



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica

## **ESTRUCTURAS DE SOLIDIFICACIÓN DEL ALUMINIO FUNDIDO ARTESANALMENTE**

**Sergio Alejandro López Rodríguez**

Asesorado por el Dr. Sc. Ing. Roberto Alejandro Aguilar Rivas

Guatemala, febrero de 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTRUCTURAS DE SOLIDIFICACIÓN DEL ALUMINIO FUNDIDO ARTESANALMENTE**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

**SERGIO ALEJANDRO LÓPEZ RODRÍGUEZ**

ASESORADO POR EL DR. SC. ING. ROBERTO ALEJANDRO AGUILAR RIVAS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO MECÁNICO**

GUATEMALA, FEBRERO DE 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

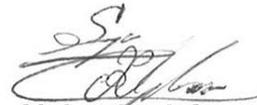
DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Hugo Leonel Ramírez Ortíz
EXAMINADOR	Ing. Gilberto Enrique Morales Baiza
EXAMINADOR	Ing. Raúl Guillermo Izaguirre Noriega
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**ESTRUCTURAS DE SOLIFICACIÓN DEL ALUMINIO FUNDIDO ARTESANALMENTE**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha marzo de 2011.



**Sergio Alejandro López Rodríguez**

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA

Guatemala, 8 de noviembre de 2012

Ingeniero Julio César Campos Paiz  
Director de Escuela de Ingeniería Mecánica  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ingeniero Campos:

Al saludarlo muy atentamente, le comunico que he revisado, a completa satisfacción, el trabajo de graduación del estudiante universitario Sergio Alejandro López Rodríguez, quien se identifica con número de carné 2006-11632, perteneciente a la carrera de Ingeniería Mecánica, el cual lleva por título **"ESTRUCTURAS DE SOLIDIFICACIÓN DEL ALUMINIO FUNDIDO ARTESANALMENTE"**, asesorado por el suscrito.

El trabajo se desarrolló dentro del "Proyecto de Investigaciones Metalúrgicas" de la Escuela de Ingeniería Mecánica y cuenta con mi total aprobación, por cumplir con los objetivos fundamentales de las líneas de investigación de dicha Escuela, aportando resultados de suma utilidad en beneficio, tanto de la infraestructura científico-técnica del país, cuanto del desarrollo de la industria de la fundición artesanal. Por tal motivo, estoy solicitándole darle el trámite correspondiente.

Sin otro particular, me suscribo de usted, con las muestras de mi consideración más distinguida,

Dr. Sc. Ing. Roberto Alejandro Aguilar Rivas  
Colegiado No. 862

*Ing. Roberto A. Aguilar Rivas*

ESCUELAS: Ingeniería Civil, Ingeniería Mecánica, Ingeniería Mecánica Industrial, Ingeniería Química, Ingeniería Mecánica Eléctrica, Escuela de Ciencias, Regional de Ingeniería Sanitaria Recursos Hidráulicos (ERIS), Posgrado Maestría en Sistemas Mención Construcción y Mención Ingeniería Vial. Carreras: Ingeniería Electrónica, Ingeniería en Ciencias y Sister Licenciatura en Matemática, Licenciatura en Física. Centros: de Estudios Superiores de Energía y Minas (CESEM), Guatemala, Ciudad Universitaria, Zona 12, Guatemala, Centroaméric

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA

El Coordinador del Área de Materiales de la Escuela de Ingeniería Mecánica, luego de conocer el dictamen del Asesor y habiendo revisado en su totalidad el trabajo de graduación titulado ESTRUCTURAS DE SOLIDIFICACIÓN DEL ALUMINIO FUNDIDO ARTESANALMENTE del estudiante Sergio Alejandro López Rodríguez, recomienda su aprobación.

ID Y ENSEÑADA A TODOS

Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez  
Coordinador de Área



Guatemala, noviembre de 2012.

/behei.

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA**



**FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA**

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, después de conocer el dictamen del asesor, con la aprobación del Coordinador del Área Materiales de Ingeniería, al Trabajo de Graduación titulado ESTRUCTURAS DE SOLIDIFICACIÓN DEL ALUMINIO FUNDIDO ARTESANALMENTE del estudiante Sergio Alejandro López Rodríguez, procede a la autorización del mismo.

**ID Y ENSEÑAD A TODOS**

  
Ing. Julio César Campos Paiz  
**DIRECTOR**



Guatemala, febrero de 2013

JCCP/behde

Universidad de San Carlos  
De Guatemala



Facultad de Ingeniería  
Decanato

Ref. DTG.062.2013

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al trabajo de graduación titulado: **ESTRUCTURAS DE SOLIDIFICACIÓN DEL ALUMINIO FUNDIDO ARTESANALMENTE**, presentado por el estudiante universitario: **Sergio Alejandro López Rodríguez** autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos  
Decano



Guatemala, febrero de 2013

/cc

## **ACTO QUE DEDICO A:**

<b>Dios</b>	Por darme el orgullo de ser guatemalteco.
<b>Mi padre</b>	Víctor López. Por darme el privilegio de ser su hijo y ser mí ejemplo a seguir.
<b>Mi madre</b>	Tomasa Rodríguez. Por darme el privilegio de ser su hijo y ser mí motivación de cada día.
<b>Mis hermanos y hermanas</b>	Estuardo, Lourdes, Adrian, Amarilis López Rodríguez. Por darme el honor de ser uno de ellos.
<b>Mis catedráticos</b>	Por brindarme sin recelo sus conocimientos.
<b>Mis amigos y compañeros</b>	Por brindarme su amistad y compañía durante el desarrollo de mi formación.
<b>Mis compañeros laborales</b>	Por obsequiarme la bendición de sus consejos y amistad.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Mi familia</b>	Por nunca dejar de confiar en mí.
<b>La Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por darme la oportunidad de ser mi casa de estudios.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por los conocimientos adquiridos
<b>Escuela de Ingeniería Mecánica</b>	Por haberme formado en la profesión.
<b>Ingeniero Roberto Alejandro Aguilar Rivas</b>	Por la motivación de dar lo mejor de sí.
<b>Ingeniero Hugo Ramírez</b>	Por su apoyo en el laboratorio de metalurgia.
<b>Ingeniero Víctor Ruiz</b>	Por su confianza y apoyo en el laboratorio de maquinado.
<b>Ingeniero Luis Coronado</b>	Por sus sabios consejos.
<b>Ingeniero César García</b>	Por su apoyo en el Centro de Investigaciones.

<b>Los ingenieros Carlos Cabrera y Jorge Muñoz</b>	Por su apoyo en el maquinado de muestras.
<b>Héctor Méndez</b>	Por su gran colaboración en el desarrollo de la investigación.
<b>José Jiménez García</b>	Por la gran idea del horno.
<b>Diego Mendoza</b>	Por su apoyo en las prácticas de fundición.
<b>Berny Pérez</b>	Por su colaboración en la manufactura del horno.
<b>SIDEGUA S.A.</b>	Por el material brindado.
<b>Carlos Ramos</b>	Por darme la primera oportunidad laboral.
<b>Colegio YULIMAY PC</b>	Por la oportunidad laboral que me ha brindado.
<b>Instituto Tecnológico Universitario Guatemala Sur</b>	Por la oportunidad de crecimiento profesional que me ha brindado.
<b>Mis compañeros universitarios</b>	Por compartir cada momento a mi lado.
<b>Mis compañeros laborales</b>	Por darme la dicha de su amistad.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	IX
GLOSARIO .....	XI
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS / HIPÓTESIS.....	XV
INTRODUCCIÓN .....	XVII
1. ANTECEDENTES .....	1
1.3. El proceso de la fundición.....	6
2. NOCIONES BÁSICAS DE SOLIDIFICACIÓN DE METALES Y ALEACIONES .....	9
2.1. Cristalización de los metales .....	9
2.1.1. Tamaño del grano.....	12
2.1.2. Influencia de las impurezas .....	13
2.1.3. Modificación.....	14
2.1.4. Solidificación de soluciones sólidas.....	15
2.2. Las estructuras de solidificación de los lingotes.....	17
2.2.1. Contracción.....	20
3. DISEÑO Y FABRICACIÓN DE EQUIPO PARA FUNDICIÓN Y MANIPULACIÓN DE ALUMINIO Y SUS ALEACIONES.....	23
3.1. Horno eléctrico de resistencia para fundición .....	23
3.1.1. Principios de funcionamiento .....	23
3.1.2. Diseño y construcción del horno.....	23

	3.1.2.1.	Factores de relevancia .....	24
	3.1.2.2.	Dimensiones.....	27
	3.1.3.	Materiales.....	33
	3.1.4.	Colocación y unión de las partes.....	40
3.2.		Elemento calefactor.....	40
	3.2.1.	Instalación eléctrica.....	43
3.3.		Crisoles para fundición.....	44
3.4.		Diseño de pinzas y vertedor para crisol .....	45
3.5.		Rendimiento térmico del horno .....	47
3.6.		Diseño y construcción de lingoteras para fundición .....	48
	3.6.1.	Lingotera de grafito .....	49
	3.6.2.	Lingotera de acero de medio carbono.....	51
	3.6.3.	Lingotera de tubo de acero de bajo carbono.....	52
	3.6.4.	Lingotera tipo caja de arena .....	52
4.		FUNDICIÓN DE LINGOTES Y ANÁLISIS METALOGRAFICO.....	55
	4.1.	Lingotes.....	55
	4.2.	Metodología experimental de la fundición artesanal .....	56
	4.2.1.	Obtención de la materia prima. ....	57
	4.2.2.	Fundición de aluminio de alta pureza.....	59
	4.2.2.1.	Fundición de las aleaciones .....	61
	4.2.3.	Proceso de colada de lingotes .....	64
	4.2.4.	Proceso de corte .....	71
	4.2.5.	Proceso de refrentado.....	72
	4.2.6.	Proceso de pulido.....	72
	4.2.7.	Proceso de ataque químico.....	74
	4.2.8.	Ataque y práctica de ataque.....	75
	4.2.9.	Reacción química .....	82
	4.2.10.	Fotografía .....	83

4.3.	Resultados experimentales y análisis metalográfico .....	84
4.3.1.	Aluminio de alta pureza .....	85
4.3.2.	Aleaciones aluminio-cobre.....	97
4.3.2.1.	Aluminio 1% cobre.....	98
4.3.2.2.	Aluminio 3% cobre.....	103
4.3.2.3.	Aluminio 5% cobre.....	107
4.3.3.	Análisis comparativo de los resultados.....	111
4.3.3.1.	Efecto del coeficiente de transferencia calórica en la interfaz metal-molde, hi. Modificación del sustrato.....	112
4.3.3.2.	Efecto de la composición química. Aumento de la concentración de soluto .....	115
CONCLUSIONES .....		121
RECOMENDACIONES.....		127
BIBLIOGRAFÍA.....		129



# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1.	Variación de la energía libre E del metal líquido y sólido en función de la temperatura .....	11
2.	Curvas de enfriamiento del metal puro.....	11
3.	Distribución de las zonas granulares en un lingote .....	20
4.	Proceso de la contracción en la fundición .....	22
5.	Diseño y formación del dodecágono en el cuerpo del horno.....	26
6.	Base del horno .....	28
7.	Vista del ladrillo cortado con sus zanjás y el ángulo para unir los doce ladrillos .....	29
8.	Vistas ortogonales del ladrillo cortado.....	31
9.	Cuerpo del horno .....	32
10.	Tapa del horno .....	32
11.	Horno eléctrico para fundición.....	35
12.	Tapa del horno y tapón tipo visor .....	36
13.	Construcción de la tapa del horno.....	37
14.	Ladrillos para el cuerpo del horno .....	37
15.	Constitución del cuerpo del horno.....	38
16.	Cuerpo del horno y cemento refractario.....	38
17.	Construcción del cuerpo del horno.....	39
18.	Construcción de la base del horno.....	39
19.	Aislamiento en las juntas de las partes .....	40
20.	Elemento calefactor.....	43
21.	Crisol de grafito .....	45

22.	Pinzas para crisol de 1 kg.....	46
23.	Vertedor .....	47
24.	Niple de grafito.....	49
25.	Maquinado de grafito .....	50
26.	Lingoteras de grafito .....	50
27.	Mecanizado de lingotera de acero de medio carbono .....	51
28.	Mecanizado de lingotera de tubo de acero de bajo carbono .....	52
29.	Lingotera tipo caja de arena .....	53
30.	Lingotes .....	56
31.	Horno de piso para fundición .....	59
32.	Proceso de fundición en el horno experimental .....	60
33.	Materiales para aleación 1% cobre.....	63
34.	Diagrama de equilibrio aluminio-cobre.....	64
35.	Fundición en molde de grafito.....	65
36.	Fundición en molde de acero al medio carbono .....	66
37.	Fundición en molde hecho de tubo de acero de bajo carbono .....	66
38.	Fundición en molde de arena .....	67
39.	Proceso de extracción del crisol .....	69
40.	Corte longitudinal de un lingote .....	72
41.	Proceso de refrentado .....	73
42.	Proceso de pulido con papel esmeril. ....	74
43.	Ataque experimental con soda caustica. ....	79
44.	Ejecución del ataque con el reactivo de <i>poulton</i> 's.....	79
45.	Limpieza del lingote .....	80
46.	Método de fotografía.....	84
47.	Lingote número uno .....	86
48.	Lingote número dos .....	87
49.	Lingote número tres .....	88
50.	Lingote número cuatro .....	89

51.	Lingote número cinco .....	92
52.	Lingote número seis .....	93
53.	Lingote número siete.....	95
54.	Lingote número ocho.....	96
55.	Lingote número nueve.....	97
56.	Lingote uno. 1% cobre .....	100
57.	Lingote número dos. 1% cobre .....	101
58.	Lingote número tres. 1% cobre .....	102
59.	Lingote cuatro. 1% cobre .....	103
60.	Lingote uno. 3% cobre .....	105
61.	Lingote dos. 3% cobre.....	106
62.	Lingote tres. 3% cobre .....	106
63.	Lingote cuatro. 3% cobre .....	107
64.	Lingote uno. 5% cobre .....	108
65.	Lingote dos. 5% cobre.....	109
66.	Lingote tres. 5% cobre .....	110
67.	Lingote cuatro. 5% cobre .....	111
68.	Comparación lingotes alta pureza.....	113
69.	Comparación aleaciones aluminio 1% cobre .....	114
70.	Comparación aleaciones aluminio 3% cobre .....	115
71.	Comparación aleaciones aluminio 5% cobre .....	116
72.	Comparación fundiciones en molde de grafito .....	117
73.	Comparación fundiciones en molde de acero de medio carbono.....	118
74.	Comparación fundiciones en molde hecho de tubo de acero de bajo carbono .....	119
75.	Comparación fundiciones en molde de arena.....	120

## TABLAS

I.	Propiedades químicas del aluminio .....	3
II.	Valores típicos de contracción para algunos metales .....	22
III.	Datos técnicos del horno para fundición .....	44
IV.	Incremento de la temperatura en función del tiempo .....	48
V.	Reactivos utilizados para la revelación de estructuras a nivel macroscópico.....	80
VI.	Aplicabilidad de reactivos en dependencia del tipo de aleación utilizada.....	82

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>A</b>	Amperio
<b>cm</b>	Centímetro
<b>hi</b>	Coefficiente de transferencia calórica
<b>CA</b>	Corriente alterna
<b>HB</b>	Dureza Brinell
<b>°C</b>	Grado centígrado
<b>K</b>	Grado kelvin
<b>GPa</b>	Gigapascal
<b>kg</b>	Kilogramo
<b>kJ</b>	Kilojoule
<b>MPa</b>	Megapascal
<b>m</b>	Metro
<b>ml</b>	Mililitro
<b>mm</b>	Milímetro
<b>mol</b>	Mol
<b>nm</b>	Nanómetro
<b>Ω</b>	Omh
<b>pm</b>	Picómetro
<b>%</b>	Porcentaje
<b>S</b>	Siemens
<b>U</b>	Unidades atómicas
<b>BTU</b>	Unidad térmica británica
<b>W</b>	Watt



## GLOSARIO

<b>Chapa</b>	Medida del espesor de una lámina fundamentada en fracciones de pulgada, por ejemplo, chapa 26 es igual a 1/26 de pulgada, es decir 0,9769 milímetros.
<b>Coeficiente de dilatación lineal</b>	Se llama coeficiente de dilatación lineal de un cuerpo sólido al alargamiento que experimenta la unidad de longitud de este cuerpo, medida a cero grados centígrados, cuando se eleva su temperatura un grado centígrado.
<b>Coeficiente de transferencia calórica</b>	Aplicado a la metalurgia es un valor experimental que establece que rápido o lento es el proceso de extracción de energía del metal durante su solidificación hacia las paredes del molde, varía en función de las características de composición química, rugosidad, dimensiones y refractariedad del material del cual está hecho el molde.
<b>Dendrita</b>	Cristal metálico, producido generalmente por solidificación y caracterizado por una estructura parecida a la de un árbol de muchas ramas.
<b>Erosión térmica</b>	Desgaste continuo debido a un cambio en la temperatura que dilatan los elementos cerámicos hasta provocar su ruptura o agrietamiento.

<b>Presión metalostática</b>	Presión debida a la altura de colada del metal líquido sobre el molde en general. Cuando el molde está lleno se genera una presión que se ejerce igualmente en todas direcciones y depende de la profundidad del punto considerado bajo el nivel libre de líquido, así como del peso específico de este.
<b>Rechupe</b>	Vacio que aparece en piezas coladas, como consecuencia de la contracción debida a la solidificación.
<b>Refractario</b>	Que resiste a la acción del fuego o calor sin cambiar de estado o descomponerse.
<b>Refrentado</b>	Procedimiento realizado en una probeta de ensayo sobre un material o herramienta para lograr una superficie plana.
<b>Sustrato</b>	Estrato que subyace a otro y que puede influir sobre este y sus efectos.

## RESUMEN

En la presente investigación, se analiza la forma en que las estructuras de solidificación del aluminio de alta pureza y las aleaciones Al-Cu, con concentraciones de 1, 3 y 5 por ciento cobre, coladas con 50 grados centígrados de sobrecalentamiento ( $\Delta T$ ), cambian en función de los parámetros que rigen el proceso de la fundición artesanal.

Para lo anterior, se diseñó una metodología experimental, basada en las características de la fundición artesanal, la que en esencia está constituida por: obtención de materia prima de chatarras de aluminio de alta pureza, preparación de las aleaciones aluminio-cobre, diseño y fabricación de moldes permanentes y no permanentes, diseño y fabricación de un horno de resistencia eléctrica, obtención de lingotes de las aleaciones señaladas, por medio de coladas en los respectivos moldes, seccionamiento de los lingotes, pulido de las superficies a observar, ataque químico para revelación de estructuras de solidificación, observación y fotografía.

La falta del equipo de fusión necesario para la obtención de muestras, motivó el diseño y la construcción de un horno con fines experimentales, el cual llenó todas las expectativas del desarrollo del proceso de fundición artesanal.

Mediante la metodología propuesta, el autor buscó los cambios de las estructuras de solidificación en las muestras obtenidas, mediante la colada de probetas en forma de lingotes representativos, para su análisis macroscópico.

Los resultados revelan que, las estructuras de solidificación del aluminio puro, cuando la presión metalostática y el sobrecalentamiento de colada se mantienen relativamente constantes a la manera artesanal, resultan primordialmente de la capacidad de extracción calórica del molde sobre el cual se están colando.

Para las aleaciones se observa que la interacción de un elemento, en este caso cobre, cambia las estructuras observadas, por lo que, además del coeficiente de extracción calórica, la composición química de la aleación produce cambios sustanciales en los resultados.

Con estas diferencias apreciadas, el autor concluye aprobando la hipótesis planteada, proponiendo una metodología de fundición artesanal en la colada del aluminio y sus aleaciones.

# OBJETIVOS

## General

Identificar las características metalográficas de las estructuras de solidificación del aluminio y de aleaciones aluminio-cobre fundidos de forma artesanal.

## Específicos

1. Proponer un método práctico para la realización de fundición de aluminio dentro del Laboratorio de Metalurgia de la Escuela de Ingeniería Mecánica.
2. Definir métodos para la elaboración de lingotes para pruebas metalográficas y ensayos mecánicos.
3. Identificar las estructuras de solidificación de las piezas fundidas artesanalmente.
4. Establecer técnicas para el control de las estructuras de solidificación de las aleaciones fundidas.
5. Analizar las diferencias entre las estructuras de solidificación, cuando se varían las condiciones o parámetros de colada.

## **HIPÓTESIS**

Las macro-estructuras de solidificación de las piezas fundidas artesanalmente, de aleaciones aluminio-cobre, cuando se mantienen constantes la presión metalostática y los sobre-calentamientos de colada, dependen fundamentalmente del coeficiente de transferencia calórica en la interfaz metal molde y de la concentración de soluto.

## INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se realiza dentro de las líneas de investigación de la Escuela de Ingeniería Mecánica, específicamente como uno de los trabajos de inicio del proyecto de investigaciones metalúrgicas, en lo referente al tema de solidificación y fundición, tratando de coadyuvar al desarrollo científico-tecnológico del país.

En Guatemala, como en el resto de países del istmo, se emplea una considerable cantidad de productos de fundición artesanal, que van, entre otros, desde la fabricación de molinos de nixtamal (maíz cocido), para la producción de tortillas –consumo y sustento diario de un alto porcentaje de familias de escasos recursos-, hasta la construcción de trapiches para la molienda artesanal de la caña de azúcar y grandes masas para su utilización en los ingenios azucareros. Por consiguiente, el manejo de técnicas que tiendan a mejorar las calidades de los referidos productos, constituye un beneficio fundamental en las variables socioeconómicas que sustentan el desarrollo de la región.

En este sentido, las líneas de investigación que pueda emprender la Escuela de Ingeniería Mecánica en este tema específico, constituirán un gran apoyo al país en aras del referido desarrollo socioeconómico.<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> AGUILAR RIVAS, Roberto Alejandro. Proyecto de Investigaciones Metalúrgicas y El proceso de solidificación de metales y aleaciones durante los ensayos de fluidez lineal (manuscrito). 2011.

El término de metales ligeros tradicionalmente ha sido empleado para el aluminio y el magnesio, porque son usados frecuentemente para reducir el peso de componentes y estructuras. El titanio y el berilio también pueden ser incluidos dentro de este grupo de materiales. Éstos poseen una baja densidad comparados con otros metales como el acero, razón por la cual en la actualidad son ampliamente utilizados en los campos de la construcción, el transporte a nivel espacial y vehicular, construcción de contenedores y empaques, maquinaria y equipo, y, en el caso del aluminio, además de los destinos citados se emplea también para la fabricación de conductores eléctricos.

El aluminio no fue utilizado a nivel industrial hasta el siglo XIX, lo que lo hace el metal de uso masivo más recientemente aplicado. Este metal era muy difícil de disociar de su forma mineral, hasta que el desarrollo tecnológico impulsó las mejoras en los procesos de generación de energía eléctrica, fuente primordial para la obtención del aluminio.

Una pieza fundida, representa la fase final de una serie de procesos metalúrgicos que se mantienen casi inalterables desde que se descubrió la fusión y colada de los metales. En estos procesos hay tres fases que desde la Edad de Bronce han marcado las pautas de lo que es una pieza fundida. Estas fases son Moldeo, Fusión y Colada.

La fundición artesanal, realizada mediante procesos que no conllevan exigencias tan estrictas como los de nivel industrial, que incluyen las grandes producciones en serie, tal es el caso de las principales partes automotrices, como bloques, culatas, pistones, entre otras, es una de las ramas de los trabajos metalúrgicos que forman parte de la industria guatemalteca, en donde uno de los principales metales empleados lo constituye el aluminio.

En Guatemala, la materia prima utilizada para la producción de aluminio la constituyen las chatarras de dicho material, siendo la más utilizada la proveniente de envases para bebidas, considerada como de alta pureza.

Por otro lado, ha sido demostrado a través del desarrollo tecnológico, que las propiedades mecánicas en general, se asocian a las estructuras y subestructuras presentes en los metales y sus aleaciones. En tal sentido, es de vital importancia el conocimiento de las estructuras resultantes durante los procesos de fundición y con qué variables externamente controlables están asociadas.

Aguilar Rivas, Roberto A., 2011, hace un análisis exhaustivo de los parámetros que regulan el proceso de solidificación de metales y aleaciones y sus efectos sobre las estructuras y subestructuras resultantes, a través de ensayos de fluidez y análisis metalográfico de las probetas obtenidas durante los mismos.

En el presente trabajo, se investigan empíricamente las macro estructuras resultantes de los procesos de fundición artesanal en aluminio de alta pureza y aleaciones con tenores crecientes de 1, 3 y 5 por ciento de cobre, con el fin de determinar por un lado, el efecto de la concentración de soluto en las macro estructuras de dichas aleaciones, y por otro lado el efecto, sobre las mismas del coeficiente de transferencia calórica en la interfaz metal molde, a través de la variación de los sustratos.

De esta manera se espera contribuir al manejo de tales variables en la mejora de la calidad de las piezas fundidas producidas en el país artesanalmente.



## 1. ANTECEDENTES

El aluminio es el metal, de uso común, más recientemente descubierto. Este metal sólo existe en la naturaleza en combinación con otros materiales como silicatos y óxidos.

El aluminio sólo se ha producido comercialmente durante 144 años, esto indica que es un metal muy joven. El hombre ha usado bronce, plomo y estaño por miles de años; a pesar de esto, el aluminio los ha ido reemplazando poco a poco. El mineral que lo contiene en su estado natural, es la bauxita, para cuya recuperación se han desarrollado varios procesos que corresponden a la metalurgia extractiva por medio de procesos electroquímicos que requieren de grandes cantidades de energía eléctrica, soluciones acidas, calor y compuestos alcalinos (Aparicio, Manero, Rodríguez, Arandes y Planell, Aleaciones Ligeras, 2001).

Además, este metal, se puede llegar a reprocesar un número infinito de veces a través del reciclaje de componentes hechos del mismo. Tanto el aluminio puro como las aleaciones de éste presentan una gran resistencia a la corrosión debido a la formación de una capa fina (aproximadamente de 4 a 5 micrómetros de espesor) de óxido de aluminio sobre la superficie del metal. Esta capa de óxido constituye una película impermeable que impide la difusión del oxígeno hacia el metal base, haciendo al aluminio y sus aleaciones muy resistentes a la corrosión.

La resistencia química del aluminio depende de la composición química y concentración de la solución, así como de la pureza del metal. Aleantes como el

silicio o el zinc hasta en un 1 por ciento tienen un efecto muy débil sobre la resistencia a la corrosión, mientras que aleantes de elevado número atómico, como el cobre y el níquel, con variaciones del 0,1% mejoran fuertemente su resistencia.

Según el efecto que tienen los aleantes sobre la resistencia estos se pueden clasificar en:

- Elementos que mejoran la resistencia a la corrosión: cromo, magnesio y manganeso.
- Elementos que mejoran la resistencia mecánica: cobre, níquel, estaño, plomo y cobalto.
- Elementos que tienen poca influencia: silicio, titanio, zinc, antimonio, cadmio y circonio.

El aluminio es estable al aire y resistente a la corrosión por el agua de mar, a muchas soluciones acuosas y otros agentes químicos. El metal fundido no debe entrar en contacto con herramientas ni con contenedores húmedos. A temperaturas altas, reduce muchos compuestos que contienen oxígeno, sobre todo los óxidos metálicos (Aparicio, Manero, Rodríguez, Arandes y Planell, Aleaciones Ligeras, 2001).

Las propiedades físicas más destacables del aluminio y sus aleaciones son: poco peso, buena resistencia a la corrosión y conductividad elevada, tanto térmica como eléctrica.

Tabla I. **Propiedades químicas del aluminio**

Símbolo químico	Al
Número Atómico	13
Período	3
Aspecto	Plateado
Bloque	P (ordenado según tabla periódica)
Densidad	2 698,4 Kg/m <sup>3</sup> (kilogramo/ metro cúbico)
Masa atómica	26,981 153 86 U
Radio medio	125 pm (picómetro)
Radio atómico	118
Radio covalente	118 pm (picómetro)
Configuración electrónica	(Ne) 3s <sup>2</sup> 3p <sup>1</sup>
Electrones por capa	2, 8, 3
Estados de oxidación	3 <sup>2</sup>
Óxido	Anfótero
Estructura cristalina	Cúbica centrada en las caras
Estado	Sólido
Punto de fusión	933,47 K (grados Kelvin)
Punto de ebullición	2 792 K (grados Kelvin)
Calor de fusión	10,79 kJ/mol (kilo Joule/ mol)
Presión de vapor	2,42*10 <sup>-6</sup> Pa a 577 K (Pascales a grados Kelvin)
Volumen molar	10*10 <sup>-6</sup> m <sup>3</sup> /mol (metros cúbicos/ mol)
Electronegatividad	1,61
Calor específico	900 J/(K*Kg) (Joule/ Kelvin kilogramo)
Conductividad eléctrica	37,7*10 <sup>6</sup> S/m (Siemens/ metro)
Conductividad térmica	237 W/(K*m) (Watt/ Kelvin metro)

Fuente: [Http: //elementos.org.es/aluminio](http://elementos.org.es/aluminio). Consultada 11 de marzo de 2012.

El aluminio es un material blanco brillante, que, una vez pulido, se asemeja en su aspecto a la plata. Cristalizando en una red cúbica centrada en las caras, su peso específico es de 2 699 kilogramo por metro cúbico, casi tres veces más pequeño que el del hierro (7 870 kilogramo por metro cúbico) y

---

<sup>2</sup> El estado de oxidación se refiere a la forma en que los elementos pueden llegar a interactuar con el oxígeno, en el caso del aluminio este cede 3 de sus electrones en su último nivel de valencia para formar el compuesto llamado óxido de aluminio.

ligeramente mayor que el del magnesio (1 740 kilogramo por metro cúbico). Su conductividad eléctrica es un 60 por ciento superior a la del cobre y 3,5 veces la del hierro. Su punto de fusión es de 660 grados centígrados, con una temperatura de ebullición de 2 450 grados centígrados. Este punto de fusión, relativamente bajo, facilita su conformación mediante fusión y moldeo.

Tiene una resistencia a la tracción de 160 a 200 mega pascales en estado puro y de 1 400 a 6 000 mega pascales en estado aleado, el límite elástico es de 98 mega pascales, una dureza de 15 en la escala Brinell; la conductividad térmica es de 235 watt por metro kelvin, tiene una resistividad eléctrica de 0,026 55 ohm milímetro cuadrado por metro, y su coeficiente de dilatación lineal es de  $1/2,36 \cdot 10^5$  kelvin (Aparicio, Manero, Rodríguez, Arandes y Planell, Aleaciones Ligeras, 2001).

El principal problema del aluminio es su baja resistencia mecánica. Para mejorar estas propiedades se alea con otros metales, lo que permite realizar sobre él operaciones de fundición y forja, así como la extrusión del material. El módulo de elasticidad del aluminio es relativamente bajo y sensible al grado de impurezas de éste. El módulo elástico E es de 71 gigapascal.

Mecánicamente es un material blando (Escala de Mohs<sup>3</sup>: 2-3-4) y maleable. En estado puro tiene un límite de resistencia en tracción de 160 a 200 megapascal. Todo ello le hace adecuado para la fabricación de cables eléctricos y láminas delgadas, pero no como elemento estructural. Por este motivo el aluminio y sus aleaciones se tratan térmicamente para mejorar sus propiedades mecánicas.

---

<sup>3</sup> La escala de Mohs se basa en una serie de elementos con sus respectivas durezas las cuales van desde el talco hasta el diamante. En el caso del aluminio se tiene que 2 es comparable con el yeso, 3 con la Calcita y 4 con la Fluorita.

También de esta forma se utiliza como soldadura. Se tiene además que los valores del coeficiente de poisson varían de 0,32 a 0,36 y también que el módulo de rigidez puede llegar de 17 gigapascal a 26,2 gigapascal (Aparicio, Manero, Rodríguez, Arandes y Planell, Aleaciones Ligeras, 2001).

La base del presente estudio se centra en las aleaciones aluminio cobre, es por ello de gran importancia conocer como estas aleaciones se pueden llegar a constituir.

La máxima solubilidad del cobre en aluminio es de 5,65 por ciento a 548 grados centígrados y luego decrece hasta 0,45 por ciento a 300 grados centígrados; por tanto, las aleaciones que contienen entre 2,5 por ciento y 5 por ciento de cobre responderán al tratamiento térmico endureciéndose por envejecido.

La más vieja de las aleaciones al aluminio tratables térmicamente es la de duraluminio (2017), que contiene 4 por ciento de cobre. Esta aleación se emplea bastante para remaches en la construcción de aviones (Sidney H., Avner, Introducción a la metalurgia física, 1988).

También se tiene que la máxima resistencia de las aleaciones aluminio cobre es cuando el cobre se encuentra dentro del rango de 4 por ciento a 6 por ciento (*Metals Handbook, Fractography*, 1987).

La única aleación binaria aluminio cobre fundida es la 195, que contiene 4 por ciento de cobre. Con el tratamiento térmico adecuado, esta aleación tiene una excelente combinación de resistencia y ductilidad. La aleación 195, fundida en molde de arena, se utiliza para volantes y cajas para ejes traseros, ruedas

para camión y avión, y para el cárter de motores (Sidney H., Avner, Introducción a la metalurgia física, 1988).

El calcio se puede usar con el zinc, aleado con el aluminio, y formar aleaciones súper plásticas; el cerio se puede usar para incrementar la fluidez y reducir la adherencia al molde; el cobalto es usado para las aleaciones aluminio-silicio-hierro para mejorar la resistencia y la elongación, el iridio mejora las propiedades de endurecimiento de las aleaciones aluminio-cobre.

### **1.3. El proceso de la fundición**

En la presente investigación sólo se hará un análisis generalizado del proceso de fundición debido a que el objetivo primordial se centra en las estructuras resultantes y el análisis de las variables ingenieriles que actúan durante el proceso, como un aporte al mejoramiento de la fundición artesanal.

La fundición o fusión, se puede definir como el proceso que, mediante adición de energía térmica, cambia el estado de un metal de sólido a líquido. En el proceso de fundición el metal fundido fluye por gravedad u otra fuerza dentro de un molde donde se solidifica y toma la forma de la cavidad del molde. El término fundición se aplica también a la parte resultante de este proceso. Es uno de los más antiguos procesos de formado que se remonta 6 mil años atrás. El principio de la fundición es simple: se funde metal, se vacía en un molde y se deja enfriar.

Existen diversos métodos para la fundición de formas, lo cual hace de este proceso uno de los más versátiles en manufactura. Sus posibilidades y ventajas son las siguientes:

- La fundición se puede usar para crear partes de compleja geometría, incluyendo formas externas e internas.
- Algunos procesos de fundición pueden producir partes de forma neta que no requieren operaciones subsecuentes para llenar los requisitos de la geometría y dimensiones de la parte.
- Se puede usar la fundición para producir partes muy grandes.
- Algunos métodos de fundición son altamente adaptables a la producción en masa.

No obstante, también hay desventajas asociadas con la fundición y sus diferentes métodos. Estas incluyen las limitaciones de algunos procesos en las propiedades mecánicas como porosidad, baja precisión dimensional y acabado deficiente de la superficie, también hay riesgos en la seguridad de los trabajadores durante el procesamiento y problemas ambientales.

Las partes de fundición fluctúan en tamaño, desde pequeños componentes que pesan solamente unas cuantas onzas hasta grandes productos de más de 100 toneladas (Groover, Mikel, Fundamentos de manufactura moderna, 1997).

La revisión de este proceso empieza con el molde. El molde contiene una cavidad cuya forma geométrica determina la forma de la parte a fundir. La cavidad debe diseñarse de forma y tamaño ligeramente sobredimensionado, esto permitirá la contracción del metal durante la solidificación y enfriamiento. Cada metal sufre diferente porcentaje de contracción, por tanto, si la precisión en las dimensiones de la pieza es crítica, la cavidad debe diseñarse para el metal particular que se va a fundir. Los moldes se hacen de varios materiales

que incluyen arena, yeso, cerámica y metal. Los procesos de fundición se clasifican frecuentemente de acuerdo a los diferentes tipos de moldes.

En una operación de fundición, se calienta primero el metal a una temperatura lo suficientemente alta para transformarlo completamente al estado líquido. Después se vierte directamente en la cavidad del molde. En un molde abierto, el metal líquido se vacía simplemente hasta llenar la cavidad abierta. En un molde cerrado, existe una vía de paso llamada sistema de vaciado que permite que el flujo del metal fundido vaya desde fuera del molde hasta la cavidad. El molde cerrado es la forma más importante de producción en operaciones de fundición.

Los procesos de fundición se dividen en dos grandes categorías de acuerdo al tipo de molde que se usa: 1) fundición en molde desechable y 2) fundición en molde permanente (Groover, Mikel, Fundamentos de manufactura moderna, 1997).

El principal factor que define la calidad de una buena fundición, es la colabilidad que no es más que la propiedad que tienen los metales de llenar totalmente las cavidades de los moldes sin producir ningún tipo de defecto en las piezas obtenidas. Por otro lado, la variable más importante que define la calidad de la colabilidad, es la propiedad de fluidez, que constituye un parámetro ingenieril que se mide a través de diferentes tipos de ensayos cuya característica común es la siguiente: el metal líquido es forzado a fluir en un canal de pequeña sección transversal y el largo obtenido, una vez que el metal ha dejado de fluir, es la medida de dicha propiedad. Los resultados de los ensayos se representan en un gráfico  $L_f = f(t)$ , en donde "L<sub>f</sub>" representa la longitud de la fluidez y "t" el tiempo empleado hasta que el flujo para (Aguilar Rivas, Roberto A., Introducción a la metalurgia, 2011).

## 2. NOCIONES BÁSICAS DE SOLIDIFICACIÓN DE METALES Y ALEACIONES

### 2.1. Cristalización de los metales

El paso del metal del estado líquido al sólido se denomina cristalización primaria. Esta transcurre como resultado del paso a un estado más estable en sentido termodinámico, con una energía libre  $E$  menor. Si la transformación transcurre con una variación insignificante del volumen, entonces  $\Delta E = \Delta H - T\Delta S$  donde  $\Delta H$  es la variación de la energía libre total del sistema,  $T$  es la temperatura absoluta y  $\Delta S$  es la variación de la entropía.

La variación de la energía libre del metal fundido y sólido en función de la temperatura se muestra en la figura 1. A la temperatura  $T_f$  las magnitudes de las energías libres del metal en los estados líquido y sólido son iguales. La temperatura  $T_f$  corresponde a la temperatura de equilibrio de cristalización (o de fusión) para el material dado, durante la cual ambas fases (la líquida y la sólida) pueden existir simultáneamente. A una temperatura mayor de  $T_f$  es más estable el metal líquido, que posee menor reserva de energía libre, y por debajo de esta temperatura, es más estable el metal sólido.

El proceso de cristalización se desarrolla si existe una diferencia de energías libres, que aparece a causa de que la energía libre del metal sólido es menor que la del líquido. Por consiguiente, el proceso de cristalización transcurre solamente cuando el metal se sobre enfría a una temperatura menor que la temperatura de equilibrio  $T_f$ . La diferencia entre la temperatura  $T_f$  de

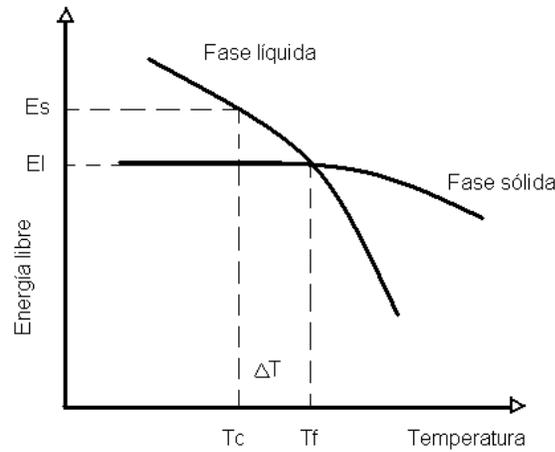
fusión y la temperatura  $T_c$ , a la cual transcurre el proceso de cristalización se llama grado de sobre enfriamiento, o solamente sobre enfriamiento.

En la figura 2 se muestra las así llamadas curvas de enfriamiento que caracterizan el proceso de cristalización de los metales puros al ser enfriados a distinta velocidad. Al ser enfriados lentamente el grado de sobre enfriamiento no es muy grande y el proceso de cristalización transcurre a una temperatura próxima a la de equilibrio (curva V1). A la temperatura de cristalización en la curva térmica se observa una plataforma horizontal (detenimiento de la caída de la temperatura), cuya formación se explica por el desprendimiento del calor latente de cristalización, o sea, que la solidificación de un metal puro sucede a temperatura constante ( $T=cte.$ ).

Durante la fundición del metal se absorbe calor, que se consume por los átomos en la adquisición de la energía de movimiento requerida, es decir, en la construcción de la red cristalina del metal. Este calor se denomina latente. En el proceso de cristalización tiene lugar un proceso inverso de liberación de energía (calor) en forma de calor latente de cristalización. Esta compensa el calor que se entrega al espacio circundante, y como consecuencia de esto en la curva térmica se puede observar un detenimiento de la caída de la temperatura.

