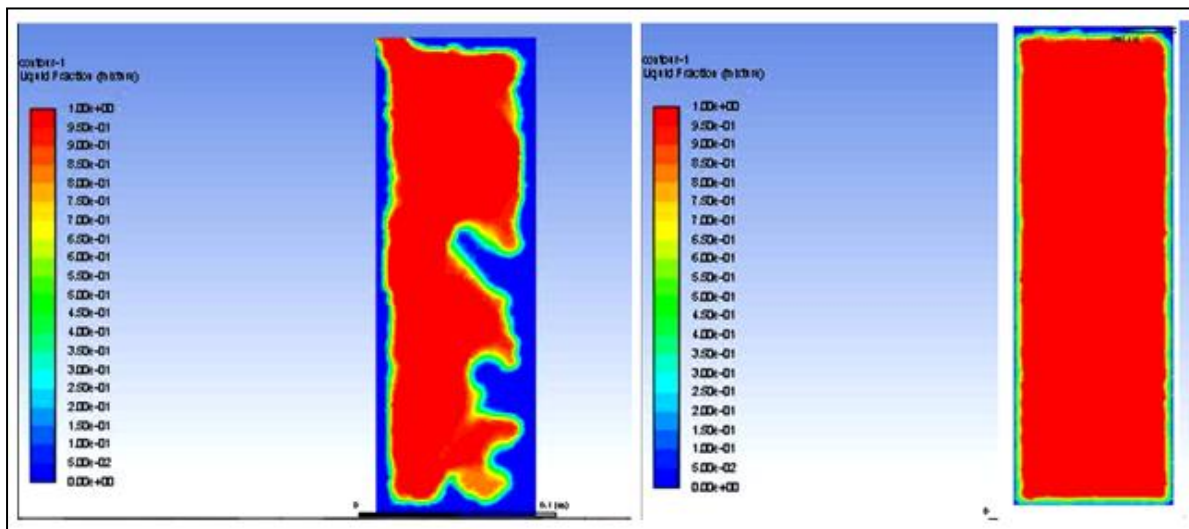


Figura 45: Simulación de colado etapa 3 y 4, respectivamente.

Se observa que el aluminio fundido ocupa en su totalidad la cavidad del molde permanente donde se analizara posteriormente el proceso de la variación de temperatura en el interior del molde.

4.2.5 Análisis de temperatura en el interior del molde

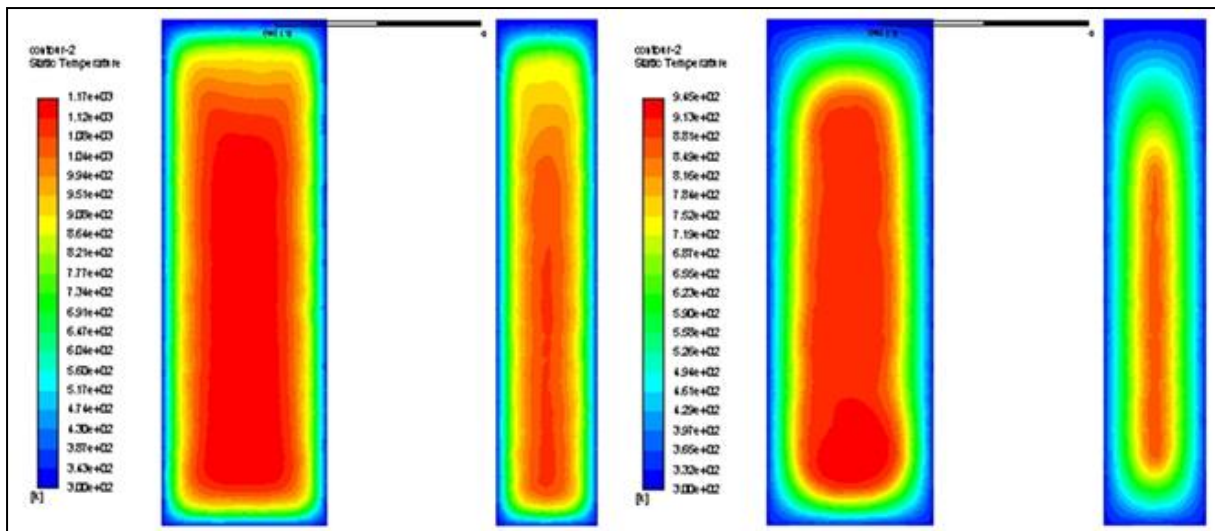


Figura 46: Análisis de temperatura etapa 1 y 2, respectivamente.

En cuanto a la simulación de temperatura en el interior, inicialmente se muestra en la figura 46 que las paredes del molde se encuentran en la escala azul, temperatura de 473 K (temperatura del precalentado del molde), y la colada está a una temperatura de 1123 K.

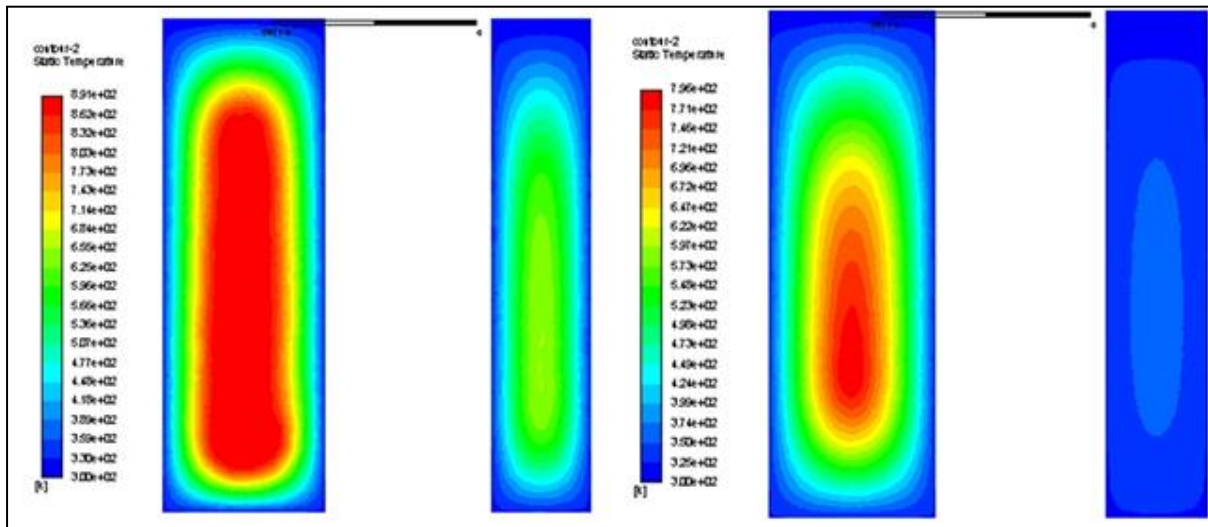


Figura 47: Análisis de temperatura etapa 3 y 4, respectivamente.

Se observa como la temperatura va decreciendo gradualmente alrededor de la pared, ya que esta, por su temperatura inicial permite una velocidad de enfriamiento mas rapida a diferencia del núcleo del molde.

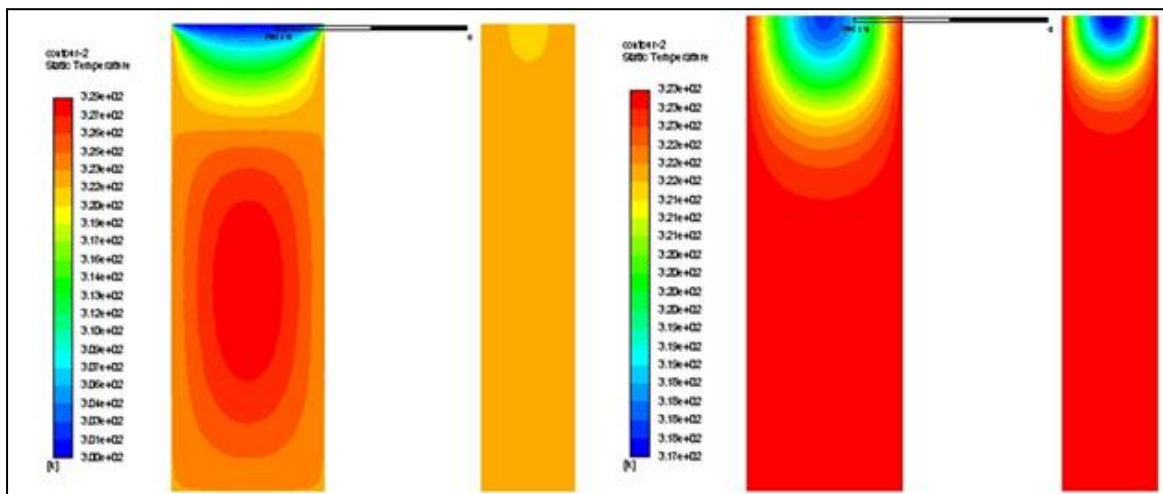


Figura 48: Análisis de temperatura etapa 5 y 6, respectivamente.

Al final de la simulación se observa que la temperatura llega a estabilizarse a 322 K, en el interior del molde y en las entradas del molde se encuentra a una temperatura menor de 317 K, debido a que se encuentra cercana a la temperatura del ambiente.

NOTA: La escala de temperaturas varia con el tiempo, para obtener valores mas detallados del proceso, razón por la cual se observa constantemente el color rojo que, sin embargo, al final del proceso se acerca a una temperatura de 317 K

4.2.6 Análisis de solidificación

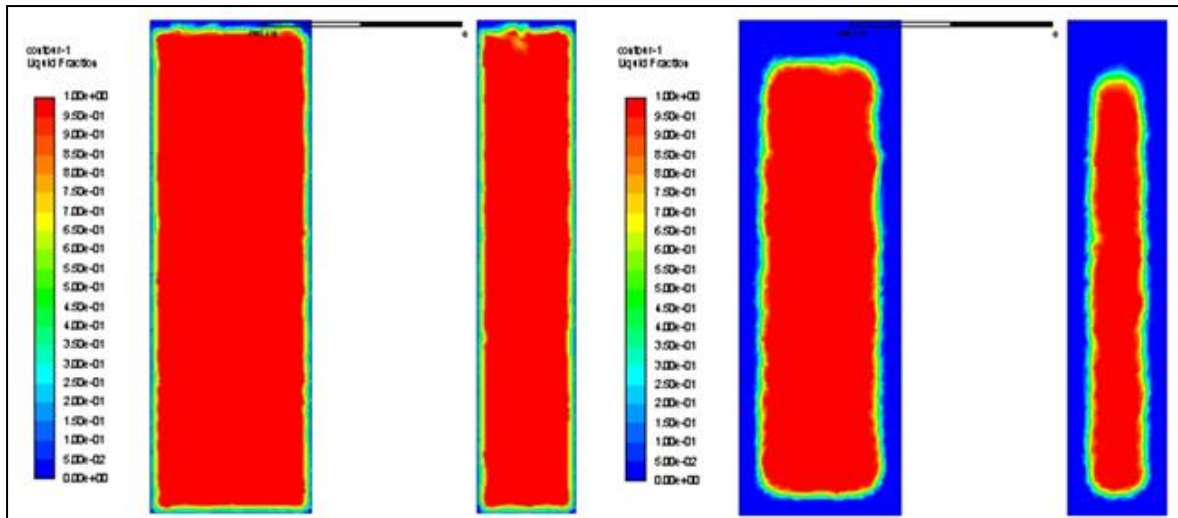


Figura 49: Análisis de solidificación etapa 1 y 2, respectivamente

Como se muestra en la figura 49 de solidificación, el material fundido se encuentra en estado líquido (color rojo), y las paredes del molde en estado sólido (color azul). La solidificación se va dando desde las paredes del molde hacia el núcleo, al igual que ocurre con el descenso de temperatura como se observa en el apartado 4.2.5 en donde el núcleo es el último en solidificar.