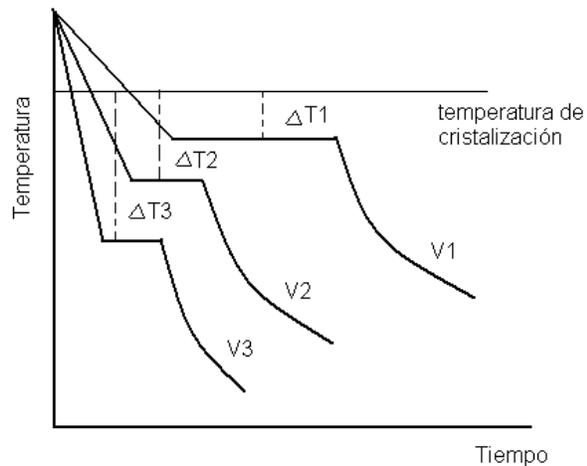
Al aumentar la velocidad de enfriamiento el grado de sobre enfriamiento aumenta (curvas V2 y V3) y el proceso de cristalización transcurre a temperatura bastante más baja que la de equilibrio de cristalización. El grado de sobre enfriamiento depende de la naturaleza y pureza del metal, pero generalmente ésta no supera los 10 grados a 30 grados. Mientras más puro es el metal líquido mayor es su tendencia al sobre enfriamiento.

Figura 1. **Variación de la energía libre E del metal líquido y sólido en función de la temperatura**



Fuente: YU. M., Lajtin. Metalografía y tratamiento térmico de los metales. p. 31.

Figura 2. **Curvas de enfriamiento del metal puro**



Fuente: YU. M., Lajtin. Metalografía y tratamiento térmico de los metales. p. 31.

El proceso de cristalización, como justamente lo determinó por primera vez D.K. Chernov, comienza con la aparición de formación de los núcleos cristalinos (centros de cristalización) y continúa con su crecimiento.

Al sobre enfriar la aleación hasta una temperatura inferior a  $T_f$ , en varias zonas de la aleación líquida se forman centros estables de cristalización aptos para el crecimiento.

Mientras los cristales que se han formado crecen libremente, ellos pueden tener una forma geométrica regular. Sin embargo, al chocar los cristales que han ido creciendo, su forma regular se perturba, puesto que en estas zonas cesa el crecimiento de las caras. Este crecimiento continúa sólo en aquellas direcciones donde existe acceso libre al líquido "alimentador". Como resultado, los cristales que se desarrollan y que al principio tenían una forma geométrica regular, después de la solidificación adquieren una forma irregular, por esta razón se les denomina cristalitas o granos (Yu M., Lajtin, Metalografía y tratamiento térmico de los metales, 1990).

Durante la solidificación de los metales y aleaciones debe tomarse en cuenta los factores determinantes que entran en juego tales como la formación espontánea de centros de núcleos cristalinos, así como la variación de la energía libre durante la formación de dichos núcleos en función de su magnitud a diferentes enfriamientos, al velocidad de crecimiento de los cristales, la influencia del grado de sobre enfriamiento y la velocidad de crecimiento; en tal sentido, los fenómenos que tienen lugar durante el proceso de cristalización son complejos y multiformes.

### **2.1.1. Tamaño del grano**

El tamaño de grano es un factor muy importante en las características finales de las piezas fundidas, mientras mayor es el número de centros de cristalización (núcleos cristalinos) y menor la velocidad de su crecimiento, más pequeño es el cristal que nace de un núcleo cristalino (grano del metal).

A un grado no muy elevado de sobre enfriamiento, por ejemplo  $\Delta T$ , el número de núcleos cristalinos es pequeño, pero la velocidad de crecimiento es grande. En estas condiciones se obtendrá un grano de gran tamaño. Al aumentar el grado de sobre enfriamiento, por ejemplo,  $\Delta T'$  y  $\Delta T''$ , el número de núcleos cristalinos crecerá en un grado mayor que la velocidad de su crecimiento y el tamaño del grano en el metal solidificado disminuirá.

El grano del metal influye enormemente en sus propiedades mecánicas, sobre todo en la ductilidad y plasticidad.

La magnitud del grano depende no sólo del grado de sobre enfriamiento de la colada. En el tamaño del grano influyen: la temperatura de sobre calentamiento de colada del metal líquido, su composición química y la presencia de impurezas extrañas en él. La agitación del metal que se está enfriando, la colada a presión, y el sacudimiento, aceleran notoriamente el proceso de cristalización y posibilitan la obtención de un grano fino; la presencia en el metal líquido de partículas cristalinas ajenas tiene un significado especial.

### **2.1.2. Influencia de las impurezas**

La nucleación en el metal líquido según el mecanismo descrito, se denomina espontáneo.

La formación espontánea de cristales en el metal líquido es sumamente dificultosa. Frecuentemente la fuente de formación de núcleos cristalinos son las partículas sólidas que siempre están presentes en la masa fundida. Si las partículas de las impurezas tienen una red cristalina parecida por su estructura al metal que se solidifica (las así llamadas impurezas isomorfas), entonces éstas desempeñan el papel de centros de cristalización ya formados.

La superficie de las partículas de impurezas absorbe átomos de la masa fundida, con la particularidad de que una estructura ordenada de la superficie sólida produce una distribución ordenada de los átomos absorbidos; en la superficie de la partícula sólida se forma algo parecido a un cristal de una capa; sobre él se van estratificando nuevos átomos, sucede el crecimiento del cristal.

Cuanto mayor es la cantidad de impurezas, tanto mayor es el número de centros de cristalización, y tanto menor es el tamaño del grano. Tal formación de núcleos cristalinos se denomina heterogénea. Las paredes del molde (lingotera) en la cual se vierte el metal líquido desempeñan el mismo papel que las inclusiones.

El proceso de cristalización comienza generalmente en las paredes del molde. En algunos casos las impurezas disueltas en el metal líquido también pueden disminuir el tamaño del grano y modificar su forma.

Durante la solidificación las impurezas se depositan en forma de una capa delgada sobre la superficie del cristal en crecimiento, lo que conduce a una disminución de la energía superficial. Por eso, tales impurezas se llaman superficialmente activas.

### **2.1.3. Modificación**

El uso de las impurezas para obtener un grano fino se denomina modificación. Durante la modificación en el metal fundido (aleación) se introduce cierta cantidad de sustancias especiales (inoculantes), que prácticamente sin modificar su composición química, disminuyen durante la cristalización el tamaño del grano y mejoran sus propiedades mecánicas.

Durante la fundición, la modificación generalmente se realiza introduciendo en la masa fundida adiciones que forman combinaciones de alta temperatura de fusión (carburos, nitruros, óxidos), que se cristalizan en primer lugar. Separándose en forma de partículas diminutas, estas combinaciones sirven de núcleos cristalinos. Durante la modificación de las aleaciones de aluminio en calidad de inoculantes se emplea el titanio, vanadio, circonio, manganeso; en calidad del acero, se emplean el aluminio, titanio y vanadio (Yu M., Lajtin, Metalografía y tratamiento térmico de los metales, 1990).

#### **2.1.4. Solidificación de soluciones sólidas**

En la realidad, la solidificación del líquido metálico se produce a velocidades finitas, lo que no permite una adecuada homogenización en la distribución del soluto, tanto en el sólido cuanto en el líquido. En consecuencia, se producen diferencias de concentración entre los distintos puntos del metal solidificado y, a este fenómeno, se le denomina segregación.

La segregación del soluto puede darse de las siguientes formas:

- Segregación normal: la segregación normal es el resultado directo de la expulsión del soluto delante de la interface que avanza. Corresponde a un incremento en la concentración de soluto, al disminuir la distancia al centro del molde. Se origina cuando el crecimiento del sólido se produce hacia el interior como en el caso de la zona columnar.
- Segregación intragranular: denominado *Coring* se produce en el crecimiento de los cristales de la zona central. Estos empiezan a crecer con la composición inicial del líquido, pero cuando éste cambia posición, como consecuencia de la expulsión del soluto, va aumentando

gradualmente el contenido de éste en el cristal. Así se forman granos, cuya composición varía desde el centro hacia afuera de los mismos.

- Segregación interdendrítica: cuando los cristales crecen dendríticamente, se produce también la segregación intragranular, con la característica de que su forma corresponde a la estructura dendrítica. El último líquido que solidifica entre las dendritas tendrá una concentración más alta que las partes formadas inicialmente. Una segregación interdendrítica es un caso especial de la segregación intragranular.
- Segregación inversa: este tipo de segregación consiste en que la concentración máxima de soluto se encuentra en la superficie de las piezas coladas o próximas a ella. Esto puede deberse al desplazamiento hacia afuera del líquido interdendrítico enriquecido en soluto, producido, probablemente, por las contracciones internas.
- Segregación por densidad: suele ocurrir, en las piezas fundidas, que la concentración de soluto es diferente en la parte superior e inferior de las mismas. Durante la fase líquida no puede existir segregación pero mientras ocurre el cambio de fase pueden ocurrir situaciones que pueden producirla, el movimiento vertical de la capa enriquecida de delante de la interface, como consecuencia de la diferencia de densidad debida al cambio de composición, producido por la expulsión de soluto es una de ellas. La otra sería debido a la flotación o el hundimiento de los cristales equiaxiales, como resultado de una diferencia de densidades entre ellos y el líquido que los rodea.

En las aleaciones reales, los fenómenos de la segregación están asociados a la formación de dendritas. Se observan comúnmente estructuras dendríticas segregadas y en las cuales los espacios interdendríticos, que son los últimos en solidificarse, presentan una mayor concentración de soluto. Esta diferencia de concentración es la que frecuentemente permite revelar las estructuras de solidificación por efecto del comportamiento diferencial del reactivo de ataque entre zonas más ricas y más pobres en soluto (Aguila Rivas, Roberto A., *Fluidity of Al-Cu alloys with no superheats and solidification mechanisms*, 2011).

## **2.2. Las estructuras de solidificación de los lingotes**

Los cristales que se forman en el proceso de solidificación del metal pueden tener diferente forma en dependencia de la velocidad de enfriamiento, el carácter y la cantidad de impurezas.

Se hace especial énfasis en el modo de solidificación de los lingotes ya que los ensayos realizados en la presente investigación se basan en las estructuras resultantes de lingotes fundidos.

La cristalización del metal líquido comienza en la superficie más fría del molde y transcurre primeramente con preferencia en la capa fina del líquido fuertemente sobre-enfriado, contiguo a esa superficie. Como resultado de la gran velocidad de enfriamiento, se conduce a la formación, en la superficie del lingote, de una zona estrecha de cristales equiaxiales relativamente pequeños. Esta es la zona conocida como chill o acoquillada (Yu M., Lajtin, *Metalografía y tratamiento térmico de los metales*, 1990).

Chalmers, 1964, mencionan que, en esta zona denominada chill, su forma y tamaño queda regulada por la extracción calórica a través del molde y la convección del líquido en el molde. La densidad de núcleos queda definida por la composición química de la aleación, el sobrecalentamiento del líquido, la potencia de las partículas nucleantes presentes y la difusividad térmica del molde.

Biloni y Morando, 1968, exponen que cuando el recubrimiento del molde reduce la capacidad de extracción calórica de las paredes, aparecen los mecanismos de multiplicación. Para condiciones de extracción calórica en la práctica, la formación de la mayoría de los granos de la superficie se debe a un mecanismo de nucleación copiosa.

Después de la primera zona se encuentra la segunda zona de dendritas alargadas (zona de transcristalización) que es llamada zona columnar. El crecimiento de estos cristales transcurre en dirección de la extracción de calor, es decir, en dirección perpendicular de las paredes de la lingotera. El crecimiento posterior de las dendritas a partir de las paredes de la lingotera transcurre gracias al movimiento de las ramas de primer grado hacia el interior de la masa fundida, y a su ramificación de manera análoga como se vio anteriormente.

En el caso de un fuerte sobre-calentamiento del metal, de un enfriamiento muy rápido, de una alta temperatura de colada y de un llenado lento del molde, la zona de las dendritas alargadas puede llegar a ocupar todo el volumen. De igual forma se debe también al crecimiento competitivo que da lugar a una orientación preferencial y durante la cual los cristales que son orientados menos favorablemente tienden a desaparecer.

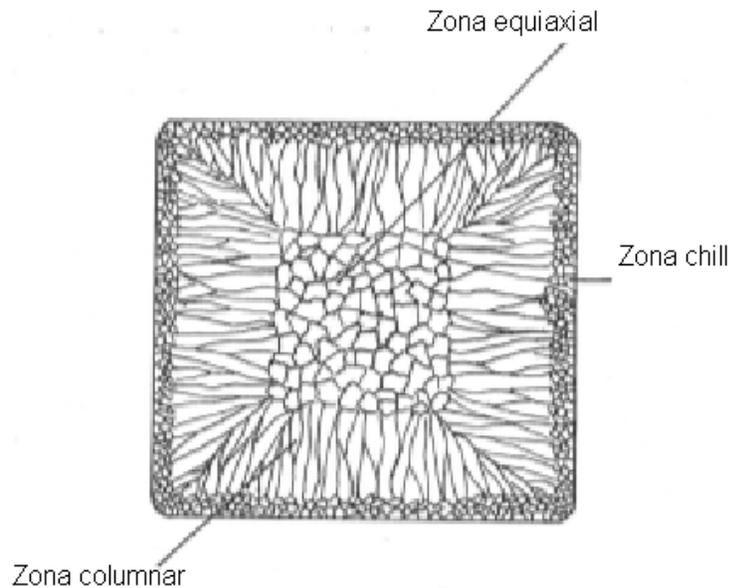
A una temperatura baja de colada y un enfriamiento lento se crean las condiciones para la aparición de núcleos cristalinos en la parte media del lingote. Esto conduce a la formación, en la parte interna de la pieza de fundición, de una tercera zona estructural, compuesta de dendritas globulares de distinta orientación. Esta zona es llamada equiaxial.

Las dimensiones de estos cristales dependen del grado de sobre enfriamiento del metal líquido, de la velocidad de enfriamiento, de la composición química y de la presencia de impurezas entre otras. El término equiaxial se basa en que las superficies geométricas de los granos están aproximadamente equidistantes de su centro de gravedad. Su forma es similar a la de los granos de la zona Chill pero regularmente de mayor tamaño.

Chalmers, 1964, desarrolló una teoría que expone que el origen de esta zona está atribuido al sobre enfriamiento inicial del líquido en contacto con las paredes del molde, parte de los granos permanece en contacto con las paredes del molde formando la zona Chill; parte crece competitivamente formando la zona columnar, y, la otra parte sobrevive en el seno del líquido enfrente de la zona columnar a expensas del sobre enfriamiento constitucional producido por los mismos, y, cuyo crecimiento frena el crecimiento de los granos columnares.

La teoría de Southin, sugiere que los granos de la zona equiaxial se generan en la superficie libre del lingote, debido al enfriamiento y la radiación de la misma, cayendo por densidad dentro del líquido sobre enfriado constitucionalmente y que les permite su sobrevivencia y crecimiento, frenando el avance de la zona columnar (Biloni H., Relación entre las estructuras de segregación y las estructuras de fundición, 1968).

Figura 3. **Distribución de las zonas granulares en un lingote**



Fuente: AGUILAR RIVAS, Roberto Alejandro. Introducción a la metalurgia. p. 156.

### 2.2.1. **Contracción**

La contracción ocurre en tres pasos: 1) contracción líquida durante el enfriamiento anterior a la solidificación; 2) contracción durante el cambio de fase de líquido a sólido, llamada contracción de solidificación, y 3) contracción térmica de la fundición solidificada durante el enfriamiento hasta la temperatura ambiente.

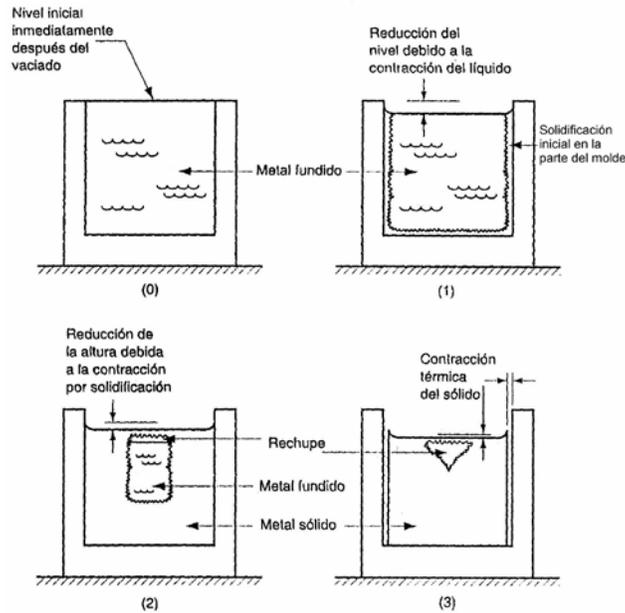
El metal fundido inmediatamente después de vaciado se muestra en 0 figura 4. La contracción del metal líquido durante el enfriamiento, desde la temperatura de vaciado hasta la temperatura de solidificación, causa que la altura del líquido se reduzca desde el nivel inicial como en 1. La cantidad de esta concentración líquida es generalmente alrededor del 0,5 por ciento. La

contracción de solidificación que se observa en 2 tiene dos efectos. Primero, la contracción causa una reducción posterior en la altura de la fundición. Segundo, la cantidad de metal líquido disponible para alimentar la porción superior del centro de la fundición se restringe. Ésta es usualmente la última región en solidificar; la ausencia de metal crea un vacío en este lugar de la fundición. Esta cavidad de encogimiento es llamada por los fundidores rechupe.

El metal líquido tiene un volumen específico mayor que el sólido; por esto, en aquella parte del lingote que se enfría en último término, se forma este vacío. Una vez solidificada, la fundición experimenta una contracción posterior en altura y diámetro mientras se enfría como en 3. Esta contracción se determina por el coeficiente de expansión térmica del metal sólido, que en este caso se aplica a la inversa para determinar la contracción.

La contracción por solidificación ocurre casi en todos los metales porque la fase sólida tiene una mayor densidad que la fase líquida. La transformación de fase que acompaña la solidificación causa una reducción en el volumen por unidad de peso del metal. La excepción es el hierro fundido con un alto contenido de carbono, cuya solidificación se complica por un período de grafitización durante las etapas finales de enfriamiento, que provoca una expansión tendiente a contrarrestar el crecimiento volumétrico asociado con el cambio de fase (Groover, Mikell, Fundamentos de manufactura moderna, 1997).

Figura 4. **Proceso de la contracción en la fundición**



Fuente: GROOVER, Mikell P. Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas. p. 252.

Tabla II. **Valores típicos de contracción para algunos metales**

Metal	Contracción por solidificación en porcentaje	Contracción térmica del sólido en porcentaje
Aluminio	7,0	5,6
Aleación de aluminio	7,0	5,0
Fundición de hierro gris	1,8	3,0
Fundición de hierro gris al alto carbono	0	3,0
Fundición de acero al bajo carbono	3,0	7,2
Cobre	4,5	7,5
Bronce	5,5	6,0

Fuente: GROOVER, Mikell P. Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas. p. 253.

### **3. DISEÑO Y FABRICACIÓN DE EQUIPO PARA FUNDICIÓN Y MANIPULACIÓN DE ALUMINIO Y SUS ALEACIONES**

#### **3.1. Horno eléctrico de resistencia para fundición<sup>4</sup>**

Un horno para fundición es un dispositivo fijo o móvil que es capaz de generar calor y mantenerlo dentro de un compartimiento cerrado. Para usos en fundición de metales se tiene que los hornos pueden obtener su calor de varias fuentes de energía, entre las cuales están los combustibles sólidos, líquidos, gaseosos y electricidad.

##### **3.1.1. Principios de funcionamiento**

El calor dentro de un horno es necesario para provocar el fenómeno de la fusión, que no es más que el cambio de estado sólido a líquido de los metales. La fuente de calor aplicada al modelo presentado en la presente investigación, es por medio de una resistencia eléctrica desnuda utilizada en calefacción.

##### **3.1.2. Diseño y construcción del horno**

En el presente caso, se diseñó y construyó un horno a manera de que sus efectos sean repetitivos dentro de un margen lo más cerrado posible, para que

---

<sup>4</sup> Los principios básicos del diseño se fundamentan en la idea propuesta en <http://foro.metalaficion.com/index.php/topic,77.0.html> y que se han adaptado a las necesidades de la presente investigación.

los ensayos experimentales cumplieran con los requisitos exigidos por el método científico.

### **3.1.2.1. Factores de relevancia**

Un horno para fundición debe de cumplir con los requerimientos siguientes: debe de generar una cantidad de calor constante durante lapsos de tiempo largo y repetitivo; debe de estar hecho de materiales refractarios y aislantes y por último debe de tener una forma o figura que distribuya homogéneamente la cantidad de calor generada. Además de las solicitudes propias de la constitución misma del horno, las necesidades que debe de cubrir según sea la aplicación del mismo son de vital importancia.

En tal sentido, dentro de esto, se debe de considerar que las probetas producidas a partir de las coladas respectivas, son de tamaño pequeño por lo tanto el crisol de fundición seleccionado fue de dimensiones reducidas. Esto es una ventaja ya que no es tan amplia la superficie a calentar y en consecuencia menor la potencia requerida y menor el tamaño y tipo de aislamiento.