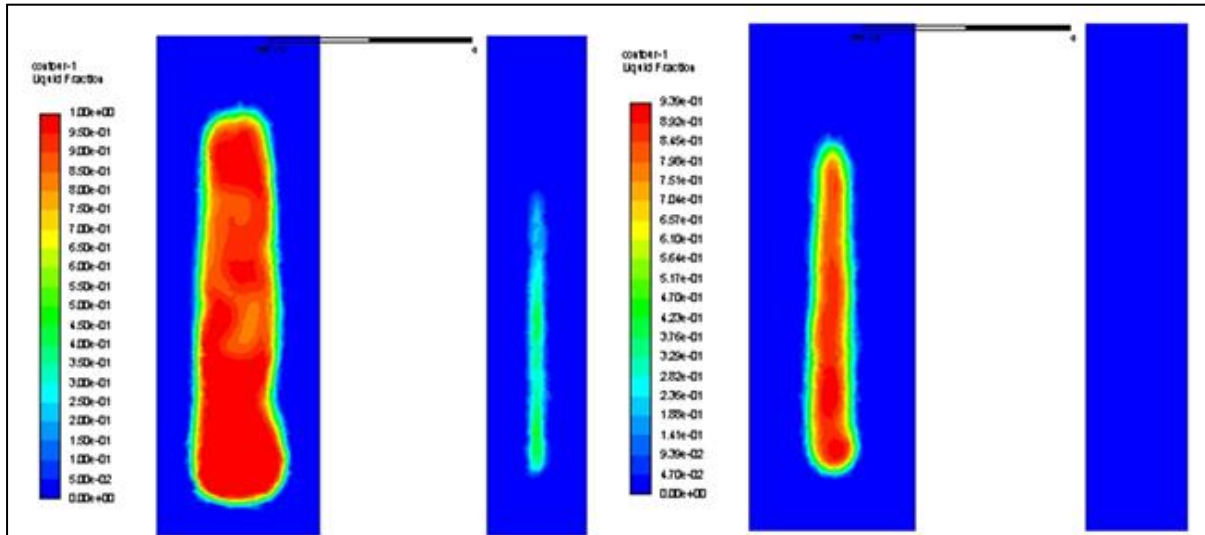


Figura 50: Análisis de solidificación etapa 3 y 4, respectivamente

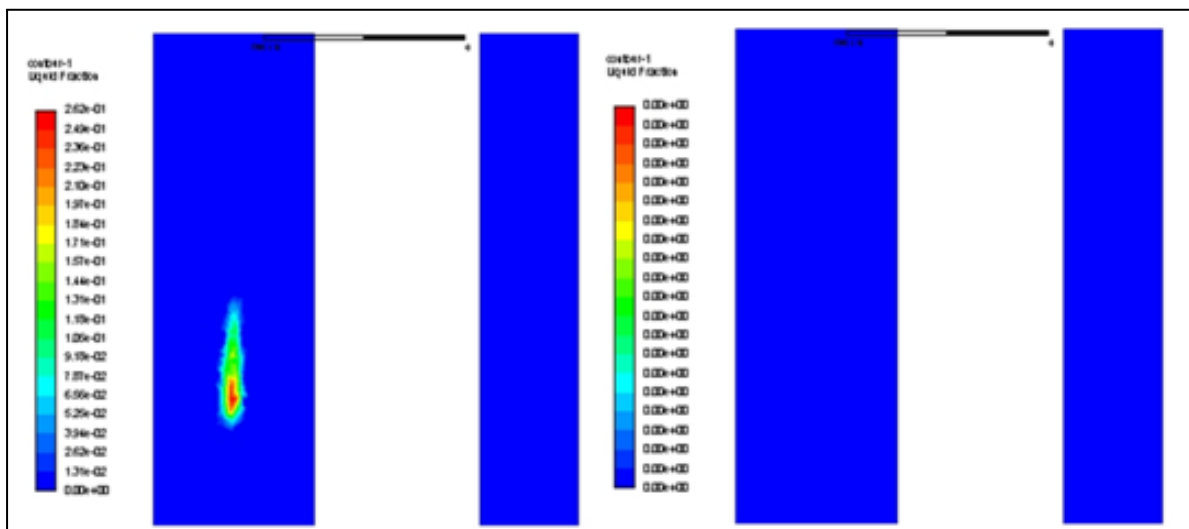


Figura 51: Análisis de solidificación etapa 5 y 6, respectivamente

A medida que transcurre el tiempo el líquido se transforma en sólido como se muestra en la figura 50 ya que empieza a disminuir su temperatura como lo visto anteriormente desde las paredes hacia el núcleo permitiendo la solidificación. Analizando las dos cavidades se pudo

observar que la de menor volumen se solidificó en menor tiempo que la cavidad más grande. Este proceso se llevó a cabo a una temperatura ambiente de 23°C.

El tiempo de solidificación en la simulación se calcula mediante la ecuación:

$$Ts = \#i * St \quad (\text{ANSYS FLUENT, 2018})$$

Dónde:

Ts: Tiempo de solidificación

#i: Número de iteraciones (5100 en la simulación punto donde empieza a converger)

St: Time step (0,1 en la simulación)

$$Ts = 5100 * 0,1$$

$$Ts = 510 \text{ segundos} = \mathbf{8.5 \text{ min}}$$

4.2.7 Análisis teórico

Analizamos el tiempo necesario desde que se vierte la colada dentro del molde hasta la solidificación del material, este tiempo depende de la geometría del volumen de la pieza que deseamos obtener, tanto como del molde en el cual es realizado en este caso un molde permanente y así también de la temperatura de fundición de la aleación de aluminio.

Todas estas variables fueron relacionada con la regla de Chvorinov que expresa lo siguiente:

$$Ts = B \left(\frac{V}{A} \right)^n \quad (\text{Askeland, 1987})$$

Dónde:

Ts: Tiempo de solidificación

B: Constante del molde (molde permanente $B = 2.5 \text{ min}/\text{cm}^2$)

V: Volumen de la pieza en cm^3

A: Área de contacto con la colada en cm^2

n: constante (usualmente $n = 2$)

Tabla 10 Variables obtenidas con las dimensiones del molde permanente

V	A	B	n
cm^3	cm^2	$\frac{\text{min}}{\text{cm}^2}$	-
1262,5	675	2,5	2

Aplicando la ecuación para nuestra pieza obtenemos el tiempo de solidificación

$$T_s = 2.5 \left(\frac{12.625}{675} \right)^2$$

$$T_s = 8.74 \text{ min}$$

4.2.8 Análisis experimental

Al realizar el colado en la fundición por molde permanente, se tomo la temperatura con la termocupla tipo K (figura 52), para obtener los datos de sólificación de la aleación Al-Si, y compararlos con los datos de temperatura entregados por la simulación como se muestra en la tabla 11.

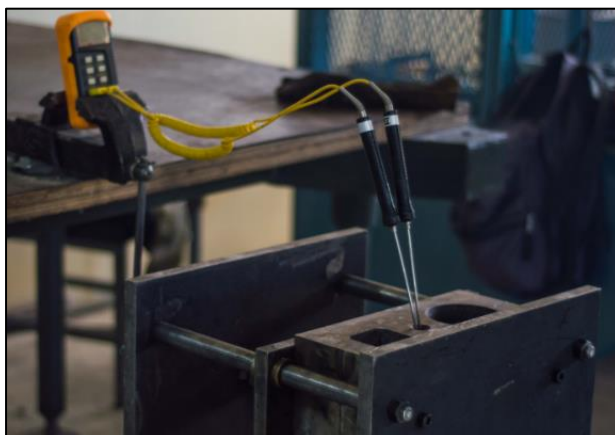


Figura 52. Configuración de la termocupla

Tabla 11

Resultados de datos, de temperaturas en la Simulación y Experimental

Simulación		Experimental	
Temp (K)	Tiempo (min)	Temp (K)	Tiempo (min)
1123	1	1123	1
1092.3	2	1109.34	2
1064.5	3	1031.92	3
951.3	4	988.87	4
947.4	5	957.87	5
942.6	6	950.32	6
938.6	7	936.65	7
936.2	8	935.17	8
931.9	9	931.62	9
929.6	10	928.4	10
893.1	11	900.12	11
818.3	12	823.13	12
728.3	13	785.12	13
668.1	14	731.34	14
612.5	15	645.92	15
562.2	16	601.22	16
495.5	17	548.07	17

Obteniendo un tiempo experimental tomado con la termocupla en 933 K (660° C)

$$T_s = 8.61 \text{ min}$$

CAPÍTULO V

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

5.1 Introducción

Este capítulo presenta los resultados obtenidos de los ensayos destructivos y análisis de microdureza, que determinarán las propiedades mecánicas de las aleaciones; así como también un estudio de composición del material mediante un análisis químico. El análisis de microestructura se llevó a cabo para identificar características estructurales tales como forma, tamaño de grano y sus fases.

Por otro lado se presentarán los resultados los cuales ayudaran en la comparación entre los cuatro diferentes procesos de fundición, determinando así sus características, diferencias y similitudes. Además de una comparativa entre los datos experimentales y una simulación mediante un software libre para el proceso de fundición por molde permanente de la aleación de aluminio.

5.2 Resultados de la experimentación del Aluminio

5.2.1 Análisis Visual

En la tabla 12 se presentan fotografías que detallan las porosidades internas y su acabado superficial.

Tabla 12
Micrografías de la aleación aluminio a 50X

CÁSCARA	PERMANENTE	ARENA	CENTRIFUGADA
AUMENTO 50X (Sin ataque)			
			

Interpretación:

A un aumento de 50X es posible apreciar de manera general las porosidades en la fundición, y la magnitud de agujas de la fase β las cuales son compuestos intermetálicos por el alto contenido de hierro. Como se aprecia, la fundición con mayor porosidad interna y en su superficie fue el proceso con molde de arena, un proceso caracterizado por su alta porosidad debido a la humedad y rugosidad de la arena, además de partículas que pudieron haberse desprendido y mezclado con la colada; siguiente fue la fundición por cáscara y la fundición centrifugada, procesos utilizados por el alto detalle que se puede alcanzar y que por lo tanto no serían aplicables con una alta porosidad. El proceso por molde permanente tiene la menor cantidad de porosidades internas, y un contenido medio de porosidad externa.

5.2.2 Micrografía del Aluminio

Para el estudio y análisis micrográfico se presenta las fotografías tomadas con el microscopio a un aumento de 100X y 500X como se presenta en la tabla 13 y tabla 14.

Tabla 13

Micrografías de la aleación de aluminio a 100X

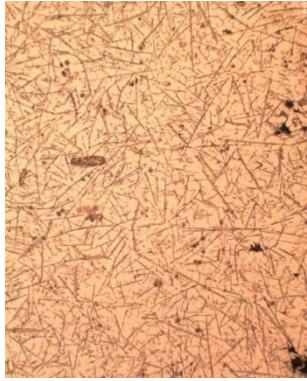

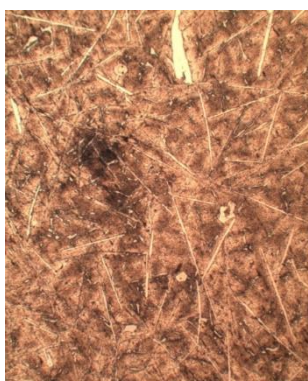

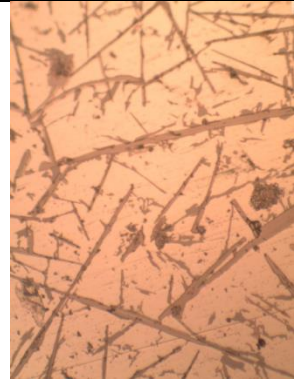
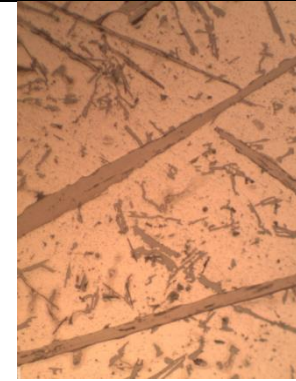
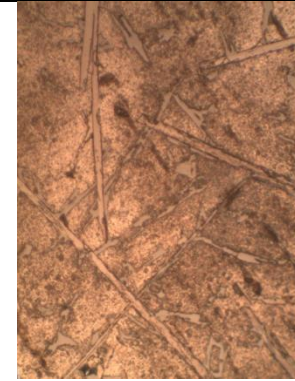
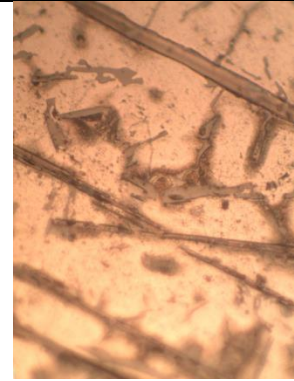
AUMENTO 100X (Reactivo #3, 15 segundos ataque)			
F. Molde Cáscara	F. Molde Permanente	F. Molde Arena	Fundición Centrifugada
			

Tabla 14

Micrografías de la aleación de aluminio a 500X

AUMENTO 500X (Reactivo #3, 15 segundos ataque)			
F. Molde Cáscara	F. Molde Permanente	F. Molde Arena	Fundición Centrifugada
			

Interpretación:

En la ampliación a 100X se puede observar claramente las “agujas” en el material, las cuales son la fase β de la aleación, estas “agujas” son compuestos intermetálicos de hierro que cristalizan de tal forma (β -AlFeMnSi), o en forma de “escritura china” (α -AlFeMnSi) (ASM International, 1998) ; dependiendo la fracción de volumen según la velocidad de enfriamiento, por esta razón se observa que en el caso del molde permanente existe un número grande de estas agujas, además de tener un tamaño significativamente mayor al resto de procesos; esto debido al enfriamiento rápido ocasionado por las paredes del molde de acero las cuales expulsan el calor de la fundición. De la misma forma en el proceso de fundición centrifugada se aprecia el mismo patrón de agujas, en forma similar por su enfriamiento rápido ocasionado por el giro de los discos en donde se deposita el material.

Para el estudio en el molde permanente fue necesario realizar fotografías en tres puntos de la probeta, de tal forma que se identifique el núcleo, la zona de relajación y la pared del lingote.

La figura 53 identifica estos tres puntos, y la tabla 15 muestra las microfotografías en tales puntos a un aumento de 200X y 500X.

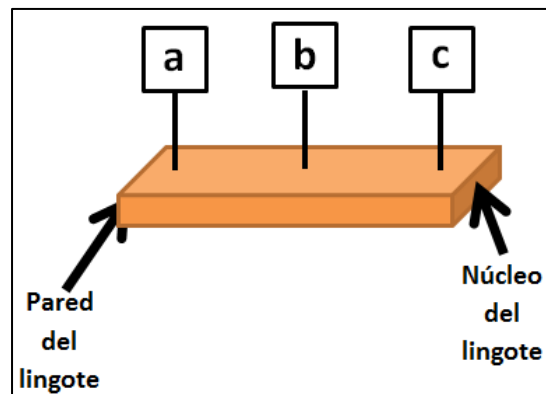
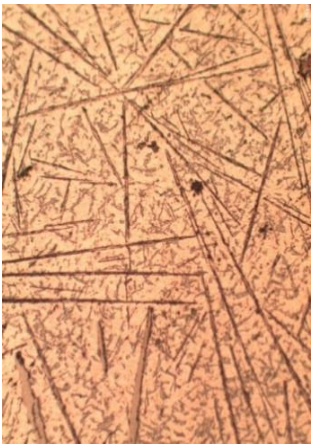
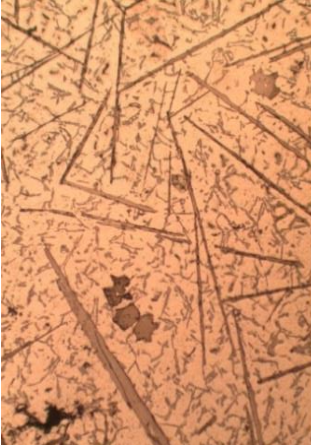

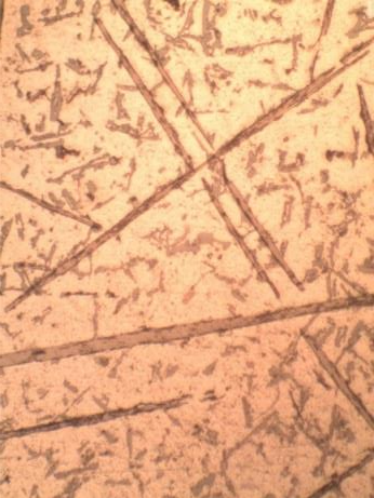
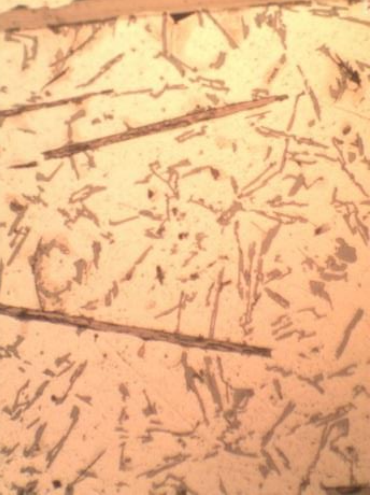
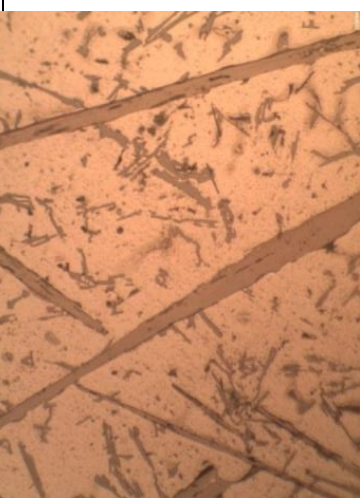


Figura 53. Puntos de extracción de fotografías micrográficas.

Tabla 15*Micrografías de la aleación de aluminio en F. molde permanente a 200X, 500X*

MOLDE PERMANENTE - ALUMINIO (Reactivo #3, 15 segundos ataque)		
a	B	C
200X		
		
500X		
		

Interpretación:

En la tabla 15 se observa claramente como a medida que las micrografías avanzan hacia el centro del lingote (a → b → c), va disminuyendo la cantidad de agujas de la fase β, esto debido al contacto de esta zona con la pared de acero del molde, zona por donde se expulsa todo el calor de la fundición. Es importante resaltar que a medida que el enfriamiento es más rápido, el espaciado entre brazos dendríticos secundarios disminuye. (Askeland, 1984)

5.2.3 Análisis químico

La cuantificación de los metales presentes en la muestra se realizó empleando un Espectrómetro de Chispa marca BRUKER modelo Q4TASMAN. A continuación, se presentan los resultados obtenidos en la tabla 16, para el Aluminio:

Tabla 16
Componentes de la aleación de aluminio

Metales	Aleantes (%)
Aluminio (Al)	84,52
Silicio (Si)	8,938
Hierro (Fe)	3,671
Cobre (Cu)	1,395
Zinc (Zn)	0,646
Níquel (Ni)	0,236
Plomo (Pb)	0,156
Magnesio (Mg)	0,15

CONTINUA

Manganeso (Mn)	0,096
Titanio (Ti)	0,051
Cromo (Cr)	0,033
Estaño (Sn)	0,029
Galio (Ga)	0,012
Vanadio (V)	0,006

En la tabla 17 se observa que la aleación de aluminio pertenece a la familia 4xx.x (Si), la cual es caracterizada por una aleación con Silicio como mayor aleante, con un 8,938 %.

Tabla 17

Familias de Aleaciones de aluminio, extracto.