Respecto a las dimensiones del crisol, se eligió un crisol de 1 kilogramo de capacidad, diámetro máximo de 12 centímetros y altura de 10 centímetros; esto es de gran importancia ya que basado en el tamaño del crisol se determina el volumen mínimo que puede llegar a contener el horno en su interior.

Los hornos para fundición por lo general son de forma cilíndrica o prismática en su interior, esto debido a que estas son fáciles de construir y distribuyen homogéneamente el calor.

Se decidió que la figura que se adapta de mejor manera a las necesidades caloríficas y de manipulación es la cilíndrica.

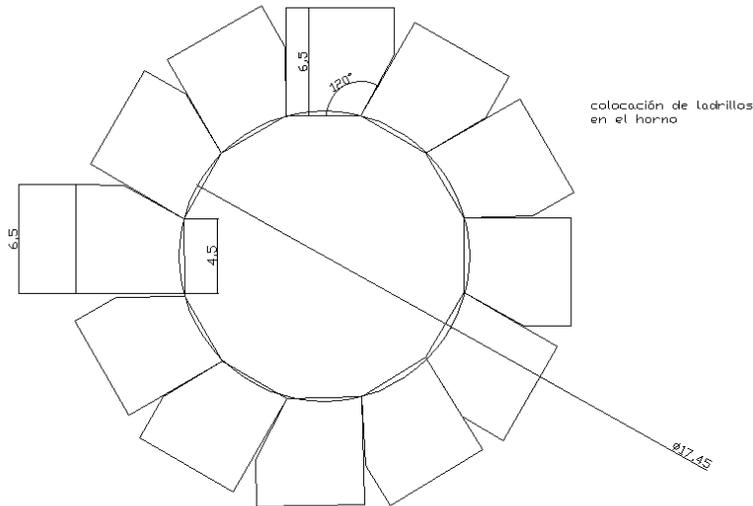
En función de lo anterior se diseñó y construyó el horno a las medidas adecuadas necesarias con relación al mejor aprovechamiento de la energía y de acuerdo a los materiales disponibles en el mercado, se decidió la utilización de ladrillo y mortero refractarios, así como un recubrimiento de lana mineral con laminilla de aluminio.

El ladrillo rectangular se transformó en una figura poligonal de 5 lados, mediante un corte en diagonal en una de las esquinas del cuadrado, para dar margen a la unión más estrecha de las figuras. La figura final después de unir todas las piezas dio origen a un dodecágono.

Para establecer la medida del ángulo de corte de una de las esquinas de los ladrillos se procede a calcularlo de la siguiente manera: si se divide la cantidad de grados que tiene un círculo, figura originalmente deseada para formar un cilindro, dentro del número de lados que se requiere que es de 12, se obtiene un ángulo de 30 grados, y este es el ángulo buscado, ya que al juntarse con la otra figura similar se unen formando la figura 5 descrita abajo.

El lado en contacto con la alta temperatura generada debió de tener un tamaño amplio para evitar la degradación prematura de los ladrillos; y, ya que el diámetro mínimo del núcleo es de 15 centímetros, se hicieron los cálculos matemáticos de maximización, y se establece que el diámetro real obtenido con un corte de 2 centímetros de un lado y 3,46 centímetros del otro es de 17,45 centímetros. Esto con un lado expuesto a las altas temperaturas de tamaño 4,5 centímetros.

Figura 5. **Diseño y formación del dodecágono en el cuerpo del horno**



Fuente: elaboración propia.

Al considerar los costos de manipular pequeñas cantidades de material, reducir la influencia de contaminantes producidos por la combustión sobre la fundición y por ser accesible en el lugar donde se realizan los ensayos, se eligió la electricidad como fuente de energía.

Como elemento calefactor se utilizó una resistencia de forma espiral con diámetro 1,1 centímetros; colocada dentro del núcleo del horno, es decir en torno a los ladrillos. Debido a que el contacto del elemento calefactor con el crisol, degrada rápidamente la superficie del último, se decidió que este quedara inserto en la periferia del núcleo del horno sin llegar a tocar el crisol. Esto se logró creando ranuras del tamaño del diámetro de la espira dentro de los ladrillos, y dejando unos orificios para el inicio y final del elemento calefactor.

Para unir los ladrillos, se utilizó mortero (cemento) del tipo refractario. Para la conformación de cada una de las partes, tapa, base y cuerpo, se usó lámina galvanizada, debido a su bajo costo y sencilla manipulación.

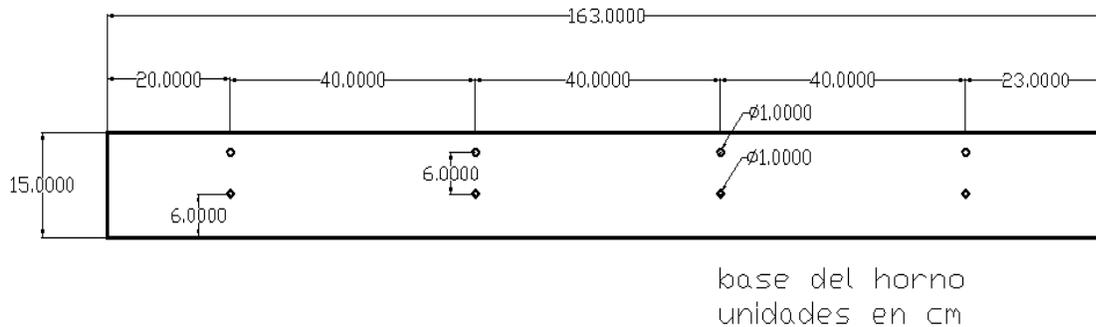
El espesor del aislante para esta aplicación es el doble del ancho del ladrillo, es decir 6,5 centímetros más el tamaño del ladrillo, lo que dará en total un espesor de 13 centímetros en el núcleo o cuerpo del horno, que es el lugar en el cual se encuentra la fuente de calor y por lo tanto la superficie más cálida del horno. Con esto como base del diámetro final del horno se establece que el tamaño del mismo será de 42 centímetros; en todas las partes, cuerpo, base y tapa.

### **3.1.2.2. Dimensiones**

Para la construcción del horno primero se debieron de plantear dimensiones razonables de diseño ya que la investigación se basa en la creación de lingotes provenientes de fundiciones pequeñas, por tal motivo el tamaño del horno presentado es relativamente pequeño. Los planos que se presentan a continuación son figuras elaboradas por el autor que enmarcan el inicio de la fabricación del horno. El horno que se diseñó está constituido de tres partes, la tapa, el cuerpo y la base.

En conjunto estas partes deben de formar una figura cilíndrica, esto debido a que la distribución homogénea del calor antes descrita. La base del horno se diseñó de 12 centímetros de alto por un diámetro de 42 centímetros en cuyo interior debe de existir ladrillo refractario y una mezcla de mortero refractario y aislante.

Figura 6. Base del horno



Fuente: elaboración propia.

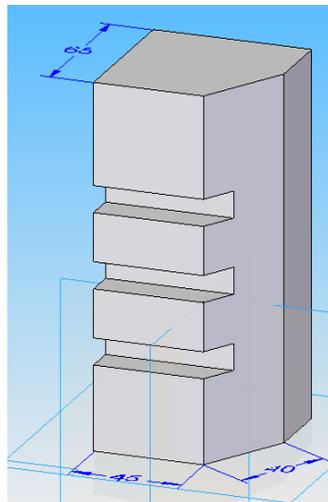
La base del horno se diseñó en función de una figura rectangular de 15 centímetros de alto por 163 centímetros de longitud que al cerrarse conforma un cilindro de 42 centímetros de diámetro y 15 centímetros de alto. Se tomó en cuenta que debe de existir un traslape para la unión de la pieza de 3 centímetros, por lo que la longitud efectiva de la figura es de 160 centímetros. Para efectos de resistencia mecánica se tiene que la base del horno debe de medir 12 centímetros de alto, por lo que, en la parte de abajo del cilindro se realizó un doblé de 3 centímetros hacia adentro.

Cada uno de los agujeros que se muestran en la figura 6 son para colocar los tornillos que cumplen la función de sostener las patas que soportan la estructura del horno. Estas patas deben de mantener libre de contacto con el piso al horno, ya que si esto sucediera ocurriría una gran pérdida de calor por conducción.

Para el diseño del cuerpo del horno, se consideró la creación de una figura regular que albergara una distribución de calor homogénea, en este caso un cilindro.

En la figura 7 se puede ver el ángulo de corte y profundidad de la ranura para el elemento calefactor. El diseño asegura que buena parte del ladrillo quede utilizada para la retención del elemento calefactor, así también, el ladrillo, por tener mejores características refractarias puede soportar de mejor manera la exposición a la alta temperatura utilizada para la fundición, sin tener contacto con el mortero cuyas propiedades son inferiores. Otra de las cuestiones a tomar en cuenta es que al no quedar unidos los ladrillos por medio de mortero unos con otros en las caras cortadas, se tiene cierta libertad de contracción y expansión debido a los efectos de la temperatura. Este concepto es empleado en la generalidad de diseño y construcción del horno.

Figura 7. **Vista del ladrillo cortado con sus zanjias y el ángulo para unir los doce ladrillos**



Fuente: elaboración propia.

Para el diseño del cuerpo del horno, además de los ladrillos, se diseñó y construyó una estructura metálica como en la base. De la misma forma se tiene un rectángulo de 163 centímetros de longitud, 18 centímetros de ancho,

además de igual manera, las solicitudes mecánicas de la base son aplicadas al cuerpo del horno por lo que se tiene que el ancho efectivo del cuerpo del horno es de 15 centímetros, en donde tanto en la parte de arriba como en la parte de abajo se doblaron pestañas de 1,5 centímetros hacia adentro.

Como se puede observar en la figura 9 en la periferia de esta se encuentran unos orificios dentro de los cuales se colocaron unos tornillos que brindaran a la estructura mayor rigidez debido al peso elevado de la pieza en mención. Los tornillos son de 9 milímetros de diámetro.

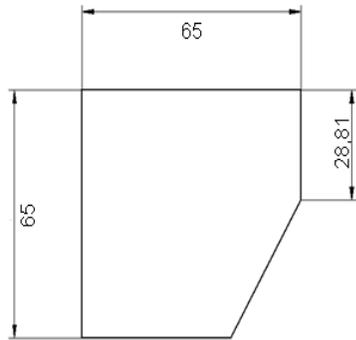
Para el diseño de la tapa del horno se tomó en cuenta el hecho de que se debe de manipular constantemente, es decir quitar y poner, en función de extraer el crisol de manera segura y teniendo en cuenta que debe de crear una protección térmica. En función de lo anterior se diseñó una estructura de fácil manipulación asegurando tanto la operación bajo normas de seguridad, como el sello necesario para evitar las pérdidas de calor provocadas por radiación durante el funcionamiento del horno.

El diseño de la tapa, al igual que la base y el cuerpo del horno, empieza por una estructura metálica hecha de lámina galvanizada de 163 centímetros de largo, en la cual se colocaron dos asas para poderla manipular, con orificios a una distancia de 14 centímetros entre ellos, cuatro por asa con un diámetro de 1 centímetros como se muestra en la figura 10.

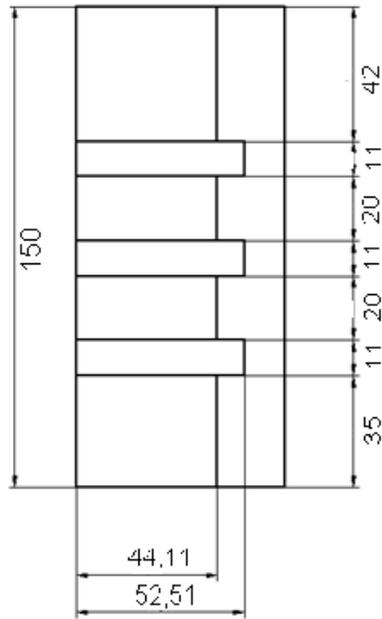
En vista de los esfuerzos a los que es sometida esta parte del horno se construyó una pestaña de la misma manera que para la base y el cuerpo del horno. El ancho útil de la tapa es de 10 centímetros.

Figura 8. **Vistas ortogonaes del ladrillo cortado**

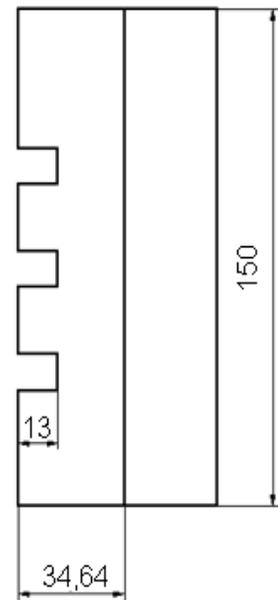
a) Planta b) elevación c) perfil, las unidades están en milímetros.



a)



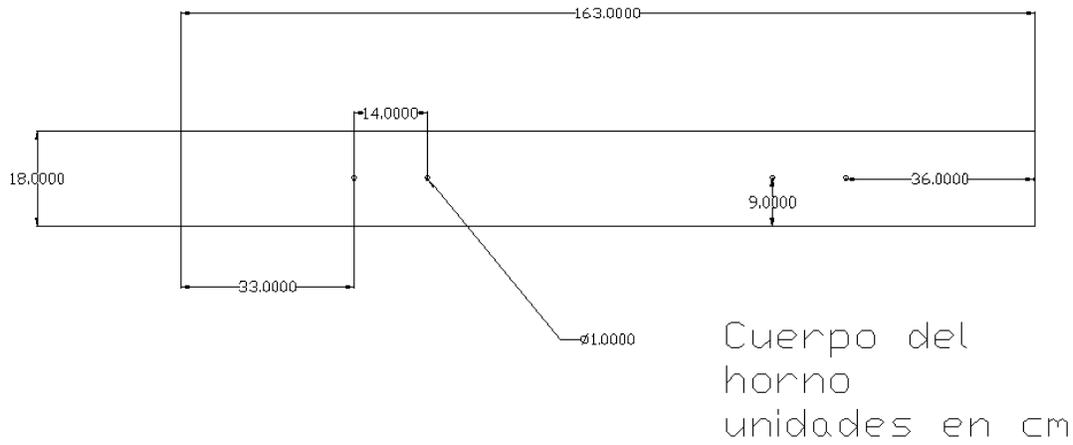
b)



c)

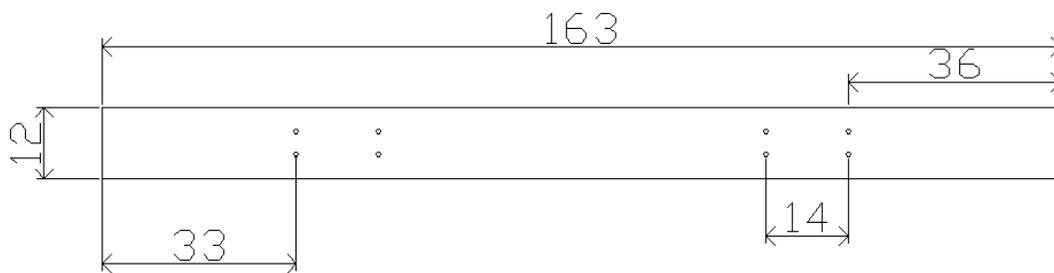
Fuente: elaboración propia.

Figura 9. **Cuerpo del horno**



Fuente: elaboración propia.

Figura 10. **Tapa del horno**



Fuente: elaboración propia.

La tapa del horno también se construyó con ladrillos maquinados. Estas piezas brindan la posibilidad de formar una figura con un espacio intermedio en el cual se colocó un tapón tipo visor (ver figura 13). Este tapón sirve para poder observar el transcurso de la fundición dentro del horno sin recurrir a pérdidas exageradas de calor por la interacción del medio con el horno descubierto.

Por último el tapón tipo visor se diseñó de tal manera que pudiera ser manipulable, y se construyó de los mismos materiales con los que fueron hechas las demás partes. Éste tiene una figura cónica para que al ser extraído y colocado de nuevo como tapón, no se atasque debido a su propio peso en la tapa del horno.

### **3.1.3. Materiales**

Los materiales seleccionados para el uso indicado debían cumplir con los requerimientos de soportar altas temperaturas sin fundirse, no cambiar su forma excesivamente o experimentar cambios de composición.

Las propiedades de los materiales refractarios, y en especial su resistencia a las altas temperaturas, representan un gran problema en la metalurgia. Las propiedades que se exigen a un material refractario son muy diversas según los usos, y así, mientras en ciertos casos, como para revestimientos de los hornos, se requiere una baja conductividad térmica, esta propiedad es inconveniente en la fabricación de crisoles para fundición.

La resistencia a la deformación de los materiales refractarios es muy importante en todos los casos, y esa propiedad no depende solamente del coeficiente de dilatación térmica, sino principalmente de los cambios físicos o

químicos que el calor pueda introducir en el material, cambios que pueden dar origen a grietas o roturas. Es por ello que los materiales refractarios deben ser calentados lentamente antes de alcanzar por primera vez las altas temperaturas de servicio.

Las características refractarias de los ladrillos y el mortero empleado, se escogieron de acuerdo a las temperaturas de operación necesarias en el interior del horno las cuales fueron de 700 grados centígrados a 1 000 grados centígrados.

Las propiedades del ladrillo refractario empleado son las siguientes: ladrillo refractario de alta densidad silico-aluminoso TCG 45, punto de fusión, 1 580 grados centígrados, modulo de ruptura en caliente calcinado a 1 250 grados centígrados igual a 1,7 megapascales, cambio lineal permanente menor al 0,8 por ciento y una conductividad térmica de 11,4 BTU pulgada por hora pie cuadrado a 815 grados centígrados.

El mortero empleado tiene las siguientes características: Mortero MB 50, límite de temperatura 1 300 grados centígrados, modulo de ruptura de 1,7 mega pascales a 105 grados centígrados secado durante 24 horas, cambio lineal permanente menor al 0,2 por ciento y conductividad térmica de 6,6 BTU pulgada por hora pie cuadrado.

La temperatura de fusión es un importante índice de la calidad de un material refractario, pero debe tenerse en cuenta que en cierto tipo de materiales se produce un ablandamiento mucho antes que en otros con respecto a sus respectivos puntos de fusión. El punto de ablandamiento debe, pues, determinarse para aplicaciones donde la temperatura sea elevada y se

aproxime al punto de fusión del material (*Metals Handbook, Fractography*, 1987).

Para la construcción de los cilindros base se utilizó lámina galvanizada chapa 26. El horno es de forma cilíndrica, formado por una estructura metálica que envuelve las partes, como se ha descrito anteriormente. Las piezas que conforman el horno son tapa, cuerpo y base.

Las siguientes figuras muestran los elementos integrales del horno descrito anteriormente.

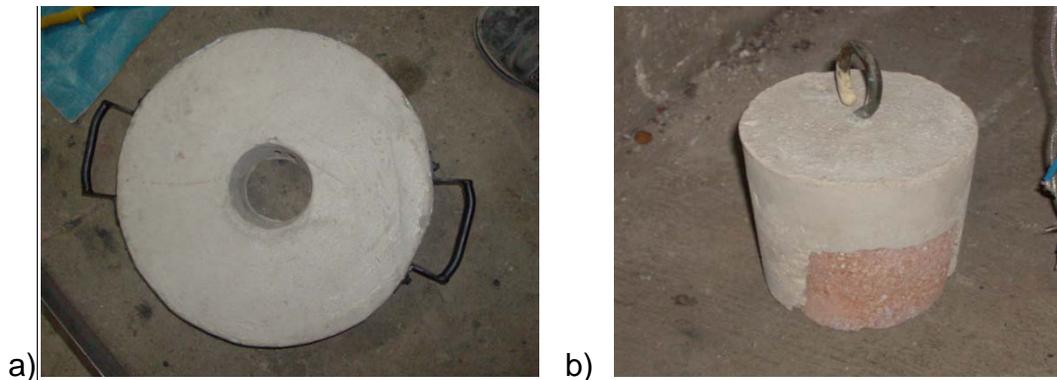
Figura 11. **Horno eléctrico para fundición**



Fuente: taller de herrería, colonia El Incienso zona 7.

Figura 12. **Tapa del horno y tapón tipo visor**

a) Tapa del horno con asas b) tapón del horno



Fuente: taller de herrería, colonia El Incienso zona 7.

Por el hecho de que este horno trabajará a altas temperaturas no se puede operar inmediatamente a temperatura normal de funcionamiento, esto causaría una evacuación súbita de la humedad contenida dentro de la tapa y demás partes del horno y causaría fisuras internas que disminuirían la resistencia mecánica de las partes en mención. Por lo que se decide “curar” cada una de las partes del horno, es decir, precalentar las partes a temperaturas inferiores a las de operación durante períodos de tiempo largo, aumentando la temperatura gradualmente y dejando enfriar de la misma manera.

En otro de los ladrillos se perfora un orificio de 1 centímetro de diámetro esto para colocar una termocupla, que será el medio para verificar la temperatura de trabajo dentro del horno.

Figura 13. **Construcción de la tapa del horno**



Fuente: taller de herrería, colonia El Incienso zona 7.

Figura 14. **Ladrillos para el cuerpo del horno**



Fuente: taller de herrería, colonia El Incienso zona 7.

Figura 15. **Constitución del cuerpo del horno**



Fuente: taller de herrería, colonia El Incienso zona 7.

Figura 16. **Cuerpo del horno y cemento refractario**



Fuente: taller de herrería, colonia El Incienso zona 7.

Figura 17. **Construcción del cuerpo del horno**



Fuente: taller de herrería, colonia El Incienso zona 7.

Figura 18. **Construcción de la base del horno**

Véase las patas instaladas en su alrededor



Fuente: taller de herrería, colonia El Incienso zona 7.

### 3.1.4. Colocación y unión de las partes

Para el ensamble de todas las piezas se colocó primero la base y sobre esta un anillo hecho de fibra de vidrio aislante con cubierta de laminilla de aluminio para evitar las fugas de calor. Luego se colocó sobre el cuerpo del horno y se procedió a rodear con una capa del mismo material el conjunto de base y cuerpo del horno. Se instaló una caja eléctrica en la salida de las terminales del elemento calefactor para la conexión eléctrica.

Figura 19. Aislamiento en las juntas de las partes



Fuente: taller de herrería, colonia El Incienso zona 7.

### 3.2. Elemento calefactor

El elemento calefactor es la fuente de energía térmica necesaria para alcanzar en el interior del horno la temperatura necesaria para la fusión de los metales. La elección de este elemento se basa en, la necesidad de una fuente de calor constante, la utilización de un medio de transferencia de calor seguro, la disponibilidad del suministro de energía y la interacción de la generación del calor en función de las necesidades de pureza de la colada.

Con base en lo anterior, se diseñó y calculó una resistencia eléctrica para calefacción; esta transforma la energía eléctrica en energía térmica radiante debido a que al fluir electrones a través de esta se provocan choques de los mismos, esta interacción entre partículas crea un incremento de la energía cinética de los electrones y aumenta, por lo tanto el calor en la periferia del conductor también aumenta. El calor radiante es aprovechado en este caso para la transformación de estado de los metales.

En función de las dimensiones del cilindro del horno, se realizaron los cálculos correspondientes.

Se utilizó la ecuación que proporciona la potencia necesaria para un horno de forma cilíndrica,  $P = 100 \frac{LD}{T}$  donde P es la potencia necesaria en watt, L es la longitud o altura del cilindro, D es el diámetro del cilindro y T es el espesor del aislamiento. De acuerdo a la dimensión del espesor del aislante ,13 centímetros, la potencia mínima requerida es de 2 014 watt.

Para el cálculo de la longitud del elemento calefactor se consideró su área transversal de 1,76 71 milímetros cuadrados, esto para un alambre de diámetro 1,5 milímetros; una resistividad de 1,5 ohmio milímetro cuadrado por metro, y una resistencia obtenida a partir de que la potencia mínima es de 2 014 watt, y que la corriente, con un voltaje de 220 voltios, es 9,16 amperios, por lo tanto el valor de la resistencia dio 24,02 ohmios. Con esto se utilizó la fórmula que establece que  $R = \rho \frac{L}{S}$  donde R es la resistencia,  $\rho$  es la resistividad del nicromo, L es la longitud de la resistencia y S es el área de la sección transversal del elemento calefactor, se tiene que la longitud calculada es de 28 metros.

Esta fórmula fue aplicada para una temperatura de 20 grados centígrados sobre la resistencia, de la misma teoría se sabe que la resistividad aumenta con la temperatura por lo que al momento de solicitar esta cantidad de potencia para el uso dentro del horno la longitud teórica disminuiría a casi la mitad por el incremento en la resistividad debido a la alta temperatura de trabajo.

Aun así, como se puede apreciar esta longitud es demasiado grande como para poderla inscribir dentro del núcleo del horno en línea recta, por lo que, por motivos de distribuir tanto el calor como la longitud del elemento calefactor, se creó un espiral con el alambre de nicromo de diámetro 1,5 milímetros. Con esto se justifica el hecho de que las ranuras de cada uno de los ladrillos del núcleo del horno sean de 1,3 centímetros, ya que el diámetro de la espira del elemento calefactor es de 1,4 centímetros, esto dio margen a que el elemento calefactor quede introducido dentro de los ladrillos sin que se salga durante la operación del horno y llegue a tocar el crisol, lo que causaría un desgaste prematuro como ya se ha mencionado.

El nicromo que es una aleación de 80 por ciento níquel y 20 por ciento cromo, es elegido como material del elemento calefactor ya que tiene buenas propiedades físicas como alto punto de fusión, 1 400 grados centígrados, gran resistividad,  $110 \cdot 10^{-8}$  ohmios metro; y buena resistencia a la oxidación a altas temperaturas.

Según la ley de Joule que establece que la cantidad de calor generado por una resistencia eléctrica es  $Q = I^2 R T$  donde Q es la cantidad de calor generada por la resistencia en Julios; I es la corriente que circula en la resistencia, R es la resistencia en ohm y T es el tiempo durante el cual trabaja la resistencia.

Figura 20. **Elemento calefactor**



Fuente: taller de herrería, colonia El Incienso zona 7.

Con esto se puede comprobar si el horno será capaz de fundir aluminio ya que el calor latente de fusión del aluminio es de 360 kilo Joule por kilogramo se necesitaran entonces 360 kilojoule para fundir 1 kilogramo de aluminio, y al aplicar la ley de Joule se puede deducir en cuanto tiempo se deberá de fundir el contenido del crisol dentro del horno lo cual nos da un aproximado de 180 segundos es decir 2 minutos y medio, esto es teóricamente pues como se explicara más adelante en el enunciado del rendimiento térmico del horno se muestra que para alcanzar la temperatura de fusión del aluminio se necesitan 20 minutos aproximadamente.

### **3.2.1. Instalación eléctrica**

Para la instalación del elemento calefactor se uso un voltaje de suministro de 220 voltios, un equipo de automatización del control de la temperatura con un contactor y termocupla del tipo K (medición hasta 1 200 grados centígrados).

### 3.3. Crisoles para fundición

Un crisol para fundición es un recipiente de material resistente a las altas temperaturas en el cual se funden los metales antes de ser colados. Según los requerimientos necesarios pueden ser de grafito, carburo de silicio, acero y hierro colado. El punto de fusión de los materiales a utilizar en la construcción de crisoles debe de ser mayor que el punto de fusión de los metales a fundir, debe de ser refractario para resistir las altas temperaturas y buen conductor del calor.

Tabla III. **Datos técnicos del horno para fundición**

Capacidad interna	Crisoles no mayores a 12 cm de alto y 15 cm de diámetro
Voltaje necesario	240 V CA
Consumo	5 200 W
Temperatura máxima experimental	900 °C
Rango de trabajo	De temperatura ambiente hasta 800°C
Dimensiones del horno	Altura 60 cm diámetro 43 cm

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo a lo anterior, para el desarrollo de la investigación se utiliza un crisol de grafito de 1 kilogramo de capacidad ya que cumple con los requerimientos para la fundición de aluminio en pequeñas cantidades.

El inconveniente de la utilización de un crisol de grafito o carburo de silicio es el hecho de que durante el proceso de fusión las paredes internas y externas del crisol sufren erosión térmica, además, por el hecho de ser de materiales cerámicos, su fragilidad aumenta con forme aumenta su temperatura; esta erosión ingresa partículas contaminantes a la colada, además, de otorgar de

esta misma manera afinadores de grano de una manera no controlada. La otra desventaja de estos tipos de crisoles es su manipulación durante la colada debido al aumento de la fragilidad con el incremento de temperatura.

Figura 21. **Crisol de grafito**



Fuente: taller de herrería, colonia El Incienso zona 7.

#### **3.4. Diseño de pinzas y vertedor para crisol**

Para la correcta manipulación del crisol, se diseñaron unas pinzas capaces de extraer el mismo del horno; así también un vertedor tipo manivela para realizar las coladas. Estas pinzas son especiales debido a que deben de sostener el crisol cuando este se encuentra a una alta temperatura, deben de ser capaces de no dañarlo y de soportar el peso del conjunto colada-crisol.

Las pinzas se construyeron con las siguientes dimensiones: largo de los brazos 30 centímetros, largo de mandíbulas 10 centímetros, diámetro de las mandíbulas sujetadoras del crisol 10 centímetros.

Figura 22. **Pinzas para crisol de 1 kg**



Fuente: taller de herrería, colonia El Incienso zona 7.

Para poder manipular la colada durante el proceso de llenado de las lingoteras se debió utilizar una herramienta especial, un vertedor. Esta herramienta debe de poder variar la altura a la cual se suministra la colada, esto por el hecho de que las lingoteras que se describirán más adelante, son de dimensiones variables; además debe de brindar seguridad durante su manipulación ya que la colada es el proceso más peligroso del desarrollo de la investigación.

Figura 23. **Vertedor**



Fuente: taller de herrería, colonia El Incienso zona 7.

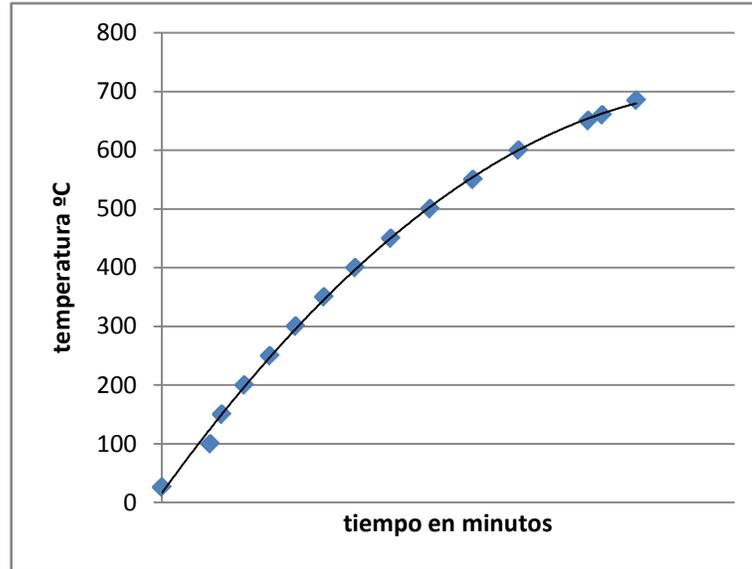
### **3.5. Rendimiento térmico del horno**

Durante la puesta en marcha del horno se comprobó el rendimiento térmico del horno para fundición. Se aprecia que para realizar una fundición de aproximadamente 0,9 kilogramos se tiene un tiempo estimado 20 minutos, esto en comparación con los datos teóricos del elemento calefactor de 3 minutos, tiene su justificación y se centra en el hecho de que la fórmula teórica no toma en cuenta las pérdidas por convección, radiación y conducción del horno durante su operación.

Mientras se enciende el horno, este debe de suministrar una temperatura constante para que dentro del mismo se pueda provocar la fusión del aluminio. Pero debido a que el elemento calefactor tiene contacto directo con las paredes del horno se pierde energía; también se pierde calor porque el espacio que queda entre el elemento calefactor y el crisol es aire, y como se sabe es un mal conductor de calor; por último la interacción con el medio ambiente mientras se tiene en funcionamiento el horno es causa de pérdida de calor.

**Tabla IV. Incremento de la temperatura en función del tiempo**

Tiempo Min: Seg.	Temperatura °C
0	26
2:50	100
3:30	150
4:50	200
6:20	250
7:50	300
9:30	350
11:20	400
13:25	450
15:43	500
18:15	550
20:55	600
25:00	650
25:50	660
27:50	695



Fuente: elaboración propia.

### **3.6. Diseño y construcción de lingoteras para fundición**

Dentro de la metodología experimental de la presente investigación, se realiza la fundición de aluminio por medio de un horno de resistencia eléctrica y la posterior colada sobre distintos moldes para obtener piezas denominadas lingotes. Estos moldes serán descritos de ahora en adelante como lingoteras.

Una lingotera es un molde permanente cuya misión es alojar a la fundición durante el proceso de solidificación. Esta puede estar hecha de distintos materiales y formas, pero para uso y conveniencia de la presente investigación se elaboraron las siguientes: lingotera de grafito, lingotera de acero de medio carbono, lingotera de tubo de acero de bajo carbono y moldes de arena (desechables).

### 3.6.1. Lingotera de grafito

El grafito es un material suave, de color gris oscuro, que tiene como propiedades una baja conductividad térmica, una alta conductividad eléctrica y fácil manufacturación, es un material frágil y untuoso. Tiene una dureza en la escala de Mohs de 2 y puede utilizarse como lubricante sólido. Posee un coeficiente de dilatación lineal de  $1/0,79 * 10^{-5}$  Kelvin.

La lingotera de grafito expuesta, se fabricó de un niple de electrodo para horno de fundición por arco eléctrico para acero, proporcionado por la empresa SIDEGUA S.A.

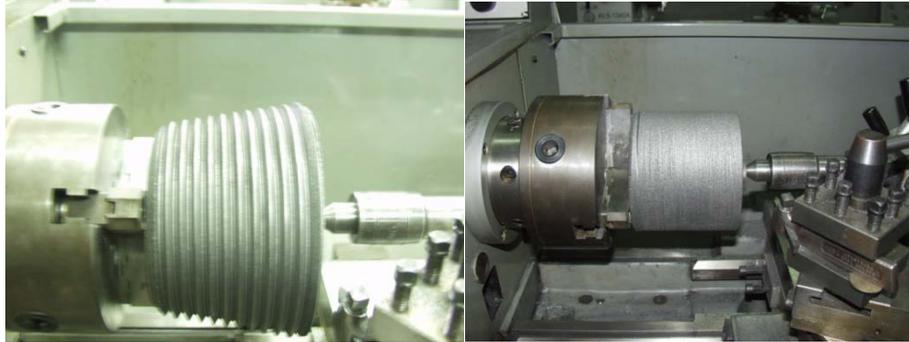
Las siguientes figuras ilustran la secuencia de la fabricación de la lingotera.

Figura 24. **Niple de grafito**



Fuente: Laboratorio de Procesos de Manufactura, edificio T-7, Facultad de Ingeniería USAC.

Figura 25. **Maquinado de grafito**



Fuente: Laboratorio de Procesos de Manufactura, edificio T-7, Facultad de Ingeniería USAC.

Figura 26. **Lingoteras de grafito**



Fuente: Laboratorio de Procesos de Manufactura edificio T-7 Facultad de Ingeniería USAC.

Las dimensiones de la lingotera son: diámetro 15 centímetros, altura 13 centímetros, como interno de diámetro menor 51 milímetros, diámetro mayor 61 milímetros y una altura de 76 milímetros.

### 3.6.2. Lingotera de acero de medio carbono

La segunda lingotera que se utilizó en la investigación fue construida a partir de un trozo de acero al carbono de 135 milímetros de largo por 135 milímetros de ancho y 120 milímetros de alto.

Las propiedades del acero en comparación al grafito es que este tiene una mayor capacidad de transferencia calórica, es un material duro de color gris metálico de difícil manufacturación, tiene una alta conductividad eléctrica y un coeficiente de dilatación lineal de  $1/1,0 \cdot 10^{-5}$  Kelvin.

Las siguientes figuras muestran el proceso de fabricación de la lingotera. Sus dimensiones son: 13,5 centímetros de largo, 13,5 centímetros de ancho, 12 centímetros de alto y un cono interno con diámetro menor 51 milímetros, diámetro mayor 61 milímetros y una altura de 76 milímetros.

Figura 27. **Mecanizado de lingotera de acero de medio carbono**



Fuente: Laboratorio de Procesos de Manufactura, edificio T-7, Facultad de Ingeniería USAC.

### 3.6.3. Lingotera de tubo de acero de bajo carbono

Otra de las lingoteras utilizadas está hecha de un pedazo de tubo de hierro negro con costura cedula 80. Este tubo se cortó y refrentó para que pudiese ser colocado sobre una plancha metálica de 8 mm de espesor. Esta interacción entre tubo y plancha forma una lingotera como se puede apreciar en la figura 28.

### 3.6.4. Lingotera tipo caja de arena

El cuarto molde que se utilizó es una caja cuadrada de madera de 13,5 centímetros de lado por 12 centímetros de alto. Dentro de esta caja se apisona arena alrededor de un modelo de madera del lingote deseado. La arena que se utilizó es la que se usa en las prácticas de metalurgia de la Facultad de Ingeniería de la USAC. Debido a que los moldes de arena son desechables, este proceso hay que realizarlo tantas veces como número de lingotes se necesiten.

Figura 28. **Mecanizado de lingotera de tubo de acero de bajo carbono**



Fuente: Laboratorio de Procesos de Manufactura, edificio T-7, Facultad de Ingeniería USAC.

Figura 29. **Lingotera tipo caja de arena**



Fuente: Laboratorio de Metalurgia edificio T-7, Facultad de Ingeniería USAC.



## **4. FUNDICIÓN DE LINGOTES Y ANÁLISIS METALOGRÁFICO**

### **4.1. Lingotes**

Un lingote, además de sus acepciones generales, de aquí en adelante se señala como una probeta de las obtenidas en la fase experimental, por sus condiciones de diseño, es el resultado de una colada de fundición de tal forma que pueda ser analizada por medio de ensayos metalográficos, maquinada y observada para los usos que así se requieran. El lingote que se utiliza en la investigación tiene las siguientes medidas diámetro menor 51 milímetros, diámetro mayor 61 milímetros y una altura de 76 milímetros. Estas dimensiones tienen la ventaja de que al tener coladas con esta forma, es decir conos, pueden salir fácilmente de su molde sin atascamientos.

Estos lingotes son la base de la investigación, colados de aluminio y aleaciones aluminio cobre hasta el 5 por ciento. Fueron diseñados para su posterior observación, tanto de forma macrográfica como micrográfica y así determinar cuáles son las estructuras de solidificación que son reveladas cuando se cambian parámetros como tipo de molde y coeficiente de extracción calórica en la interfaz metal molde, así como concentraciones de soluto en las aleaciones, al ser atacados químicamente por medio de un reactivo.

Figura 30. **Lingotes**



Fuente: Laboratorio de Metalurgia, edificio T-7, Facultad de Ingeniería USAC.

#### **4.2. Metodología experimental de la fundición artesanal**

La fundición, como ya se ha descrito, es el proceso de producción de piezas o elementos de máquinas por medio de la colada de un metal líquido, fundido previamente, en moldes de diferentes tipos, para reproducir partes o piezas de formas deseadas. La fundición artesanal se realiza sin controles de los parámetros ingenieriles que rigen el proceso.

En la presente investigación, se analizan las características estructurales resultantes de la fundición de probetas (pequeños lingotes) de aluminio de alta pureza y aleaciones aluminio-cobre con tenores de 1, 3 y 5 por ciento de cobre, simulando las características de la fundición artesanal, determinando el cambio de las estructuras de solidificación, preliminarmente, observando el efecto producido por los tenores crecientes de soluto desde el metal de alta pureza, y,

posteriormente, el efecto de los cambios de sustrato y su relación con el coeficiente de transferencia calórica de la interfaz metal molde.

Para el desarrollo del proceso experimental, se definió la metodología de investigación, mediante la realización de los pasos siguientes:

- Obtención de materia prima.
- Fundición de la materia prima y preparación de las aleaciones definidas.
- Colada artesanal en las distintas lingoteras.
- Corte de las probetas de forma longitudinal o transversal, según la necesidad de análisis.
- Refrentado los cortes en las caras seleccionadas.
- Preparación de las probetas para el análisis metalográfico:
  - Pulido de las probetas hasta papel esmeril 600.
  - Ataque químico para revelación de estructuras.
- Observación macroscópica de resultados estructurales.

#### **4.2.1. Obtención de la materia prima**

La obtención de la materia prima se realizó, dentro de las características del proceso artesanal, seleccionando chatarra de aluminio de latas de bebidas. Se sabe de antemano, de acuerdo a información proporcionada por los proveedores de envases, que son fabricadas de material de alta pureza.

Las latas de bebidas son un tipo de envase metálico, en este caso de aluminio, que, debido a su bajo costo, buena resistencia mecánica y buena conservación del producto envasado, son una de las opciones más utilizadas en todo el mundo. Al finalizar el consumo del producto se desecha el envase, el cual puede ser reciclado y utilizado para la elaboración de nuevas latas o para

la fabricación de utensilios y herramientas fundidas, además de una infinidad de productos.

La fundición artesanal se realiza en el país desde hace muchos años, pero en las investigaciones anteriores a la presente no se ha establecido una metodología práctica y útil para el proceso, lo cual daría la ventaja a la pequeña industria de poder optimizar sus recursos de materia prima y llegar a instaurar equipos y herramientas en el mercado con las suficientes propiedades de resistencia mecánica y de costo reducido para que puedan ser adquiridas por un cliente, el que determinaría y reconocería la calidad de los productos.