Familia	Composición química nominal, wt%								
	Mg	Si	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn
Aleaciones para fundición									
1xx.x (Al ... > 99.00%)	...	0.10– 0.15	0.15– 0.35	0.25– 0.8	...	0.05– 0.10	0.05
2xx.x (Cu)	0.03– 2.3	0.05– 3.5	0.06– 0.35	0.15– 0.40	0.05– 0.7	0.04– 1.5	0.03– 2.3	3.5– 10.7	0.05– 2.5
3xx.x (Si + Cu/Mg)	0.03– 1.5	4.5– 23.0	0.04– 0.25	0.05– 0.35	0.03– 0.8	0.06– 1.5	0.10– 3.0	0.03– 5.0	0.03– 4.5
4xx.x (Si)	0.05– 0.10	3.3–13	0.20– 0.25	0.25	0.05– 0.5	0.12– 1.3	0.05– 0.5	0.05– 1.0	0.05– 0.5
5xx.x (Mg)	1.4– 10.6	0.10– 2.2	0.10– 0.25	0.25	0.05– 0.6	0.10– 1.3	0.05– 0.4	0.05– 0.30	0.05– 0.20
7xx.x (Zn)	0.2– 2.4	0.10– 0.30	0.10– 0.25	0.06– 0.6	0.05– 0.6	0.10– 1.4	0.15	0.1– 1.0	2.0– 7.8
8xx.x (Sn)	0.1– 0.9	0.4– 6.5	0.2	...	0.1– 0.5	0.5– 0.7	0.3– 1.5	0.7– 4.0	Sn, 5.5– 7.0

Fuente: (ASM International, 1998)

5.2.4 Diagrama de fase Al-Si

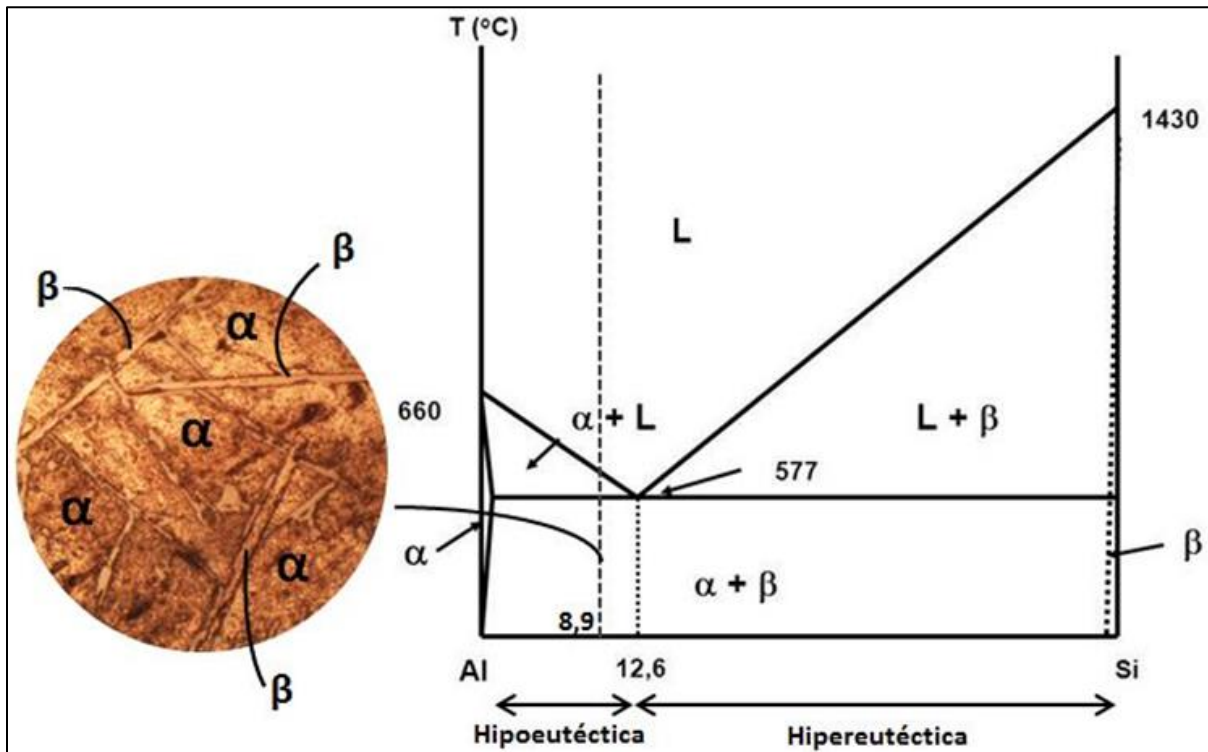


Figura 54. Diagrama Al-Si y fases presentes en Al-8,9% Si. (Fuente propia)

Interpretación:

El diagrama Al-Si es un diagrama binario, en donde el eutético se encuentra a una composición Al-12,6% Si (tabla 18). La aleación de estudio se encuentra en un porcentaje menor de Si, por lo que toma el nombre de aleación Hipoeutética, con un porcentaje en Si del 8,9% como se observa en la figura 54. Mediante la metalografía se encontraron los compuestos intermetálicos presentes en la aleación, α y β , detallados en la figura 55.

Tabla 18*Cambio de fases en el punto eutéctico de la aleación Al-Si*

Fases	Temperatura	Reacción
$L \rightarrow \alpha + \beta$	577 °C	Eutéctica

Las fases presentes en la aleación de aluminio se encuentran en similitud en los cuatro procesos de fundición. En la figura 55 se identifican dichas fases.

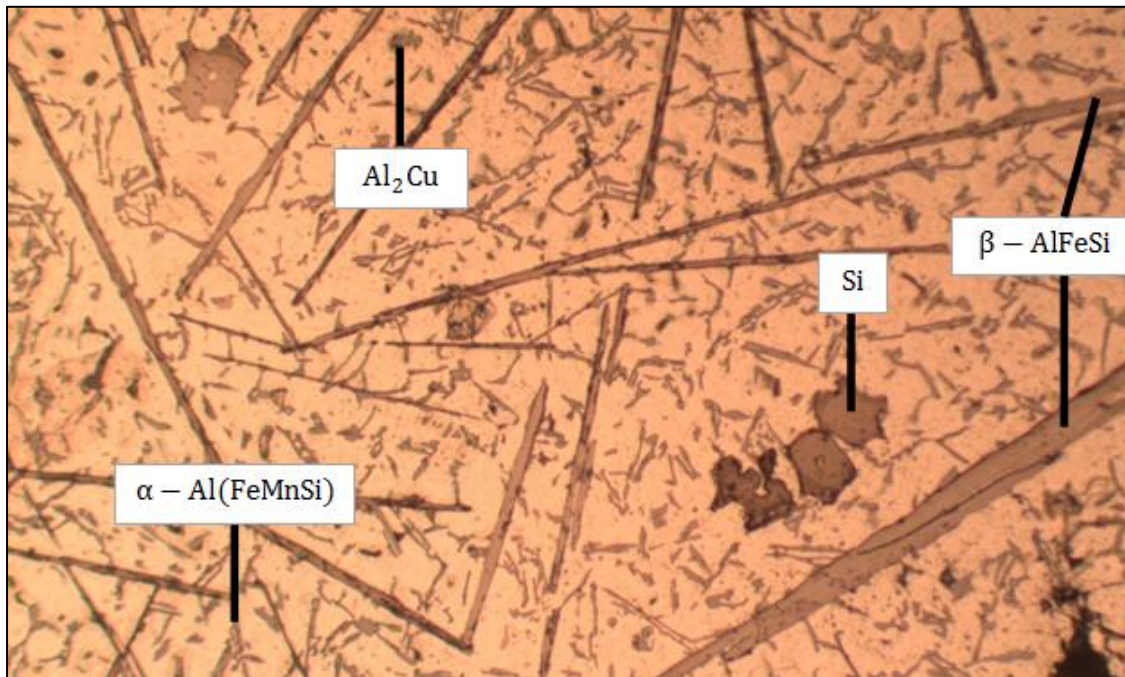


Figura 55. Fases presentes en la aleación de aluminio
Fuente: propia

Interpretación:

En la microestructura se observan los diferentes compuestos intermetálicos presentes en la aleación: Si, Al₂Cu, α -Al(FeMnSi), β -AlFeSi los cuales se los identifica por su morfología o formas. Para su mejor entendimiento se presentan dichas morfologías en la tabla 19. Como se explicó, las "agujas" son compuestos intermetálicos existentes por el alto contenido de hierro.

Tabla 19
Morfología de las fases encontradas.

Fase	Morfología
Si	Poliedros ramificados, plaquetas o varillas
Al₂Cu	Partículas redondas o irregulares, partículas dispersas
α -Al(FeMnSi)	Poliedros, letras chinas
β -AlFeSi	Agujas

Fuente: (ASM International, 1998)

5.2.5 Propiedades Mecánicas

Se analizan los resultados obtenidos de los ensayos de tensión, impacto, y microdureza de los cuatro procesos de fundición para el aluminio.

5.2.5.1 Ensayo de Tracción - Aluminio

El ensayo de tracción se realizó utilizando tres probetas por cada proceso de fundición para obtener un valor cercano a lo real. En el ANEXO H se presentan las dimensiones para este cálculo, según la norma ASTM E8.

Tabla 20
Propiedades mecánicas obtenidas % elong, E, Sy, Sut.

	% elong.	E	Sy	Sut
	%	Mpa	Mpa	Mpa
Cáscara	1,84	3560,9	65,42	82,19
Permanente	2,16	3338,3	71,84	93,65
Arena	1,76	3419,3	60,13	79,29
Centrifugada	2,00	3465,9	69,15	82,58

Interpretación:

Los resultados presentados en la tabla 20, muestran la variación de las propiedades mecánicas en los cuatro procesos de fundición de aluminio; donde se demuestra que la fundición por molde permanente posee las mejores características en cuanto a resistencia a la tracción con un valor de $Sy = 71,84 \text{ Mpa}$, $Sut = 93,65 \text{ Mpa}$ y con un porcentaje de elongación de 2,16%. Siendo éste el proceso en donde la transferencia de calor fue más brusca por su contacto con las paredes metálicas del molde, el segundo proceso con mejores características de resistencia a la tensión es la fundición por centrifugado en donde por el efecto centrífugo se disminuyen los

defectos de fundición, siguiente a este el proceso de fundición por cáscara; y el que presenta la menor resistencia a la tracción es el proceso por molde de arena con un $S_y=60,13 \text{ Mpa}$ y un $S_{ut}=79,29 \text{ Mpa}$. Estos valores se relacionan con la porosidad de la pieza colada, como se observa en el análisis visual, la fundición con menos porosidad es el de molde permanente. También cabe recalcar que el tamaño de grano influye sobre las propiedades. Por lo tanto a mayor porosidad y mayor tamaño de grano, una menor resistencia.

5.2.5.2 Ensayo de impacto (Charpy) – Aluminio

En la tabla 21 se muestran los resultados obtenidos del ensayo de impacto realizado en tres probetas para cada proceso según la norma ASTM E23, obteniendo un valor promedio más exacto.

Tabla 21

Resultados obtenidos en el ensayo de impacto.

ENSAYOS DE IMPACTO		
ALUMINIO		
	No.	Kg.m
Cáscara	1	2,0
	2	2,0
	3	2,0
	PROM	2,0
Permanente	1	2,6
	2	2,9
	3	2,8
	PROM	2,8
Arena	1	0,8
	2	1,0
	3	0,8
	PROM	0,9
Centrifugado	1	2,0
	2	1,9
	PROM	2,0

Interpretación:

En el ensayo de impacto del aluminio, el proceso que demostró absorber una mayor cantidad de energía a una temperatura de $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, comprobando su fragilidad, fue el de molde permanente alcanzando un valor de 2,8 Kg.m, proceso con mayor porosidad interna. En cuanto al proceso de cáscara y centrifugado se observa que presentan valores de tenacidad igual a 2,0 Kg.m. De igual manera se observa que el proceso más deficiente es el de molde en arena, llegando a un valor de 0,9 Kg.m. Estableciendo una relación entre la resistencia al impacto y la estructura interna del material. Las porosidades internas hacen de concentradores de esfuerzos en donde se generará la falla por impacto. Por esta razón la fundición en molde permanente es la que presenta una mayor resistencia al impacto, por su mínima porosidad.

5.2.5.3 Análisis de dureza – Aluminio

En el análisis de dureza se realizó tres indentaciones por cada proceso. En la tabla 22 se presentan los resultados de dureza, conforme con la norma ASTM E18

Tabla 22
Resultados obtenidos en el ensayo de microdureza.

DUREZA			
ALUMINIO			
	No.	HV	HRB
Cáscara	1	99,4	55,1
	2	92,3	51,3
	3	101	58,6
PROM		97,57	55

CONTINUA

Permanente	1	112,3	64,7
	2	103	58,6
	3	11,9	64,7
	PROM	75,73	62,67
Arena	1	123,6	69,9
	2	138,4	76,4
	3	115,2	64,7
	PROM	125,73	70,33
Centrífugo	1	118,6	67,40
	2	101,1	58,6
	3	145,2	78,3
	PROM	121,63	68,10

Interpretación:

El proceso que obtuvo un mayor valor de dureza fue el de molde de arena alcanzando un valor de 70,33 HRB debido a que el enfriamiento es más brusco; en segundo lugar se encuentra la fundición centrifugada ya que a que el molde se mantenía en rotación dentro de la máquina enfriando el material mientras solidificaba. Siguiendo a este proceso el molde permanente presenta una dureza de 62,67 HRB debido a que su enfriamiento se realizó a temperatura ambiente y dentro del molde. Por último se encuentra la fundición por cáscara con un valor de 55 HRB. Estos valores comprueban que a una mayor velocidad de enfriamiento, una mayor dureza en el material.

5.3 Resultados de la experimentación del Latón

5.3.1 Análisis Visual

En la tabla 23 se presentan fotografías que detallan las porosidades internas y su acabado superficial.

Tabla 23
Micrografías del latón a 50X

CÁSCARA	PERMANENTE	ARENA
AUMENTO 50X (Sin ataque)		
		

Interpretación:

Al igual que en la aleación de aluminio, se observan una mayor cantidad de poros internos en el proceso de fundición en molde de arena, estos poros que en alta cantidad son característicos del proceso, disminuyen significativamente las propiedades mecánicas del material fundido. En el proceso de cáscara y permanente se aprecia menor cantidad de poros internos, lo que beneficia a sus propiedades mecánicas.

5.3.2 Micrografía del Latón

Para el estudio y análisis micrográfico se presenta las fotografías tomadas con el microscopio a un aumento de 100X y 500X como se presenta en la tabla 24 y tabla 25, para los tres procesos de fundición del latón.

Tabla 24

Micrografías del latón a 100X

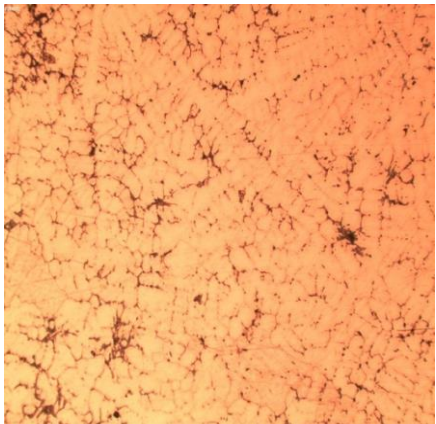


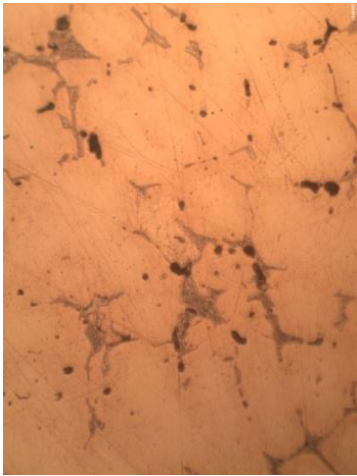

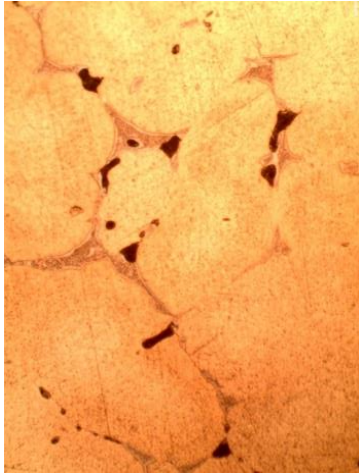
AUMENTO 100X (Reactivo #40, 30 segundos ataque)		
F. Molde Cáscara	F. Molde Permanente	F. Molde Arena
		

Tabla 25
Micrografías del latón a 500X

AUMENTO 500X (Reactivo #40, 30 segundos ataque)		
F. Molde Cáscara	F. Molde Permanente	F. Molde Arena
		

Interpretación:

En el caso del latón a un aumento de 100X se observa claramente un crecimiento dendrítico, la cual está formada por un arreglo de brazos primarios, secundarios y terciarios que forman una red donde los espacios vacíos son llenados por intermetálicos (Askeland, 1987). En la figura 56 se puede observar la similitud entre el caso aquí presentado y una representación del fenómeno en un estudio aparte.

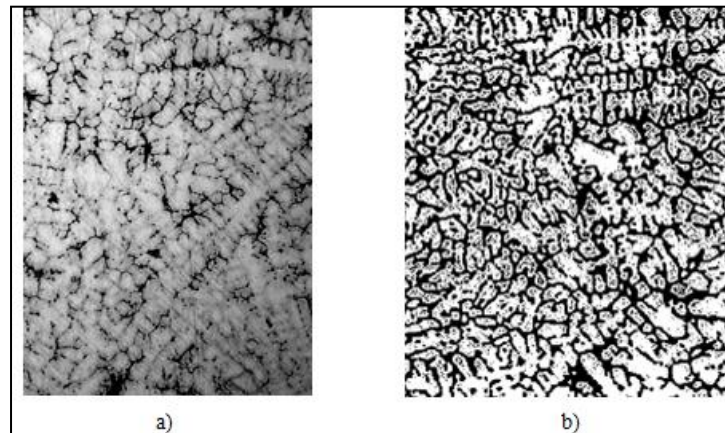


Figura 56. a) Dendritas en aleación de cobre en fundición en molde de cáscara. b) Crecimiento dendrítico
Fuente: (ASM, Handbook, 1985).

Se observa también que el crecimiento dendrítico fue mayor en el caso de la fundición en cáscara, seguido de la f. en molde permanente y la f. en molde de arena; esta última presenta también un tamaño de grano mucho mayor en comparación a las otras muestras, esto se da por la correlación velocidad de enfriamiento-tamaño de grano, mostrada en la figura 57; Un aumento del tiempo de solidificación (velocidad de enfriamiento lenta) produce un aumento del espaciamiento dendrítico secundario. (Ares, Caram, & Schvezov, 2004)

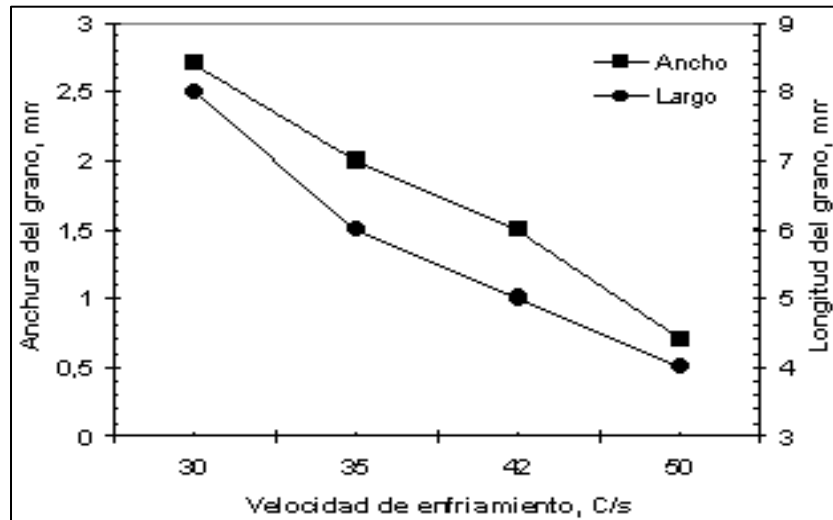
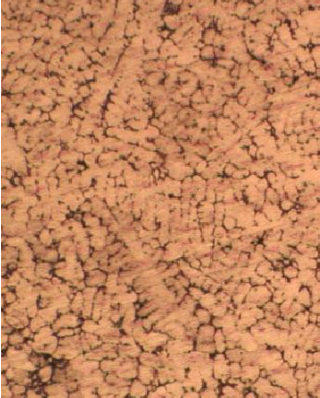
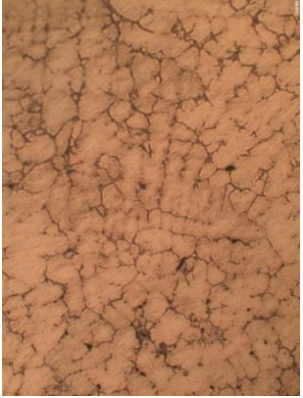