Para procesar la materia prima, se fundieron las latas en un horno de piso a base de diesel como combustible, perteneciente al Laboratorio de Metalurgia de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala, el cual cuenta con un crisol de 30 kilogramos de capacidad, figura 31.

Durante el procedimiento, se producen abundantes escorias, debido a impurezas insolubles en estado líquido y pinturas utilizadas para la señalización publicitaria de cada uno de los productos. Estas impurezas salen a flote durante el proceso de fundición y se pueden extraer de manera manual con un escoriador de acero.

Posteriormente, se procedió a la colada del primer material obtenido de acuerdo a dos fines específicos: 1) para su utilización como aluminio de alta pureza, y. 2) para la preparación de las aleaciones propuestas.

Figura 31. **Horno de piso para fundición**



Fuente: Laboratorio de Metalurgia, edificio T-7, facultad de ingeniería USAC.

#### **4.2.2. Fundición de aluminio de alta pureza**

Para la fundición del material para la fabricación de las probetas, lingotes de aluminio de alta pureza, se tomaron cantidades específicas de la fundición de materia prima proveniente del horno de piso, y se depositaron en el crisol de 1kilogramo del horno eléctrico construido para el efecto, hasta lograr el llenado, en estado líquido, ocupando  $\frac{3}{4}$  de la capacidad volumétrica del crisol de 1 kilogramo.

Se procedió a fundir el material dentro del crisol, alcanzando una temperatura de 700 centígrados dentro del horno. Esta temperatura, incluye un sobrecalentamiento de 40 centígrados, garantizando que la fundición no tenga núcleos sólidos durante el proceso de colada, lo que podría producir crecimiento granular prematuro y posible segregación localizada en algunos espacios de la pieza terminada en las aleaciones.

El sobrecalentamiento, constituye el principal parámetro de la fluidez del metal (Aguilar Rivas, Roberto A., *Fluidity of Al-Cu alloys with no superheats and*

*solidification*, 2011); de acuerdo a esto, la colabilidad se mejora y por lo tanto la creación de figuras complejas es factible.

El procedimiento se realizó varias veces, de acuerdo al número predeterminado de probetas necesarias. Posteriormente se procedió a la colada en cada uno de los moldes escogidos. Para cada caso específico, se fundieron tres lingotes, escogiéndose el más representativo para su análisis, desde el punto de vista metalográfico.

Aunque se utiliza como marco de referencia la fundición artesanal, uno de los objetivos de la presente investigación consiste en la propuesta de una metodología ingenieril de fácil aplicación, útil en el campo de la industria de la fundición. Los parámetros que se deben de considerar al momento de la fundición de los materiales propuestos, se describirán en el transcurso del presente capítulo.

Figura 32. **Proceso de fundición en el horno experimental**



Fuente: Laboratorio de Metalurgia, edificio T-7, Facultad de Ingeniería USAC.

Durante la fusión, mientras el metal se encuentra en el crisol, es de importancia significativa considerar su interacción con el medio en el cual se funde el material. Para fines de elaboración de coladas de aluminio se debe de tomar en cuenta la facilidad de la formación de óxidos y también su reactividad con el hidrógeno. La interacción con el oxígeno, por ejemplo, provoca la formación de una capa de óxido sobre el aluminio; la cual a nivel granular disminuye la resistencia mecánica de las piezas fundidas debido a las inclusiones en los límites de grano.

Por otro lado, el hidrógeno, al reaccionar con el aluminio durante el proceso de fundición, forma burbujas, las cuales no pueden salir fácilmente de la colada durante la fusión provocando imperfecciones intra-granulares y funcionando como centros de concentración de tensiones, lo que reduce la resistencia mecánica; esto se puede reducir con desgasificantes, los cuales son utilizados a nivel industrial. Estos efectos son despreciables en la presente investigación, ya que se desarrollan procesos artesanales, pero en la realización de una buena metodología de fundición se debe de tomar muy en cuenta la interacción de elementos ambientales que pueden variar las propiedades esperadas de las fundiciones fabricadas.

#### **4.2.2.1. Fundición de las aleaciones**

Para la fundición de aleaciones, en primer lugar hay que establecer un balance proporcional de la cantidad de concentración de soluto presente en la colada esperada, esto se realiza debido a que conociendo las ventajas de las diferentes interacciones de los distintos elementos aleantes en las propiedades necesarias para las distintas aplicaciones, se pueden llegar a mejorar o reducirlas significativamente.

Las aleaciones aluminio cobre presentadas en la investigación son las más fáciles de realizar debido a la disponibilidad de la materia prima para su elaboración, aluminio de latas y cobre proveniente de conductores eléctricos. Ambos materiales considerados como de alta pureza.

La elección del cobre de conductor eléctrico se debe en gran manera al hecho de que para cumplir su cometido, el conductor, debe de tener una resistividad mínima, la cual se obtiene con un material conductor de alta pureza. Además de la facilidad de obtener cantidades necesarias para la elaboración de las distintas aleaciones. Complementariamente, este es el material empleado por los fundidores para la elaboración de las aleaciones.

Aunque se sabe que el método no es exacto, ya que tanto en los procesos de investigación, cuanto en los industriales, debe emplearse una aleación madre para lograr resultados más exactos en la concentración de soluto, Aguilar Rivas, Roberto A. 2011, a los fines de la presente investigación, simulando los procesos artesanales, la fundición de las aleaciones se realizó mediante el pesaje de cantidades proporcionales de material de aluminio de alta pureza y material de cobre, según la necesidad de formación de la aleación, (véase la figura 43 el cable de cobre y el lingote de aluminio), en el presente caso aleaciones 1 , 3 y 5 por ciento cobre.

Se introducen los dos metales dentro del crisol y se llega hasta una temperatura de aproximadamente 700 grados centígrados. Para garantizar la distribución homogénea del soluto en cuestión, se realizó la agitación por medio de mezclado mecánico, utilizando una varilla de acero.

Esta metodología de fusión de aleaciones garantiza en primer lugar una correcta distribución del soluto y después la homogeneización de las cantidades necesarias del mismo dentro de la colada.

La temperatura de colada de las aleaciones, se mantuvo en 700 grados centígrados, tomando en cuenta que el punto de fusión de las mismas varía de acuerdo al diagrama de equilibrio, en disminución, con la concentración de soluto. Ver diagrama aluminio-cobre figura 34.

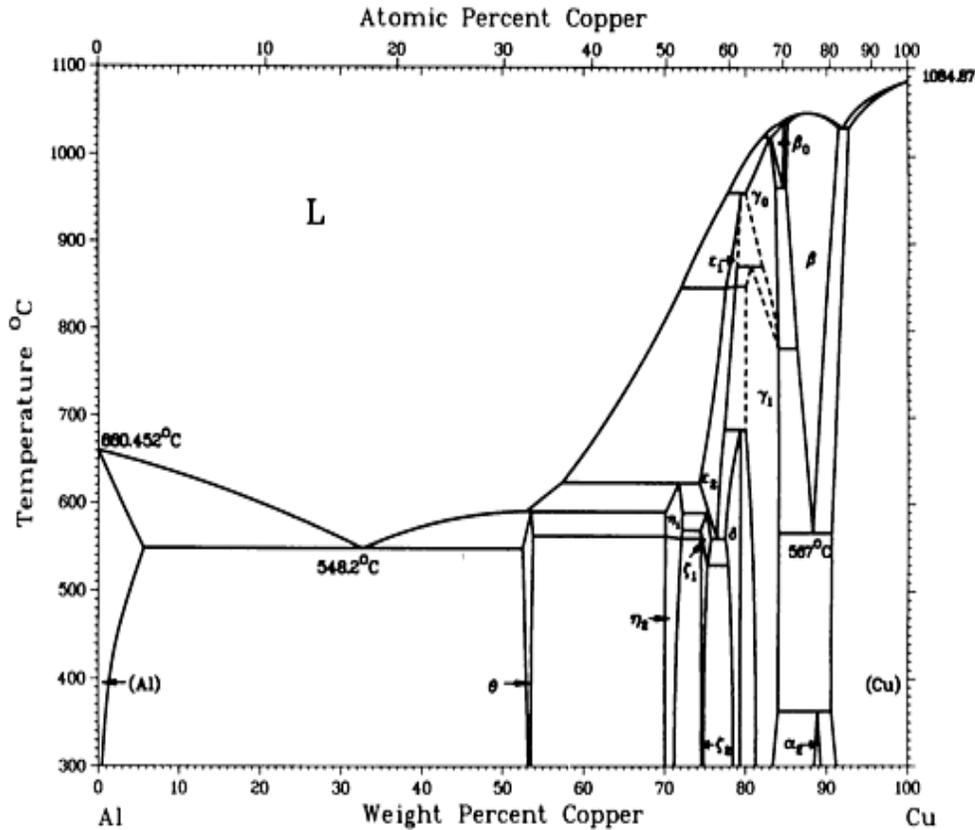
Las aleaciones desarrolladas como se puede apreciar, son del tipo hipoeutécticas, mostrando la trayectoria de la solidificación apreciada en el diagrama de fase, es de hacerse notar que las aleaciones durante su solidificación cambian de un estado líquido, a una aleación parcialmente soluble en el estado sólido.

Figura 33. **Materiales para aleación 1% cobre**



Fuente: Laboratorio de Química Industrial, edificio T-5, Centro de Investigaciones de Ingeniería, Facultad de Ingeniería, USAC.

Figura 34. Diagrama de equilibrio aluminio-cobre



Fuente: *Metals Handbook Volume 3 Alloy Phase Diagrams*. p. 291.

#### 4.2.3. Proceso de colada de lingotes

Después de obtenerse materia prima suficiente para la elaboración de los lingotes y de fundirla nuevamente en el horno experimental, se procedió a colar las fundiciones dentro de las distintas lingoteras expuestas en el capítulo cuatro.

El diseño del vertedor garantiza que la presión metalostática de la aleación, se mantenga constante.

Para esta etapa se consideró, en primer lugar, la elección del molde, según la necesidad de fabricación de piezas a nivel artesanal. Si se utiliza un molde del tipo permanente hay que considerar todo lo referente a la contracción de las aleaciones, la facilidad de mecanización del molde, la modalidad de desencofrar o retirar la colada ya solidificada, la facilidad de la elaboración de la pieza fundida, la degradación dimensional debido a la erosión térmica y deformación en caliente del molde.

Los moldes permanentes ofrecen la facilidad de controlar la transferencia calórica en la interfaz metal molde, esto debido a que este tipo de moldes se pueden precalentar y pintar. Morales, Álvaro, 1975, hace un análisis de las variables externamente controlables que mejoran los resultados obtenidos en las estructuras de los lingotes, tales como las pinturas y la manera en que influye el coeficiente de transferencia calórica en la interfaz metal molde.

Figura 35. **Fundición en molde de grafito**



Fuente: Laboratorio de Metalurgia, edificio T-7, Facultad de Ingeniería, USAC.

Figura 36. **Fundición en molde de acero al medio carbono**



Fuente: Laboratorio de Metalurgia, edificio T-7, Facultad de Ingeniería, USAC.

Figura 37. **Fundición en molde hecho de tubo de acero de bajo carbono**



Fuente: Laboratorio de Metalurgia, edificio T-7, Facultad de Ingeniería, USAC.

La utilización de moldes no permanentes tienen los inconvenientes de que después de su utilización se deben de destruir para extraer la colada ya solidificada, su control en función del tipo de material que se utiliza para su elaboración es más estricto.

Siendo la arena de fundición el material más ampliamente utilizado a nivel industrial y artesanal, su control de humedad es de relevancia significativa, así como su permeabilidad y dureza. Artesanalmente este control se realiza en forma empírica.

Las ventajas que se tienen con respecto a los moldes no permanentes, son que se pueden crear figuras complejas, se pueden manufacturar piezas de dimensiones relativamente mayores en comparación a los moldes permanentes. La arena de moldeo se puede re-utilizar durante muchas veces con una inversión menor y los moldes se pueden pintar, pero las pinturas para este efecto son especiales.

Figura 38. **Fundición en molde de arena**



Fuente: Laboratorio de Metalurgia, edificio T-7, Facultad de Ingeniería, USAC.

Tal como se analizó anteriormente, en la presente investigación se tiene como tipos de moldes para fundición cuatro diferentes materiales, siendo estos tres de tipo permanentes, figuras 26, 27 y 28; y uno de tipo no permanente, figura 29; esto para diferenciar los resultados esperados y obtenidos dependiendo de uno de los parámetros que controla las estructuras de solidificación de los metales: la transferencia calórica en la interfaz metal molde.

Para el proceso de colada, se retira la tapa del horno experimental y se procede a sacar el crisol con la fundición en su interior con las pinzas especiales descritas en el capítulo anterior. Para fines de una buena práctica de fundición este es el paso más delicado y donde se corre el mayor riesgo para el operario, ya que el metal está a una temperatura elevada por lo que el equipo de protección personal es vital. En este caso, la utilización de guantes que soporten altas temperaturas, zapatos de tipo industrial, mascarilla<sup>5</sup>, ropa especial que soporte altas temperaturas (ignifuga) y gafas o careta protectora, es esencial.

Después de haber extraído el crisol del horno se coloca en el vertedor, dispositivo utilizado para colar las fundiciones en los diferentes moldes o lingoteras (véase figura 39).

Durante la investigación no se precalienta ningún molde, debido a que en la industria artesanal de la fundición, el precalentamiento es observado como un desperdicio energético que acarrea gastos extras; ignorando de esta manera que si se precalentara el molde, del tipo permanente, se podría mejorar significativamente la elaboración de piezas complejas; así también, la obtención de propiedades mecánicas diferentes debido al crecimiento granular provocado

---

<sup>5</sup> En el proceso de fundición de plomo se debe de tener mucho cuidado debido a la emanación de gases nocivos para la salud provenientes del metal en cuestión.

por la disminución de la velocidad de la extracción calórica al momento de solidificar la pieza fundida.

Figura 39. **Proceso de extracción del crisol**



Fuente: Laboratorio de Metalurgia, edificio T-7, Facultad de Ingeniería, USAC.

Al momento de verter el contenido del crisol dentro de la lingotera se debe de cuidar la velocidad aproximada a la que se realiza la labor, debido a que mientras más tiempo este fuera del horno caliente, la fundición solidificará más rápido y por lo tanto los resultados esperados serán distintos. Esto es relevante en el momento de iniciar la colada, debido a que si se hace muy rápido, dentro de la lingotera o molde se produce un salto tipo torbellino de fundición el cual solidifica al contacto con el molde y produce la formación de gotas frías dentro de la fundición requerida. Por otro lado, si se hace muy lento, el flujo de metal puede solidificar rápidamente antes de llenar por completo todas las cavidades del molde o su simple figura, así también la creación de imperfecciones de la fundición como cámaras vacías, burbujas y fisuras en caliente es posible.

Para los lingotes presentados, debido al proceso de colada manual, no se logra controlar exactamente la velocidad, sin embargo la altura de la cual se procedió a colar era constante, debido al diseño del vertedor. Hay que tomar en cuenta que en la fundición, la presión metalostática, o sea la altura de colada, es uno de los parámetros que definen la fluidez, y, por consiguiente, la colabilidad del metal (Aguilar Rivas, Roberto A., Introducción a la metalurgia, 2012).

En los moldes de grafito y de tubo de acero de bajo carbono, no se tuvieron a la vista imperfecciones de fundición durante la colada; sin embargo en el molde de acero de medio carbono se formaba rápidamente el torbellino antes descrito aunque la velocidad no fuera elevada. En el molde de arena, la erosión de las paredes del molde provocaba la inclusión de arena proveniente de las paredes próximas al contacto del lingote. Esto se debió al hecho de que, para simular más cercanamente el proceso artesanal, no se tuvo control de la humedad, permeabilidad y dureza de la arena.

El tiempo de permanencia de la fundición dentro del molde depende en gran medida del coeficiente de extracción calórica, ya que mientras más rápido se extrae el calor del sistema más rápida será la solidificación y por lo tanto menor el tiempo que permanezca la fundición dentro del molde.

Luego de vaciado el contenido del crisol este debe de ser introducido de nuevo al horno para que su enfriamiento sea homogéneo, es decir, al mismo tiempo que el horno se enfría, asegurando de esta manera que la vida útil del crisol sea extendida.

Los moldes permanentes se deben limpiar en caliente, ya que es más fácil retirar las capas de material que solidificaron en las paredes de los mismos, de la misma manera se ejecuta esta operación en el crisol.

#### **4.2.4. Proceso de corte**

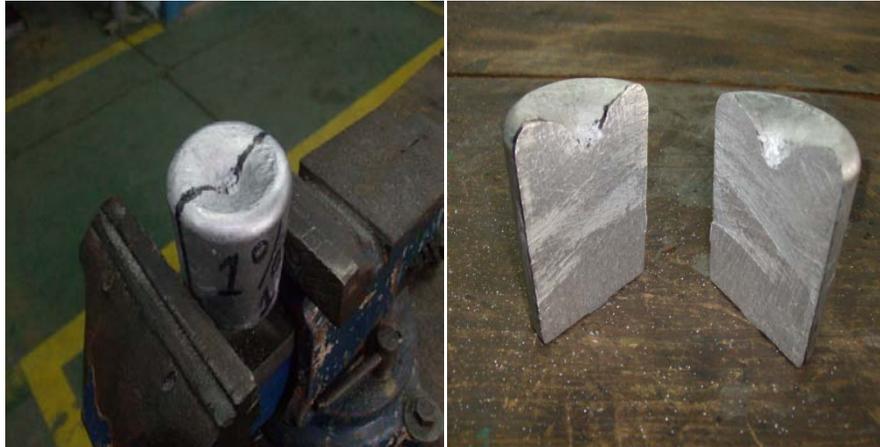
Para poder realizar las observaciones de las estructuras de solidificación de los lingotes, es necesario realizar algunos cortes específicos que las pongan de manifiesto.

Cuando ya está solidificado el lingote, se debe de desencofrar la fundición y esperar el tiempo necesario hasta que la temperatura del lingote sea la misma al ambiente, ya que se correría riesgo al manipularlo antes de que esto sucediera. La labor de corte es necesaria ya que la forma básica del lingote es cónica, sin un área plana suficientemente aceptable para observar las estructuras obtenidas durante el proceso de solidificación; por lo cual la disección en partes de interés es necesaria.

Las figuras que se presentaran más adelante corresponden a las partes cortadas de diferentes lingotes fundidos en diferentes moldes. Los cortes se realizan en forma longitudinal o transversal, según sea la búsqueda de resultados necesarios para analizar las estructuras de solidificación.

El control de la temperatura es muy importante durante la labor de corte previo al descubrimiento de estructuras de solidificación, ya que la interacción de la sierra con las superficies de contacto del lingote produce el fenómeno de re cristalización al alcanzarse cierta temperatura, por lo que mientras se corta se debe de refrigerar el corte o pausar el mismo.

Figura 40. **Corte longitudinal de un lingote**



Fuente: Laboratorio de Procesos de Manufactura, edificio T-7, Facultad de Ingeniería, USAC.

#### **4.2.5. Proceso de refrentado**

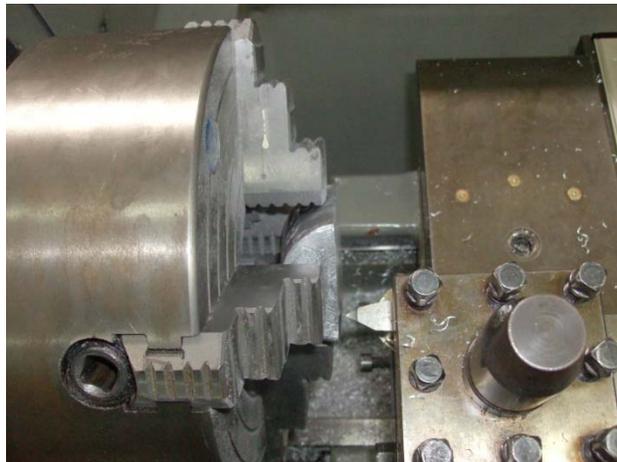
Para revelar estructuras de solidificación, la superficie a observar debe de estar lo más plana posible ya que la forma de observación es por medio de la reflexión de la luz sobre el área a estudiar y si existen imperfecciones superficiales que no reflejen de buena manera las estructuras se pierde la objetividad de la investigación. La figura 41 ilustra el proceso de Refrentado.

#### **4.2.6. Proceso de pulido**

Por las razones antes descritas, de la necesidad de una superficie aceptablemente plana y con capacidad de reflejar la luz sobre sus estructuras, el proceso a seguir después de refrentar, es el pulido mecánico con papel esmeril. Siempre montado el lingote sobre el torno se puede realizar esta labor,

la cual consiste en hacer girar el lingote y aproximarle el papel esmeril sobre la superficie refrentada en una secuencia de números de aspereza descendente.

Figura 41. **Proceso de refrentado**



Fuente: Laboratorio de Procesos de Manufactura, edificio T-7, Facultad de Ingeniería, USAC.