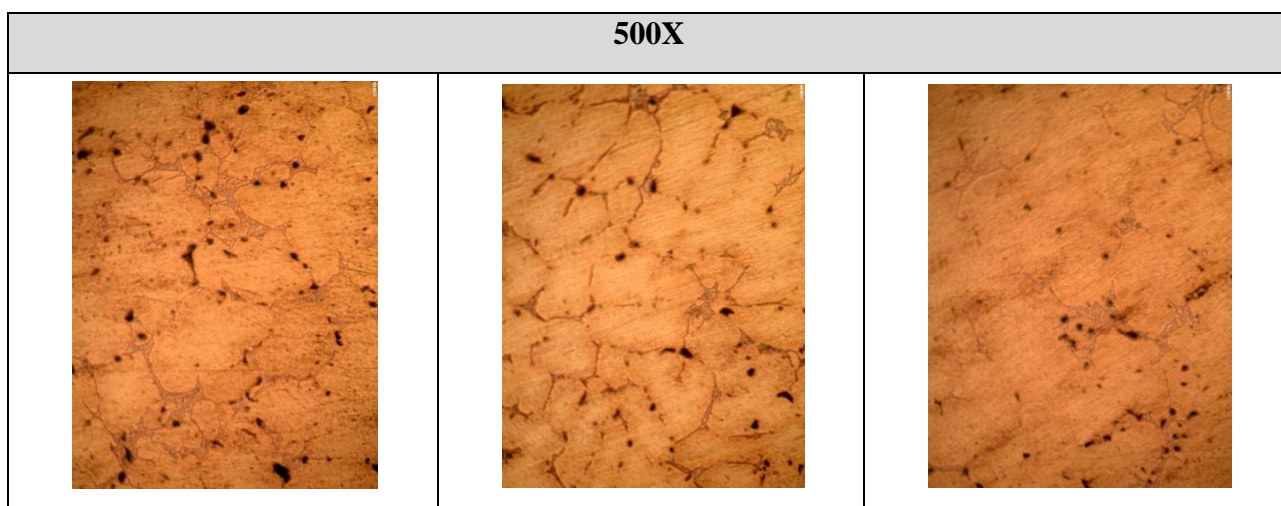


Figura 57. Gráfica Tamaño de grano VS Velocidad de enfriamiento.
 Fuente: (Universidad Politécnica de Valencia)

Al igual que en el caso del aluminio, se realizó tres micrografías en la probeta de fundición por molde permanente como se detalló en la figura 53. Analizando 3 zonas diferentes del para la micrografía

Tabla 26
 Micrografías del latón en F. molde permanente a 200X, 500X

MOLDE PERMANENTE – LATÓN (Reactivo #40, 30 segundos ataque)		
a	b	C
200X		
		



Interpretación:

En la tabla 26 se observa que las dendritas están presentes en mayor cantidad en la frontera del lingote donde la velocidad de enfriamiento es mayor, disminuyendo hacia el centro (a → b → c); a diferencia del tamaño de grano el cual crece a medida que se localiza la micrografía en el centro del lingote. Esto demuestra la hipótesis de que el aumento de la velocidad de enfriamiento aumenta el grado de subenfriamiento y permite disminuir el tamaño de grano resultante. (UPV, s.f.)

5.3.3 Análisis químico - Latón

La cuantificación de los metales presentes en la muestra se realizó empleando un Espectrómetro de Chispa marca BRUKER modelo Q4TASMAN. A continuación se presentan los resultados obtenidos en la tabla 27, para el Latón:

Tabla 27
Componentes del latón

Metales	Aleantes (%)
Cobre (Cu)	77,21
Zinc (Zn)	19,48
Plomo (Pb)	2,438
Aluminio (Al)	2,243
Estaño (Sn)	1,459
Níquel (Ni)	0,462
Hierro (Fe)	0,283
Silicio (Si)	0,129
Manganeso (Mn)	0,088
Teluro (Te)	0,084
Antimonio (Sb)	0,06
Plata (Ag)	0,014
Fósforo (P)	0,009
Selenio (Se)	0,005

Con respecto al Cobre, al tener como aleante primario al Zinc, se lo considera un latón, y por su contenido en plomo (2,4 %) es llamado Latón de plomo. Por estas características se determina una aleación de cobre de la familia C8XXXX, como se muestra en la tabla 28:

Tabla 28
Familia C8XXXX de latones

UNS Number	Other Designations, Descriptive Names (Former SAE No.)	Applicable Casting Processes (See Legend)	Composition, percent maximum, unless shown as a range or minimum*					
			Cu	Sn	Pb	Zn	Ni	Fe
C85200 ⁽¹⁾	400, 72-1-3-24, High Copper Yellow Brass,	S, C, CL	70.0-74.0 ^(7,14)	.7-2.0	1.5-3.8	20.0-27.0	1.0 ⁽⁹⁾	.6
C85400 ^(1,2)	403, 67-1-3-29, Commrc. No.1 Yellow Brass	S, C, CL, PM, I, P	65.0-70.0 ^(7,19)	.50-1.5	1.5-3.8	24.0-32.0	1.0 ⁽⁹⁾	.7
C85500 ^(1,2)	60-40 Yellow Brass	S, C, CL	59.0-63.0 ^(7,19)	.20	.20	Rem.	.20 ⁽⁹⁾	.20
C85700 ^(1,2)	405.2, 63-1-1-35, B2, Permanent Mold Brass	S, C, CL, PM, I, P	58.0-64.0 ^(7,14)	.50-1.5	.80-1.5	32.0-40.0	1.0 ⁽⁹⁾	.7
C85800 ^(1,2)	405.1, Die Casting Yellow Brass	S, C, CL, PM, I, P D	57.0 min. ^(7,19)	1.5	1.5	31.0-41.0	.50 ⁽⁹⁾	.50

Legend: Applicable Casting Processes
 S = Sand C = Continuous CL = Centrifugal
 D = Die I = Investment P = Plaster
 PM = Permanent Mold

5.3.4 Diagrama de fase Cu-Zn

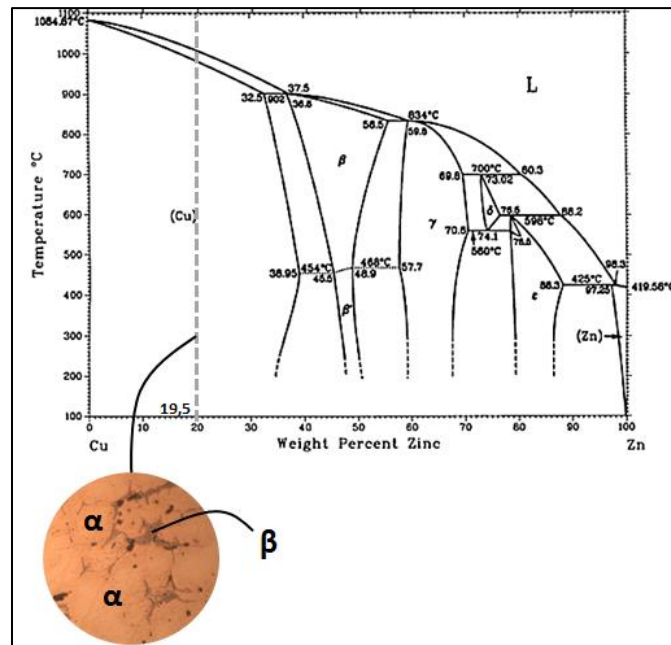


Figura 58. Diagrama Cu-Zn y fases presentes en Cu-19,5% Zn.
 Fuente: (ASM International, 1998)

Interpretación:

Mediante el análisis químico se comprobó los porcentajes de aleantes, y en el caso del cobre se trata de un latón al plomo. En la figura 58 se muestra el diagrama de fases Cu-Zn, representada la aleación Cu-19,5% Zn, la cual presenta dos fases identificadas en el análisis micrográfico α y β , compuestos intermetálicos de la aleación.

Las fases presentes en el latón se encuentran en similitud en los tres procesos de fundición. En la figura 59 se identifican dichas fases:

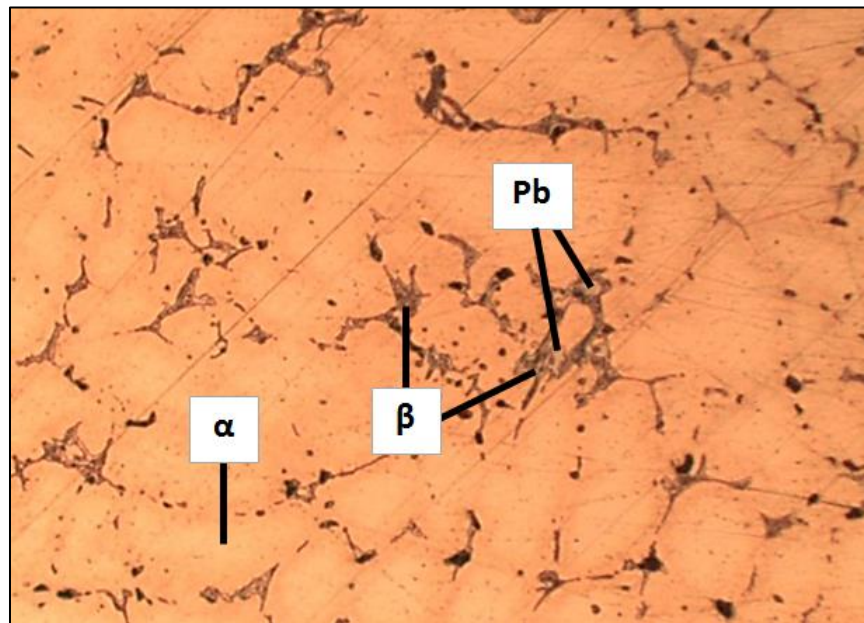


Figura 59. Fases presentes en el latón.

Interpretación:

En la microestructura se observan los diferentes compuestos intermetálicos presentes en la aleación: α , β , Pb; compuestos intermetálicos no estequiométricos en los que los elementos mantienen proporciones mixtas y variables (Askeland, 1987). A diferentes temperaturas y para la aleación Cu-19,5% Zn se puede tener las fases: L, α +L, α .

5.3.5 Propiedades Mecánicas - Latón

Se analizan los resultados obtenidos de los ensayos de tensión, impacto, y microdureza de los cuatro procesos de fundición para el latón.

5.3.5.1 Ensayo Tracción - Latón

El ensayo de tracción se realizó utilizando tres probetas por cada proceso de fundición para obtener un valor cercano a lo real. A continuación en la tabla 29 se presenta las dimensiones que cumplen con la norma ASTM E8.

Tabla 29

Propiedades mecánicas obtenidas % elong, E, Sy, Sut.

	% elong.	E	Sy	Sut
	%	Mpa	Mpa	Mpa
Cáscara	4,72	1707,565	80,49	120,39
Permanente	5,01	1730,952	86,75	132,18
Arena	4,35	1763,165	76,57	113,05

Interpretación:

Los resultados presentados en la tabla 29, muestran la variación de las propiedades mecánicas en los cuatro procesos de fundición de latón; donde se demuestra que la fundición por molde permanente al igual que en el aluminio, posee las mejores características en cuanto a

resistencia a la tracción con un valor de $S_y = 86,75 \text{ Mpa}$, $S_{ut} = 132,18 \text{ Mpa}$ y con un porcentaje de elongación de 5,01%. El segundo proceso con mejores características de resistencia a la tensión es la fundición por cáscara, y el que presenta la menor resistencia a la tracción es el proceso por molde de arena con un $S_y = 76,57 \text{ Mpa}$ y un $S_{ut} = 113,05 \text{ Mpa}$.

Al igual que en el caso de la aleación de aluminio, la fundición con menos porosidad es el de molde permanente. Por lo tanto a mayor porosidad y mayor tamaño de grano, una menor resistencia.

5.3.5.2 Ensayo de impacto - Latón

En la tabla 30 se muestran los resultados del ensayo de impacto realizado en tres probetas para cada proceso según la norma ASTM E23, obteniendo un valor promedio más exacto.

Tabla 30
Resultados obtenidos en el ensayo de impacto.

ENSAYOS DE IMPACTO - LATÓN		
FUNDICIÓN	No.	Kg.m
Cáscara	1	6,2
	2	5,9
	3	6
	PROM	6,03
Permanente	1	6,1
	2	6,5
	3	6,2
	PROM	6,27
Arena	1	4,3
	2	4,2
	3	4,2
	PROM	4,23

Interpretación:

En el ensayo de impacto en el latón, el proceso que demostró absorber una mayor cantidad de energía a una temperatura de -30 °C, comprobando su fragilidad, fue el de molde permanente alcanzando un valor de 6,27 Kg.m, que por la relación resistencia al impacto y estructura demuestran que a una menor porosidad, una mayor absorción de energía. En cuanto al proceso de cáscara se observa que presenta valores de tenacidad igual a 6,03 Kg.m. Y el proceso con la tenacidad más baja es el de molde en arena, llegando a un valor de 4,23 Kg.m.

5.3.5.3 Análisis de dureza - Latón

En el análisis de dureza se realizó tres identaciones por cada proceso. En la tabla 31 se presentan los resultados de dureza, conforme con la norma ASTM E18.

Tabla 31
Resultados del análisis de dureza en el latón

DUREZA			
LATÓN			
FUNDICIÓN	No.	HV	HRB
Cáscara	1	153,8	81,7
	2	174,6	87,5
	3	181,3	90
	PROM	169,9	86,4
Permanente	1	187,7	89,7
	2	166,2	86,2
	3	197,3	93,2
	PROM	183,73	89,7

Arena	1	184,3	90
	2	180,3	88,8
	3	193,3	92,2
	PROM	185,97	90,33

Interpretación:

El proceso que obtuvo un mayor valor de dureza fue el de molde de arena alcanzando un valor de 90,33 HRB debido a que el enfriamiento es más brusco; siguiente a este proceso el molde permanente presenta una dureza de 89,7 HRB debido a que su enfriamiento se realizó a temperatura ambiente y dentro del molde. Por último se encuentra la fundición por cáscara con un valor de 86,4 HRB. En éste caso los procesos de fundición en arena y centrifugada debido a su enfriamiento más rápido obtuvieron altos valores de dureza

5.4 Análisis de simulación

Se genera una gráfica comparativa entre las temperaturas de solidificación, de la simulación con la experiemetal como se observa en la figura 60.

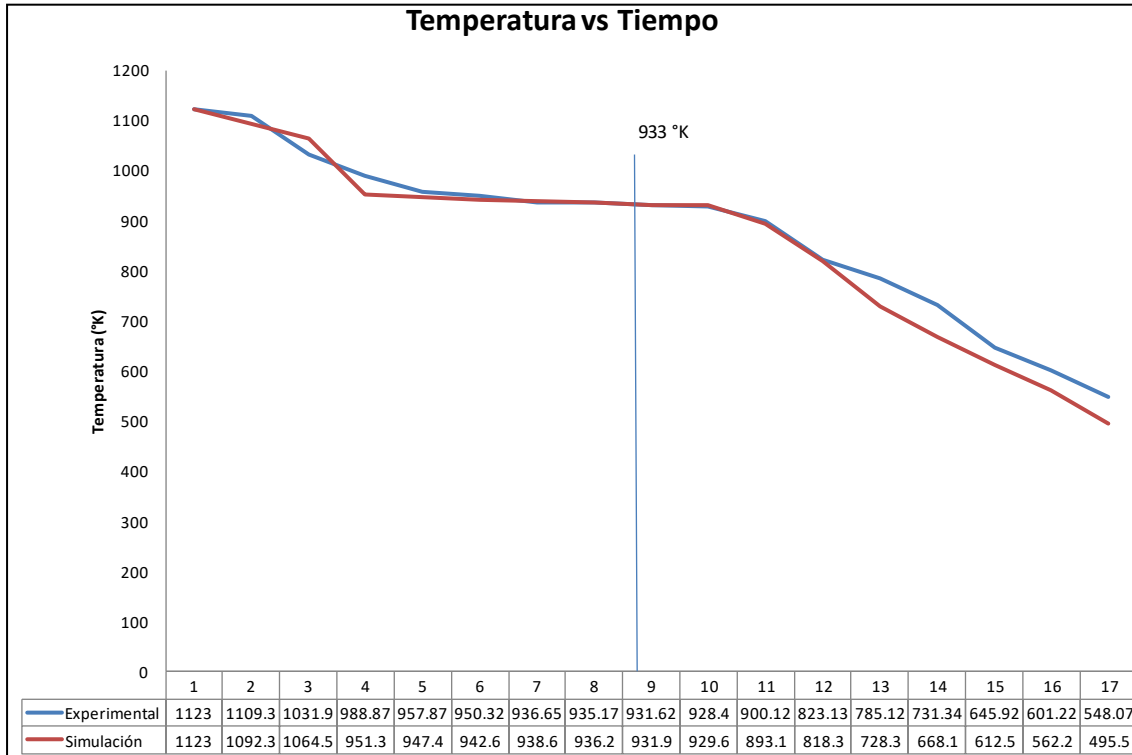


Figura 60: Gráfica temperatura (K) vs tiempo (min), de simulación y experimental.

Interpretación

Se conoce que el punto de solidificación de la aleación de Al-Si tiene una temperatura de 933°K (660°C), el tiempo determinado por la simulación fue de 8.5 min, el tiempo calculado teórico con la regla de Chvorinov fue 8.74 min y el tiempo obtenido experimentalmente es 8.61 min, a través de la termocupla tipo K.

Realizando una comparación experimental vs teórico, obtuvimos un error de 1.48%. El valor teórico demuestra que el valor experimental obtenido mediante la termocupla es válido.

$$\%error_{teo vs exp} = \frac{Valor\ teórico - Valor\ experimental}{Valor\ teórico} * 100\%$$

$$\%error_{exp vs teo} = \frac{8.74 - 8.61}{8.74} * 100\%$$

$$\%error_{exp vs teo} = 1.48 \%$$

Realizando una comparación experimental vs simulación, obtuvimos un error de 1.28%. Se observa que el fenómeno en la simulación se acerca a lo obtenido en la realidad, por lo que se acepta la simulación.

$$\%error_{sim vs exp} = \frac{Valor\ simulación - Valor\ experimental}{Valor\ simulación} * 100\%$$

$$\%error_{sim vs exp} = \frac{8.5 - 8.61}{8.5} * 100\%$$

$$\%error_{sim vs exp} = 1.28 \%$$

CAPÍTULO VI

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

1. Se cumplió con el objetivo de análisis de dos diferentes tipos de aleaciones, tanto la de Al-Si como el Latón, donde fueron comparadas sus propiedades mecánicas, físicas y microestructura, en los cuatro procesos de fundición que fueron por molde permanente, centrifugado, molde de arena y molde de cáscara, donde se llegó a la conclusión que el proceso que posee mejores propiedades mecánicas se dio mediante el molde permanente con valores de $S_y = 71.84\text{Mpa}$; $S_{ut} = 93.65\text{Mpa}$ y una tenacidad = 2.8kg.m , en la fundición de Al-Si. y valores de $S_y = 86.75\text{Mpa}$; $S_{ut} = 132.18\text{Mpa}$ y una tenacidad = 6.27kg.m , en la fundición de Latón. A su vez se determinó que el proceso menos eficiente en cuanto a sus propiedades mecánicas fue la fundición en molde de arena. Así mismo se observó que las microestructuras de los procesos de fundición de las dos aleaciones cumplen con las características presentadas en el Handbook de ASM.
2. Mediante un análisis de las micrografías en diferentes aumentos y el diagrama de fases característico de cada aleación, se determinaron las fases presentes en cada una de ellas, y como resultado se obtuvo, que para aleación Al-8,9 % Si los compuestos intermetálicos presentes fueron: Si, Al_2Cu , $\alpha\text{-Al(FeMnSi)}$, $\beta\text{-AlFeSi}$. Y para el latón se determinaron fases intermetálicas no estequiométricas: α , β , Pb.
3. Con el estudio realizado, hemos determinado que intervienen varias variables, que influyen sobre las propiedades mecánicas y las microestructuras obtenidas. La velocidad de enfriamiento es una de las variables más importantes, ya que afecta directamente a las propiedades del metal

tal como son el tamaño de grano, propiedades mecánicas, defectos de fundición y formación de fases. Se determinó que a un enfriamiento más rápido se afecta de forma inversa en la dureza del material; así se observa que con una velocidad de enfriamiento mayor, en comparación a los otros procesos, la fundición por molde de arena ésta obtuvo los valores más altos de dureza, los cuales son $HBR = 70.33$ en la aleación Al-Si y un $HBR = 90.33$ en el latón, de igual manera el tamaño de grano en la microestructura fue mayor que en el resto de fundiciones.

4. En la investigación se realizó un estudio más amplio en la microestructura del proceso de fundición en molde permanente, tomando en cuenta tres regiones para analizar, el núcleo de la pieza, la pared y un punto intermedio entre estas. Se analizó el crecimiento de los granos y el espaciamiento entre los brazos dendríticos presentados en el núcleo de la pieza, en donde se produjo un enfriamiento más lento que en las paredes del molde las cuales presentan un agrupamiento mayor de granos y un espaciamiento más corto entre los brazos dendríticos, confirmando de esta manera que los granos en la microestructura van creciendo desde borde hacia el centro de la pieza fundida. También se confirmó la existencia de las tres zonas en un lingote de fundición: zona de enfriamiento, zona, columnar y la zona equiaxial.
5. La simulación se realizó, para el estudio de la solidificación de la colada en el molde permanente de la aleación Al-Si, mediante un método de elementos finitos (MEF) para lo cual se tomó las variables reales en el proceso de fundición así también como las ecuaciones que gobiernan este fenómeno, para simularlo de la forma más real posible, en la simulación realizada se obtuvo un tiempo de solidificación de 8.5 min, mientras que en la parte teórica realizada con la regla de solidificación de Chvorinov se obtuvo un tiempo de solidificación igual a 8.74 min y experimentalmente un tiempo de 8.61 min, obteniendo un error entre lo

teórico y lo experimental de 1,48%, y un error entre la simulación y lo experimental de 1.28%. Errores dentro del rango de lo aceptado.