La secuencia utilizada fue la siguiente: papel esmeril número 150, 240, 360, 400, 500 y 600; con esto se garantiza que las superficies a manipular queden con un acabado superficial tipo espejo, garantía de revelación de estructuras de solidificación (*Metals Handbook, Metallography and microstructures*, 1985).

Durante este proceso también se debe de controlar la temperatura y la presión que se hace sobre el lingote ya que si se excede la presión sobre el mismo se pueden desprender granos que rallarían la superficie que se necesita observar, provocando de esta forma la necesidad de volver a pulir la superficie y así eliminar los rallones. Para el control de la temperatura se puede utilizar agua durante el proceso.

Figura 42. **Proceso de pulido con papel esmeril**



Fuente: Laboratorio de Procesos de Manufactura, edificio T-7, Facultad de Ingeniería, USAC.

#### **4.2.7. Proceso de ataque químico**

El ataque químico, es necesario en la investigación metalográfica para poder revelar estructuras visibles tanto a nivel macroscópico como microscópico. Un área a ser estudiada debe de estar pulida de manera adecuada, sin rallones, protuberancias o inclusiones ajenas al metal a estudiar. Algunas veces los metales pueden revelar algunas formas de estructuras con el simple hecho de ser pulido, sin embargo las micro estructuras necesitan de un ataque químico para ser reveladas.

Poros, fisuras, inclusiones no metálicas y fosos se pueden apreciar con el simple proceso de pulido, pero no muestra sus estructuras debido a que la mayoría de la luz se refleja de manera uniforme.

Hay dos formas de observar estructuras por medio del ataque, de forma destructiva y no destructiva. Los métodos no destructivos solo necesitan de la óptica para la observación de estructuras y los métodos destructivos incluyen el ataque químico, electroquímico, electrolítico, por precipitación, por tintes calientes, anodizado, ataque potencioestático, físico, magnético, ataque de iones y ataque térmico.

En la presente investigación se seleccionó el ataque destructivo del tipo químico. El tipo de estructuras que se necesitan revelar son a nivel macroscópico es decir observadas a simple vista o hasta un aumento de 20X.

El macro ataque necesario para revelar estructuras de solidificación observables a simple vista se utiliza para mostrar imperfecciones superficiales en algunos casos; pero para usos prácticos, su función será la de limpiar los límites de grano, provocando un contraste entre estos y los mismos granos para su observación y razonamiento de resultados obtenidos. En algunos casos, como por ejemplo las aleaciones, el ataque puede llegar a revelar zonas de segregación, estructuras de solidificación de superficies soldadas, forjas, extrusiones, fundiciones y piezas con tratamiento térmico.

#### **4.2.8. Ataque y práctica de ataque**

Una variedad de reactivos están disponibles, incluyendo ácidos, bases, soluciones neutrales, mezclas de soluciones, sales fundidas y gases. Muchas de las fórmulas propuestas han sido elaboradas empíricamente. La velocidad del ataque es determinada principalmente por el grado de disociación del atacante y su conductividad eléctrica. Ambos son influenciados por pequeñas adiciones de otros químicos. Esto explica el hecho de que muchas fórmulas

contienen pequeñas cantidades de sustancias cuya importancia no es inmediatamente evidente.

La estabilidad de muchas de las soluciones atacantes está limitada; los potenciales de oxidación-reducción (redox) varían con el tiempo. Cambios que necesitan ser descartados después de un tiempo limitado también puede ocurrir mientras el atacante o reactivo esta en uso.

Tiempo de ataque: puede variar desde algunos segundos hasta varias horas. Cuando no se dan instrucciones, el progreso del ataque es juzgado por la apariencia de la superficie durante el ataque. La superficie suele ser menos reflexiva (más opaca) con este método de ataque.

Temperatura del ataque: la temperatura de ataque y el tiempo del mismo están íntimamente relacionados; incrementando la temperatura usualmente disminuye el tiempo del ataque. Sin embargo esto no es recomendable, porque el contraste podría ser desigual cuando la velocidad del ataque es demasiado rápida. La mayoría de los reactivos (atacante) se utilizan a temperatura ambiente.

Errores: fuentes de error son numerosas, sobre todo en el ataque electroquímico. Errores en el ataque pueden producir malas interpretaciones de las microestructuras. Por ejemplo, un ataque precipitado o soluciones lavadas pueden ser interpretados como fases adicionales.

Limpieza: al finalizar cualquier ataque químico o electroquímico, se deben de lavar las muestras. Si el ataque fuera muy fuerte se puede limpiar las piezas con algún alcohol. Además si el reactivo produce capas solubles en agua, esta

debe de evitarse lo más posible. Por último si el ataque es muy fuerte el espécimen (muestra) debe de ser neutralizado antes de ser enjuagado.

Almacenamiento de muestras: si se necesita guardar algún tipo de espécimen, el lugar donde se haga debe de estar libre de humedad para evitar la corrosión (*Metals Handbook, Properties and selection: non ferrous alloys and especial purpose materials*, 1990).

A fin de revelar estructuras de solidificación del aluminio y sus aleaciones al cobre, se utiliza la información antes descrita y la encontrada en la bibliografía (*Metals Handbook, Properties and selection: non ferrous alloys and especial purpose materials*, 1990); la cual expone en una tabla, específicamente para aluminio y sus aleaciones, los diferentes tipos de reactivos utilizados para la revelación de las estructuras buscadas, dependiendo en gran medida del elemento aleante en mayor proporción.

Antes de poder atacar la muestra se debe de limpiar la superficie asegurándose que no existe algún tipo de grasa o aceite que contaminaría de mala manera la superficie a observar, sin embargo no siempre es necesario.

Como no se tenía una metodología anterior a la de Álvarez, Elvis, 1990, y cuyo reactivo utilizado no dio los resultados esperados en la presente investigación, se procedió a experimentar con los reactivos propuestos en la tabla VII; iniciando con el método de ataque alcalino, el cual no dio los resultados esperados, provocando sobre las superficies oscurecimiento y un tipo de corrosión visiblemente observable (véase la figura 43). Por lo que se siguió experimentando hasta obtener resultados satisfactorios con el reactivo *poulton's* y el reactivo *tucker's*.

La preparación del reactivo necesario para la revelación de estructuras de solidificación del aluminio de alta pureza y sus aleaciones con cobre, fue realizado en el Laboratorio de Química Industrial del Centro de Investigaciones de Ingeniería, para fines de revelación de estructuras en aluminio de alta pureza se utiliza el llamado reactivo de *poulton's* que consta en esencia de una mezcla de ácido nítrico, clorhídrico, fluorhídrico y agua (véase tabla V). Como se había mencionado antes se había experimentado con el reactivo de *tucker's*, pero la cantidad a realizar según la fórmula es muy elevada para los usos de revelación de estructuras en los lingotes, por lo que se optó por el reactivo antes mencionado.

Para aleaciones se utiliza el reactivo número 7 de la tabla V, si los resultados no son los satisfactorios se utiliza el reactivo de *keller's* modificado. Para la realización del proceso de ataque químico, así como para la elaboración de los reactivos, se contó con la asesoría del Ingeniero César García y el apoyo de personal de los laboratorios de la Escuela de Ingeniería Química de la FIUSAC.

La metodología que se utiliza para este ataque es la siguiente; con el reactivo ya preparado se procede a aplicarlo sobre cada una de las superficies pulidas por medio de un hisopo. Primero sumergiendo dentro del reactivo preparado el hisopo y luego frotándolo suavemente sobre el área de interés hasta lograr los resultados esperados, la revelación de estructuras de solidificación.

Este proceso se realizó utilizando el equipo de protección personal adecuado debido a que la interacción con ácido fluorhídrico es muy peligrosa, además se tiene que estar siempre bajo la acción de una campana extractora de gases, y bajo la asesoría permanente de un ingeniero químico que conozca

el procedimiento; este equipo e implementos son suministrados y encontrados en el laboratorio antes mencionado.

Figura 43. **Ataque experimental con soda caustica**



Fuente: Laboratorio de Química Industrial, edificio T-5, Centro de Investigaciones de Ingeniería, Facultad de Ingeniería, USAC.

Figura 44. **Ejecución del ataque con el reactivo de *poulton's***



Fuente: Laboratorio de Química Industrial, edificio T-5, Centro de Investigaciones de Ingeniería, Facultad de Ingeniería, USAC.

Luego de obtener los resultados deseados, se lava la pieza antes atacada en agua desmineralizada y por último en agua del grifo, para después ser secada por medio de un papel absorbente y se almacena en un sitio libre de humedad y donde no quede expuesto a rallones o golpes, ya que esto degradaría la observación de los resultados y se necesitaría repetir el proceso de pulido y ataque.

Figura 45. Limpieza del lingote



Fuente: Laboratorio de Química Industrial, edificio T-5, Centro de Investigaciones de Ingeniería, Facultad de Ingeniería, USAC.

Tabla V. Reactivos utilizados para la revelación de estructuras a nivel macroscópico

Reactivo	Fórmula	Aplicación
1 Reactivo caustico	10 g de NaOH disueltos en 90 ml de H <sub>2</sub> O	Sumerja el espécimen de 5 a 15 minutos en la solución calentándola de 60 a 70 °C, lavar con agua, untar con una solución de 50% de HNO <sub>3</sub> para quitar suciedades, lavar con agua y secar
2 Reactivo de <i>tucker</i>	45 ml de HCl(concentrado), 15 ml de HNO <sub>3</sub> (concentrado), 15 ml de HF (48%), 25 ml de H <sub>2</sub> O	Mezclar antes de usar (fresco), sumerja o unte el espécimen por 10 o 15 segundos, lavar con agua tibia, secar y examinar para

Continuación de la tabla V.

			los resultados deseados. Repetir el proceso hasta obtener los resultados esperados
3		1 ml de HF (48%), 9 ml de H <sub>2</sub> O	Esto requiere que se unte rápidamente sobre la superficie. Sumergir si el resultado no es el deseado, lavar con agua caliente, secar.
4	Reactivo de <i>poulton</i>	12 ml de HCl(concentrado), 6 ml de HNO <sub>3</sub> (concentrado), 1 ml de HF (48%), 1 ml de H <sub>2</sub> O	Puede ser pre mezclado y almacenado por largos periodos. Ataque por inmersiones breves o por medio de untado, lavar con agua fría, no permita que el reactivo o el espécimen entren en contacto con calor durante el ataque.
5		50 ml HCl (concentrado), 15 ml de HNO <sub>3</sub> (concentrado), 3 ml de HF (48%), 5 ml de una solución de FeCl <sub>3</sub> (concentrado)	Hágase la mezcla fresca antes de usar, enfriar la solución hasta 10 o 15 °C en camisa de agua fría, sumerja unos pocos segundos, lavar con agua fresca, repetir hasta obtener los resultados esperados
6		10ml HCl (concentrado), 30 ml de HNO <sub>3</sub> (concentrado), 20 ml de H <sub>2</sub> O, 5 gramos de FeCl <sub>3</sub>	Hágase la mezcla fresca antes de usar, agregue el acido fluorhídrico al final. Usar a temperatura ambiente. Sumerja por pocos segundos, lavar con agua fresca, repetir hasta obtener los resultados esperados. Puede usarse también por medio de untado.
7		60 ml de HCl (concentrado), 40 ml de HNO <sub>3</sub> (concentrado)	Hágase la mezcla fresca antes de usar. Sumerja o unte por pocos segundos, lavar con agua fría, secar y examinar. Repita el proceso de ser necesario.
8		20 gramos de CuCl <sub>2</sub> (cloruro cúprico), 100 ml de H <sub>2</sub> O	Sumerja el espécimen por pocos segundos. Remover los depósitos de cobre con una mezcla de 6 partes de HNO <sub>3</sub> (concentrado) y 1 parte de HF (concentrado). Repetir hasta obtener el resultado esperado. Limpiar con la mezcla de HNO <sub>3</sub> -HF y lavar con agua entre los pasos.

Fuente: *Metals Handbook Volume 9 Metallography and microstructures aluminium alloys metallographic techniques and microstructures.* p. 708.

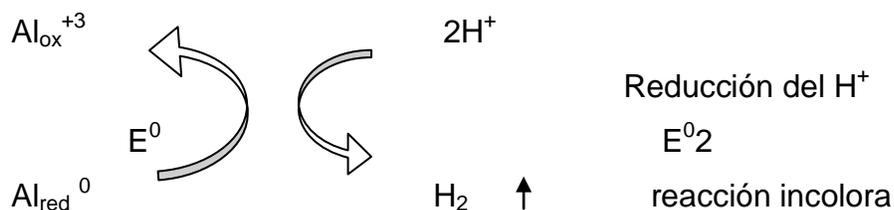
Tabla VI. **Aplicabilidad de reactivos en dependencia del tipo de aleación utilizada**

Aleación	Reactivo a utilizar
Aluminio de alta pureza	4 o 5
Aluminio de pureza comercial series 1XXX	1,2 o 4
Todas las aleaciones de alta concentración de cobre series 2XXX y aleaciones fundidas	1,6 o 7
Aleaciones aluminio manganeso series 3XXX	1,2,4 o 6
Aleaciones aluminio silicio series 4XXX y aleaciones fundidas	2,3,4 u 8
Aleaciones aluminio magnesio series 5XXX y aleaciones fundidas	1,2,4 o 6
Aleaciones aluminio magnesio silicio series 6XXX y aleaciones fundidas	1, 2,4 o 6
Aleaciones aluminio cobre magnesio zinc series 7xxx y aleaciones fundidas	1 o 6

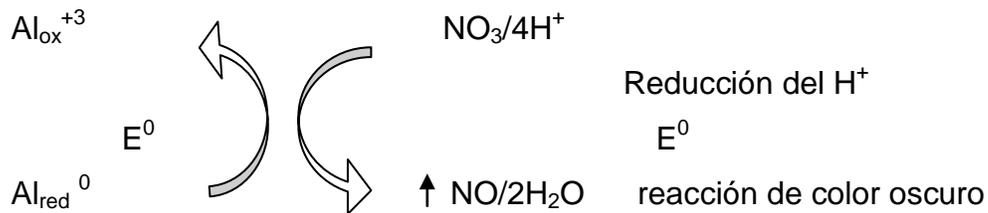
Fuente: *Metals Handbook Volume 9 Metallography and microstructures aluminium alloys metallographyc techniques and microstructures*. p. 713.

#### 4.2.9. Reacción química <sup>6</sup>

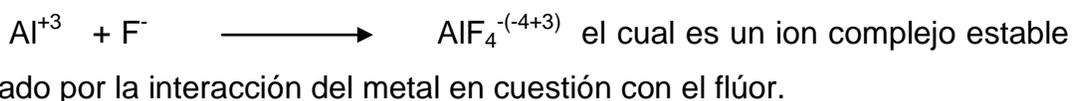
Durante el proceso de ataque ocurre una reacción química que limpia la superficie donde interactúa el reactivo. Esto conlleva la siguiente reacción; al tener una solución de ácido nítrico y clorhídrico, conocida como agua regia y su reacción con el ácido fluorhídrico se tiene:



<sup>6</sup> Según Ing. César García, Jefe Sección de Química Industrial, CII, USAC

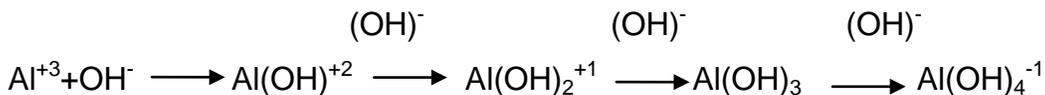


Como el aluminio es anfótero, es decir que puede reaccionar como ácido o como base entonces



Esto se precipita en forma de una sustancia oscura la cual no puede volverse a depositar en los límites de grano, evitando de esta manera la aparición del ion  $\text{Al}^+$ .

La reacción estequiometría del radical  $(\text{OH})^-$  es la siguiente:



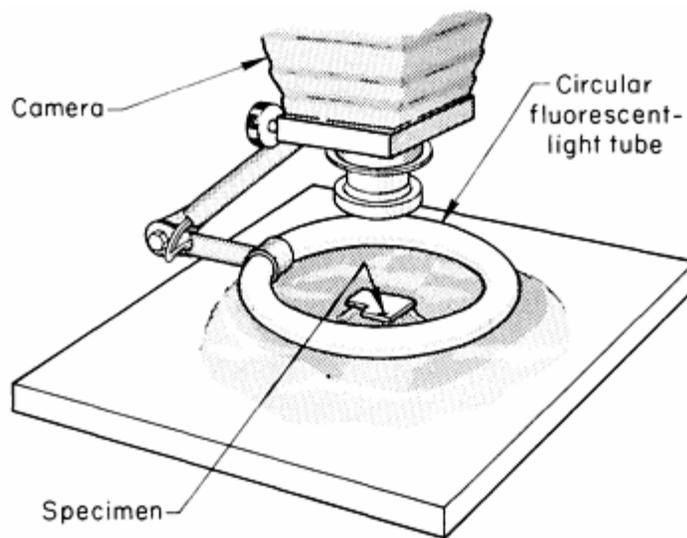
Siguiendo de esta manera cada vez que hay interacción de  $(\text{OH})^-$  formando hidróxidos de aluminio.

#### 4.2.10. Fotografía

Para la correcta realización de las fotografías de las probetas, se siguió la metodología que se expone a continuación (*Metals Handbook, Metallography and microstructures*, 1985): la muestra a ser fotografiada se coloca en medio de un tubo circular fluorescente, capturando la imagen resultante con una cámara.

Para mejores resultados se debe de manipular la altura de la muestra dentro del tubo fluorescente, esto para mejorar los contrastes entre los claros y oscuros, los cuales son reflejos de las estructuras reveladas.

Figura 46. **Método de fotografía**



Fuente: *Metals Handbook Volume 12 Fractography, photography*. p. 161.

#### **4.3. Resultados experimentales y análisis metalográfico**

Los siguientes resultados, representan las características más significativas de las estructuras resultantes, obtenidas por el proceso de fundición artesanal para lo cual fue necesario colar cuatro probetas, en cada caso, y seleccionar la más representativa.

#### 4.3.1. Aluminio de alta pureza

El aluminio de alta pureza utilizado, proviene de chatarras metálicas de envases para bebidas, ya que como se ha mencionado cumple con los requerimientos necesarios para los objetivos de la presente investigación.

- Lingote número uno

La figura 47, muestra un contenido superficial superior de granos equiaxiales, una zona columnar de tamaño muy pequeño localizada, en su mayoría, cerca de las esquinas inferiores, corroborando lo mencionado en la publicación de Aguilar Rivas, Roberto A., 2012, ya que se aprecia que el crecimiento columnar no se desarrolla totalmente en la matriz de crecimiento de la zona chill. La zona chill difícil de apreciar a simple vista ocupa todas las zonas próximas al contacto con el molde terminando cerca de los vértices del rechupe. Este lingote fue colado en una lingotera de grafito, cortado de manera longitudinal y atacada con el reactivo de *poulton* 's; se fotografió a una altura de 20 centímetros.

El frente de solidificación no se aprecia por la presencia abundante de granos equiaxiales. Estos resultados, son producidos por la relativamente moderada velocidad de extracción de calor, debida al tipo de material de la lingotera.

- Lingote número dos

El lingote número dos, figura 48, fue colado en molde de grafito con mazarota, y presión metalostática normal. Este fue cortado en 3 secciones denominadas cola, centro y punta basado en la metodología expuesta por

Aguilar Rivas, Roberto A., 2011. Se puede apreciar el efecto de la multiplicación cristalina por la convección normal. Se aprecia, de igual manera que en el lingote número uno, la forma en que los granos equiaxiales dominan en su mayoría el volumen de la colada, debido a transferencia moderada (rápida) de calor.

Figura 47. **Lingote número uno**



Fuente: Laboratorio de Metalografía, edificio T-7, Facultad de Ingeniería, USAC.