6. En el análisis visual se puede observar que en cuanto al acabado de las piezas obtenidas en los diferentes métodos de fundición tanto en las aleaciones de Al-Si como en el Latón, el molde de arena presentó el acabado menos aceptable entre los cuatro procesos, mientras que la fundición centrifugada fue el de mejores características. En cuanto a la micrografía realizada con un aumento de 50X se puede apreciar que en el interior de las piezas el que presenta mayor porosidad es el molde de arena, en segundo lugar el molde de cáscara, siguiente a este la fundición centrifugada, con características muy acercadas al de molde permanente que presento menor porosidad.

6.2 Recomendaciones

1. Se demostró en este estudio el proceso de fundición más apto según la necesidad del estudiante o metalúrgico. Para la fabricación de piezas de gran tamaño, en donde las porosidades no son el inconveniente principal, el proceso recomendado es el de fundición por molde de arena. Para producción en serie donde se requieran acabados de mejor calidad y para aleaciones de bajo punto de fusión (menor a 900 °C), el proceso de fundición más apto es en molde permanente. En el caso en que se necesite la fabricación de piezas con formas geométricas complejas, y con una buena relación acabado superficial – resistencia, se recomienda el proceso de fundición en cáscara el cual es usado también en producción de piezas en serie de pequeño y mediano tamaño. Y para cuando es necesario obtener un detalle alto en el acabado, evitando así el

maquinado, y además se necesita de buenas propiedades mecánicas; se recomienda el proceso de fundición centrifugada, aunque está limitado para la fabricación de piezas pequeñas.

2. Para obtener los mejores resultados en un proceso de fundición es sumamente importante tener en cuenta todas las variables que intervienen en el mismo, desde la velocidad de enfriamiento, contracción, solubilidad, porcentajes de aleantes, respiraderos y vertederos y hasta la habilidad para colar el metal son indispensables.
3. Debido a que el proceso de fundición se maneja con temperaturas extremadamente altas se recomienda tener los equipos de protección personal (PPE), tales como guantes, botas de cuero con punta de acero, mascarillas por los gases que genera la fundición, gafas y un sombrero con ala que protege de salpicaduras, a su vez se debe tener conocimiento del proceso a realizarse y realizar una verificación de la maquinaria antes de usarla para prevenir posibles accidentes.
4. Se recomienda tener en cuenta las tolerancias especificadas por las normas que rigen los ensayos destructivos de tensión y de impacto (Charpy) las cuales son muy importantes al momento de los cálculos de los esfuerzos de fluencia y esfuerzo último, ya que pequeños errores generan errores significativos, para la medición de las geometrías se debe utilizar un calibrador digital que tiene una precisión más confiable.
5. Es necesario realizar un análisis de los componentes metálicos (análisis químico) que posee el material fundido, ya que esto permitirá determinar la familia a la que pertenece el material y simplificará el análisis de sus diagramas de fase y microestructuras, ayudando en el entendimiento de los fenómenos ocurridos en cada aleación.

7. GLOSARIO

- **Aleación:** Material metálico que se obtiene por medio de la combinación química de distintos elementos, teniendo mejores propiedades mecánicas que los metales puros.
- **ASTM:** American Society for Testing and Materials.
- **Calor específico:** Calor requerido para cambiar la temperatura de una unidad de peso del material en un grado.
- **Calor latente de fusión:** Calor liberado cuando se solidifica un líquido, está relacionado con la diferencia en energía entre el sólido y el líquido.
- **Cavidades:** Orificios pequeños presentes en una pieza colada
- **Colado:** Proceso para convertir un metal o aleación fundida en un producto semi terminado.
- **Constante del molde [B]:** Constante característica en la regla de Chvorinov
- **Contracción:** Contracción de una pieza colada durante la solidificación
- **Crecimiento:** Proceso físico por medio del cual una nueva fase aumenta de tamaño. En el caso de la solidificación se refiere a la formación de un sólido estable a medida que el líquido se solidifica.
- **Deformación plástica:** Deformación permanente de un material cuando se aplica una carga y después se elimina.
- **Dendrita:** Estructura parecida a un árbol del sólido que crece cuando se solidifica un líquido subenfriado.
- **Energía de impacto:** Energía requerida para fracturar un espécimen estándar cuando se aplica de repente la carga.
- **Esfuerzo:** Fuerza por unidad de área sobre la cual está actuando la fuerza.

- **Espaciamiento entre brazos dendríticos:** Distancia entre los centros de dos brazos dendríticos secundarios adyacentes.
- **Eutéctica:** Reacción invariante de tres fases en la que una fase líquida se solidifica para producir dos fases solidas.
- **Fase:** Cualquier porción, que es físicamente homogénea en su interior y está delimitada por una superficie por lo que está separada de cualquier otra porción.
- **Grano:** Un cristal pequeño en un material policristalino.
- **Híper:** Prefijo que indica que la composición de una aleación es mayor que la composición a la que ocurre la reacción de tres fases.
- **Hipo:** Prefijo que indica que la composición de una aleación es menor que la composición a la que ocurre la reacción de tres fases.
- **Límite elástico:** Nivel de esfuerzo sobre el cual un material comienza a mostrar una deformación permanente.
- **Lingote:** Pieza colada simple por lo regular se vuelve a fundir.
- **Microdureza:** Dureza de materiales medida por lo regular utilizando cargas menores a 2[N], con una prueba como la de Knoop.
- **Microestructura:** Estructura de un material a la escala de longitud microscópica.
- **Núcleos:** Partículas pequeñas del sólido que se forman a partir del liquido a medida que los átomos se aglomeran.
- **Porosidad:** Burbujas de gas atrapadas dentro de una pieza colada durante la solidificación.
- **Propiedades mecánicas:** Propiedades de un material como la resistencia que describen que tan bien soporta las fuerzas aplicadas en el material.

- **Regla de Chvorinov:** El tiempo de solidificación de una pieza colada es directamente proporcional al cuadrado de la razón volumen a área de superficie de la pieza colada.
- **Solubilidad:** Cantidad de un material que se disolverá por completo en un segundo material sin crear una segunda fase.
- **Subenfriamiento:** Temperatura a la que debe enfriarse un metal líquido por debajo de la temperatura de solidificación antes de que ocurra la formación de núcleos.
- **Temperatura de liquidus:** Temperatura a la que comienza a formarse el primer sólido durante la solidificación.
- **Temperatura de solidus:** Temperatura por debajo de la cual todo el líquido se ha solidificado por completo.
- **Tenacidad a la tensión:** Es una medida de la energía requerida para ocasionar la fractura bajo las condiciones de prueba de tensión.
- **Zona columnar:** Región de granos alargados que tienen una orientación preferida que se forma como resultado del crecimiento competitivo durante la solidificación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (s.f.). Obtenido de Junta de Andalucía: <http://www.juntadeandalucia.es/averroes/centros-tic/21700290/helvia/aula/archivos/repositorio/0/42/html/diagram.html>
- (s.f.). Obtenido de Universidad Politécnica de Valencia: https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm05/pfcm5_2_1.html
- Anilchandra, Arnberg, Bonollo, Fiorese, & Timelli. (2017). Evaluating the tensile properties of aluminum foundry alloys through reference castings. *Material (Basel)*, 12.
- Askeland, D. (1987). *Ciencia e Ingeniería de los materiales*. México: Iberoamerica.
- ASM International. (1998). *Metals Handbook*. Desk Edition.
- Bala, Shuaibu, & Abolarin. (2015). Evaluation of mechanical properties of aluminum casting using sand deposits in Niger State, Nigeria. *Conference paper*.
- Bencomo, Bisbal, & Morales. (2008). Simulation of the aluminum alloy A356 solidification cast in cylindrical permanent molds. *Matéria*, 294-303.
- Bone, J., & Crespo, D. (2015). *Aseguramiento de la calidad en las fundiciones de aluminio, en base a los procedimientos de moldeo en el laboratorio de fundición de la Facultad de Mecánica*. Sangolquí.
- Facultad de Ingeniería Industrial. (2008). *Protocolo de Fundición, Curso de Procesos de Manufactura*.

- Faria, & Leite. (2018). The effect of casting speed and the fraction of Al5%Ti1%B Inoculant on the microstructure and mechanical properties of the AA5052 Aluminum alloy produced by the direct chill process. *SciELO*.
- Ferrer, C., & Amigó, V. (2005). *Tecnología de materiales*. Valencia: Alfaomega.
- Finn, R. (1979). *Materiales de Ingeniería y sus aplicaciones*. Bogotá: Editorial Carvajal.
- Flores, A. (2013). *Optimización del proceso de vaciado de Zamak 3 en molde Permanente mediante técnicas estadísticas y cómputo suave*. Saltillo.
- García, J. A. (2016). *Estudio de la influencia de diferentes diseños de los sistemas de alimentación en compensación en la fundición en arena*. Sevilla.
- Groover, M. P. (2012). *Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas*. Pensilvania: Pearson.
- Guzmán, F., & Caiza, G. (2011). *Aseguramiento de la calidad en las fundiciones de aluminio, en base a los procedimientos de moldeo en el laboratorio de fundición de la Facultad de Mecánica*. Riobamba.
- Harmer, D., Troxell, G., & Wiskocil, C. (1964). *Ensaye e Inspección de los materiales de Ingeniería*. New York: Mc GRAW HILL.
- Labanowski, & Olkowski. (2014). Effect of microstructure on mechanical properties of BA1055 bronze castings. *ISSN*, 6.

Nazari, Yousefi, Kerahroodi, Mofrad, & Abhari. (2015). Production of cooper-aluminum bimetal by using centrifugal casting and evaluation of metal interface. *International Journal of Materials Lifetime*, 9.

Okayasu, Miyamoto, & Morinaka. (2015). Material properties of varius cast aluminum alloys made using a heated mold continuous casting technique with and without ultrasonic vibration. *Metals*, 1440-1453.

PRESS FORJA S.A. (2012). *CAP II, Estado del arte del proceso de fundición de aluminio*.

Rzadkosz, Klempka, Kozana, Piekos, & Kranc. (2014). Structure and propierties reserch of cast made with copper alloys matrix. *Archieves of Metallurgy and Materials*.

Seifeddine, Sjögren, & Svensson. (s.f.). Variations in microestructure ande mechanical properties of cast aluminum EN AC 43100 alloy. 11.