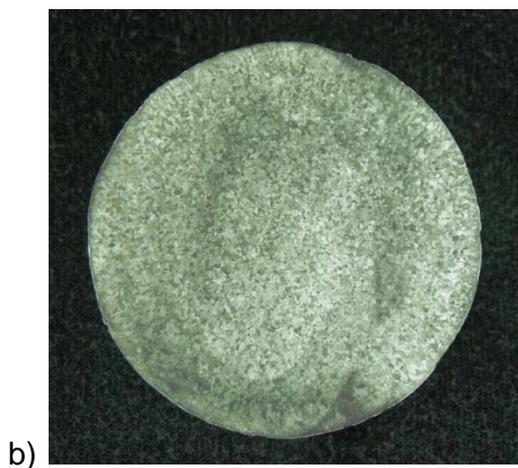
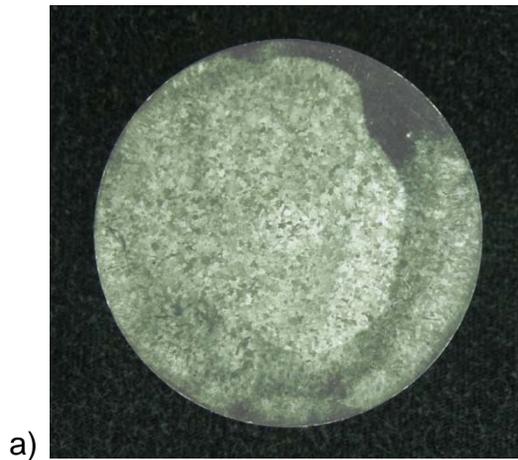
- **Lingote número tres**

El lingote número tres, figura 49, fue colado en un molde de grafito con mazarota, con presión metalostática normal y cortado de manera longitudinal. Se aprecia la forma en que la mazarota cumple su cometido propiciando el crecimiento equiaxial homogéneo debajo de ella. Por estar colado en un molde de grafito de la misma manera que los lingotes uno y dos, se tiene una mayoría

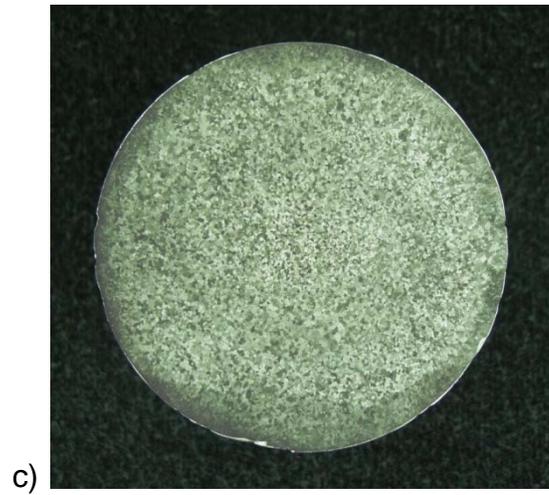
de granos equiaxiales en el centro del lingote, también la leve aparición de granos columnares que chocan en las esquinas inferiores. En los vértices de la mazarota con el lingote se aprecia el crecimiento equiaxial muy cerca de la zona de contacto con el molde. El rechupe es mínimo debido a la intervención de la mazarota durante el proceso de solidificación.

Figura 48. **Lingote número dos**

a) Cola, b) Centro, c) Punta



Continuación de la figura 48



Fuente: Laboratorio de Metalografía, edificio T-7, Facultad de Ingeniería, USAC.

**Figura 49. Lingote número tres**



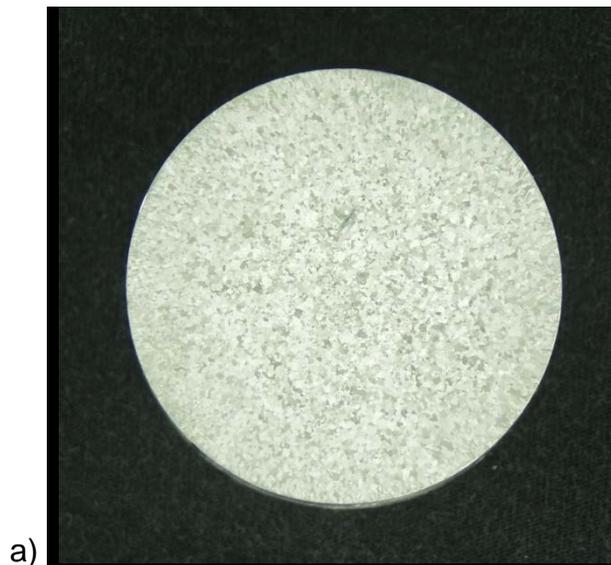
Fuente: Laboratorio de Metalografía, edificio T-7, Facultad de Ingeniería, USAC.

- Lingote número cuatro

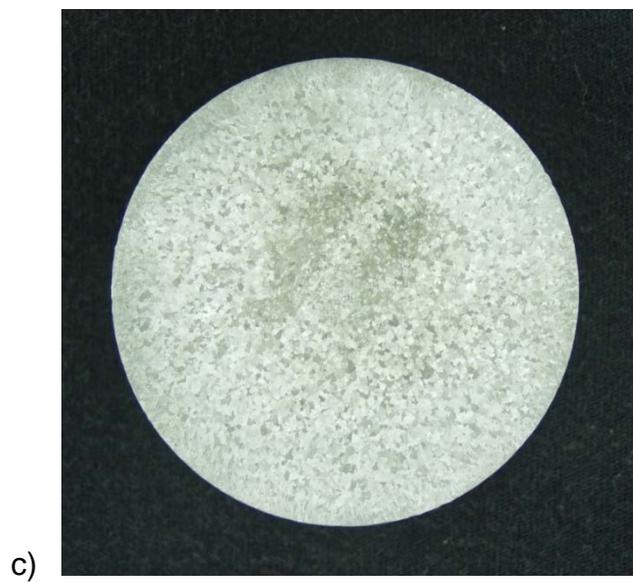
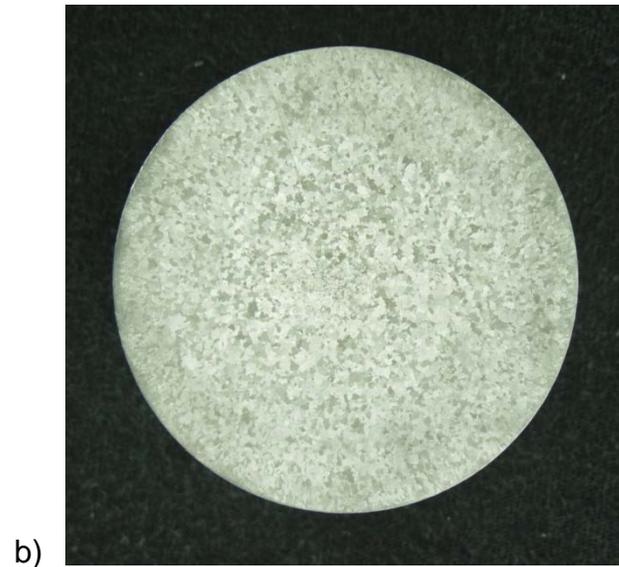
El lingote número cuatro, figura 50, fue colado en un molde de grafito, cortado en tres secciones cola, base y punta, con presión metalostática normal. Se puede observar que tanto en la punta, en el centro y en la cola, el crecimiento equiaxial es copioso, teniendo leves indicios de zonas columnares, con una zona chill casi invisible. La relevancia de este ensayo es la observación de la cola, la cual revela la forma en que lo último en solidificar (color oscuro en la figura 58 a) es debido a la formación de un rechupe bastante pronunciado próximo a donde se realizó le revelación de estructuras.

Figura 50. **Lingote número cuatro**

a) Cola, b) base, c) punta



Continuación de la figura 50



Fuente: Laboratorio de Metalografía, edificio T-7, Facultad de Ingeniería, USAC.

- Lingote número cinco

El lingote número cinco, figura 51, fue colado en arena, con alimentador, de manera invertida, cortado de forma longitudinal, con presión metalostática normal. Como se observa, la presencia de un rechupe es nula, debido al efecto del alimentador; la presencia de 2 zonas bien marcadas de granos finos y gruesos es debida a la variación en la extracción de calor durante la solidificación. Debido a que no fue bien controlada la humedad en la arena, la permeabilidad no era homogénea. Se observa la porosidad producida por el efecto de los gases durante la solidificación.

En la zona baja del lingote predominan los granos equiaxiales de tamaño homogéneo, hasta la zona de cambio de equiaxial de granos finos a gruesos.

En la zona superior, la presencia de granos gruesos muy parecidos a granos columnares es marcada teniendo como particularidad que no son de dimensiones regulares. Esta característica se debe a la forma de colada (invertida).

- Lingote número seis

En el lingote número seis, figura 52, la metodología de fundición fue la misma que en el lingote número cinco. En las macrografías se destaca la mayor efervescencia de los vapores producidos por la humedad excesiva de la arena. Los cortes de las probetas se realizaron en tres partes, de manera transversal.

En las fotografías se aprecia la formación de un rechupe de tamaño considerable debido a la contracción y al efecto de la lenta velocidad de

extracción calórica durante la solidificación. De igual forma se aprecia la existencia de granos columnares muy grandes.

Figura 51. **Lingote número cinco**



Fuente: Laboratorio de Metalografía, edificio T-7, Facultad de Ingeniería, USAC.

La zona equiaxial está presente en su mayoría hasta en la punta por ser colado de manera invertida, donde se aprecia que los granos son de tamaño grande en el centro de la fundición, pero en sus alrededores se puede observar un área con granos columnares y otra con granos equiaxiales de reducido tamaño, zonas mixtas, debido a que no se controló de buena manera la cantidad de humedad durante la preparación del molde.

- Lingote número siete

Lingote número siete, figura 53, colado en un molde hecho de un tubo de acero de bajo carbono, cortado de forma longitudinal, presión metalostática normal. El crecimiento columnar de este lingote es bastante amplio, gobernando, en su mayoría, la superficie revelada. Se aprecia un leve núcleo de granos equiaxiales muy hacia el centro y una zona chill no visible. En este caso, se puede asumir que la propagación de la formación y crecimiento de granos columnares se debió en gran manera a la cantidad escasa de material que se fundió, y, a la rápida extracción de calor producida por el material de la lingotera.

Figura 52. **Lingote número seis**

a) Cola, b) centro, c) punta.



Continuación de la figura 51



Fuente: Laboratorio de Metalografía, edificio T-7, Facultad de Ingeniería, USAC.

Figura 53. **Lingote número siete**



Fuente: Laboratorio de Metalografía, edificio T-7, Facultad de Ingeniería, USAC.

- **Lingote número ocho**

Lingote número ocho, figura 54, colado en molde de acero de medio carbono, con presión metalostática normal, cortado de forma longitudinal. La velocidad de la extracción calórica es bastante elevada. Se aprecian granos equiaxiales de dimensiones pequeñas. La zona columnar sí está marcada en las esquinas inferiores del lingote pero desaparece casi en su totalidad al llegar a aproximadamente la altura media del mismo.

Figura 54. **Lingote número ocho**



Fuente: Laboratorio de Metalografía, edificio T-7, Facultad de Ingeniería, USAC.

- **Lingote número nueve**

El lingote número nueve, figura 55, fue colado en un molde de arena sin tapa, con presión metalostática normal, cortado de forma longitudinal. Casi en su totalidad se encuentran granos equiaxiales relativamente grandes, debido a la baja velocidad de extracción calórica; no se aprecia una zona columnar próxima a las paredes del molde. Se pueden apreciar algunos granos alargados cerca de la superficie superior en dirección del centro del lingote. Se observan también algunas inclusiones solidas en la periferia del molde, producto quizá, del desprendimiento de arena durante el proceso de colado.

Figura 55. **Lingote número nueve**



Fuente: Laboratorio de Metalografía, edificio T-7, Facultad de Ingeniería, USAC.

#### **4.3.2. Aleaciones aluminio-cobre**

Las aleaciones que contienen 4 a 5 por ciento de cobre, con el hierro y las impurezas habituales de silicio y algunas veces con pequeñas cantidades de magnesio, son tratables térmicamente y pueden soportar altos esfuerzos a la vez que manifiestan cierta mejora en la ductilidad. Las aleaciones aluminio-cobre son aleaciones monofásicas.

Cuando estas aleaciones y otras aleaciones monofásicas, se hacen en moldes permanentes o por medio de otros métodos rígidos de colada, se requieren técnicas especiales para aliviar las tensiones de solidificación.

Técnicas cuidadosas también suelen ser necesarias para promover el progreso de la solidificación del metal de las zonas remotas de la fundición a las zonas más calientes de la misma y, también, las más líquidas, en los tubos de ventilación, y luego a los alimentadores verticales.

Cuando se utilizan estas técnicas de fundiciones necesarias y más exigentes, las aleaciones aluminio cobre pueden y han sido utilizadas con éxito para producir piezas de fundición de alta resistencia y alta ductilidad. Técnicas más estrictas de fundición también son útiles y necesarias al tener otros sistemas de aleaciones monofásicas o aleaciones de aluminio.

#### **4.3.2.1. Aluminio 1% cobre**

Para obtener aleaciones aluminio 1 por ciento cobre, se pesaron las proporciones adecuadas de cada uno de los elementos en cuestión, es decir 1 por ciento de cobre en peso y 99 por ciento de aluminio en peso; para luego ser fundidos dentro del mismo crisol.

- Lingote número uno. 1% cobre

La figura 56 muestra el corte longitudinal de un lingote fundido en molde de grafito con un sobre-calentamiento de 40 grados aproximadamente, presión metalostática normal y atacado con reactivo de agua regia (reactivo 7 tabla V).

La revelación de las estructuras se ve reducida al inicio, esto es provocado por un oscurecimiento debido a la interacción del cobre sobre la superficie atacada; por esta razón se buscó la mejor apreciación de las estructuras por medio de la utilización de otro reactivo utilizado más frecuentemente en la revelación de estructuras a nivel microscópico, el reactivo

llamado *keller's*, el cual consta de una mezcla de ácido nítrico, clorhídrico, fluorhídrico y agua. Consultado la bibliografía referente al tema de revelación de estructuras, el contenido debe de ser el siguiente: 2 mililitros de ácido fluorhídrico, 3 mililitros de ácido clorhídrico, 5 mililitros de ácido nítrico y 190 mililitros de agua.

La nueva metodología propuesta y que otorga los resultados más satisfactorios es la siguiente: primero se cambia la concentración del reactivo para mejorar la velocidad del ataque, la nueva mezcla es; 100 mililitros de agua, 6 mililitros de ácido clorhídrico, 10 mililitros de ácido nítrico y 4 mililitros de ácido fluorhídrico, como se aprecia se reduce la cantidad de agua y se aumenta la proporción de ácido al doble; segundo se aplica el reactivo sobre la superficie sobando el mismo por medio de un algodón, con poca fuerza, durante 15 ó 20 segundos o hasta obtener los resultados deseados; después se sumerge la muestra en agua a temperatura ambiente y se deja secar.

En el lingote se puede observar una propagación de granos equiaxiales de tamaño reducido en la mayoría del lingote, una zona columnar próxima a las áreas de contacto de la fundición con el molde. A diferencia de los resultados observados con el aluminio de alta pureza colado en el mismo molde la zona equiaxial parece formarse en etapas de tamaño granular, teniéndose en cuenta que la cantidad de cobre es bastante pequeña pero creando diferencias muy marcadas. Es de observar que la figura de la izquierda muestra el resultado de la aplicación del reactivo 7, mientras que la figura de la derecha muestra el ataque con el reactivo de *keller's* modificado.

Figura 56. **Lingote uno. 1% cobre**



Fuente: Laboratorio de Metalografía, edificio T-7, Facultad de Ingeniería, USAC.

- Lingote número dos. 1% cobre

El lingote número dos fue colado en el molde de acero de medio carbono, con una presión metalostática normal, cortado de manera longitudinal y atacado con reactivo de *keller's* modificado, figura 57. A diferencia con el lingote número uno con 1 por ciento de cobre, en este se puede apreciar una zona equiaxial mas copiosa de granos con tamaño reducido. Una zona columnar escasa próxima a las paredes del molde.

En la parte inferior izquierda, se observa una cavidad, provocada en gran medida debido a la velocidad de colada y la rápida extracción de energía.

Al comparar este resultado con el lingote de alta pureza colado en el mismo molde se puede apreciar que conforme un elemento aleante está presente aumenta el tamaño del grano de la zona equiaxial.

Figura 57. **Lingote número dos. 1% cobre**



Fuente: Laboratorio de Metalografía, edificio T-7, Facultad de Ingeniería, USAC.

- **Lingote número tres. 1% cobre**

El lingote 3 con un contenido de 1 por ciento de cobre, fue colado en el molde de tubo de acero al bajo carbono, con sobre-calentamiento de 40 grados centígrados, cortado de forma longitudinal. La figura 58 muestra el resultado de la colada; se aprecia que casi en la totalidad del lingote la presencia de granos equiaxiales es masiva, así también es de recalcar que el tamaño de estos granos es muy reducido, en comparación con el lingote

fundido en el mismo molde con material de alta pureza donde se observó que los granos predominantes eran columnares con un núcleo equiaxial.

Figura 58. **Lingote número tres. 1% cobre**



Fuente: Laboratorio de Metalografía, edificio T-7, Facultad de Ingeniería, USAC.

- Lingote número cuatro. 1% cobre

La figura 59 muestra el corte transversal de un lingote fundido en molde de arena. La zona equiaxial predomina en la superficie del lingote, con un tamaño de grano bastante amplio, lo interesante de la apreciación de este lingote es que en los granos se puede apreciar a contra luz una forma o tipo de segregación, de una manera bien distribuida en todos los granos, con lo que se garantiza el hecho de que una correcta metodología de fundición puede distribuir de buena manera el soluto dentro de la colada garantizando de esta forma homogeneidad de propiedades en toda la pieza fundida. Se observan

inclusiones porosas cerca de la superficie del lingote así como en las cercanías de las zonas que tuvieron contacto con las paredes del molde.

Figura 59. **Lingote cuatro. 1% cobre**



Fuente: Laboratorio de Metalografía, edificio T-7, Facultad de Ingeniería, USAC.

#### **4.3.2.2. Aluminio 3% cobre**

De la misma forma que la obtención de aleaciones aluminio 1 por ciento cobre, para la obtención de las aleaciones aluminio 3 por ciento cobre se utilizó la misma metodología, pesándose las cantidades proporcionales de cada elemento.

- Lingote número uno. 3% cobre

La figura 60, muestra la macrografía de un lingote fundido en molde de grafito, cortado de forma longitudinal. La presencia de más cobre realza la aparición de rasgos característicos de la segregación, a diferencia de los lingotes al 1 por ciento Cu, donde no se veía una marcada diferencia, en este lingote se tiene que el oscurecimiento debido al ataque con el reactivo de agua regia es más marcado, por lo que se asume que mientras mayor sea la cantidad de soluto en la aleación, la observación de las estructuras a nivel macroscópico se hace más difícil.

Las estructuras observadas en esta colada son en su mayoría granos equiaxiales de un tamaño reducido en el núcleo, creciendo proporcionalmente conforme se aleja de este hacia las paredes del molde, la formación de granos columnares está localizada en las partes bajas del lingote, y abarca muy poca superficie.

- Lingote número dos. 3% cobre

El lingote dos, cortado de forma longitudinal, fue colado en un molde de acero al medio carbono. Se aprecia en la figura 61, que el centro del lingote contiene granos equiaxiales de regular tamaño, se tiene también una zona columnar que rodea en su mayoría las zonas próximas al contacto con el molde.

La presencia del soluto define claramente la separación de las tres zonas definidas anteriormente. La zona chill, que se manifiesta casi como una línea gruesa alrededor del lingote y las zonas columnar y equiaxial que se definen muy claramente. La influencia del soluto, en este caso cobre, aunada a la

velocidad de extracción calórica del molde de acero permite apreciar claramente el desarrollo de las estructuras de solidificación.

Figura 60. **Lingote uno. 3% cobre**



Fuente: Laboratorio de Metalografía, edificio T-7, Facultad de Ingeniería, USAC.

- Lingote número tres. 3% cobre

El lingote tres fue colado en el molde de tubo de bajo carbono, cortado de forma longitudinal. La figura 62 muestra este lingote, y se puede observar claramente una estructura similar a la del lingote anterior en una forma más definida. Se tiene un núcleo formado por granos equiaxiales de reducido tamaño, rodeado por una zona columnar bien definida. Las zonas más oscuras podrían ser indicios de segregación.

Figura 61. **Lingote dos. 3% cobre**



Fuente: Laboratorio de Metalografía, edificio T-7, Facultad de Ingeniería, USAC.

Figura 62. **Lingote tres. 3% cobre**



Fuente: Laboratorio de Metalografía, edificio T-7, Facultad de Ingeniería, USAC.

- Lingote número cuatro. 3% cobre

El lingote número cuatro fue colado en molde de arena. Como se puede apreciar en la figura 63, la zona más marcada es la equiaxial con un tamaño granular vasto, similar al obtenido con la aleación 1 por ciento cobre. Se observa claramente la formación de un rechupe producto del fenómeno de la contracción.

Figura 63. **Lingote cuatro. 3% cobre**



Fuente: Laboratorio de Metalografía, edificio T-7, Facultad de Ingeniería, USAC.

#### **4.3.2.3. Aluminio 5% cobre**

Como se ha mencionado la máxima solubilidad del cobre en el aluminio, que tiene aplicación ingenieril, ocurre cuando el contenido es de aproximadamente 5 por ciento, es por esto que la utilización de muestras con

este contenido de soluto es necesaria. Para la obtención de las mismas, se utiliza la misma metodología que en las aleaciones 1 y 3 por ciento.

- Lingote número uno. 5% cobre

La macrografía del lingote número uno, con 5 por ciento cobre se muestra en la figura 64. Fue colado en un molde de grafito, atacado con el reactivo de *keller's* modificado; su sobrecalentamiento fue de aproximadamente 100 grados centígrados, de acuerdo al diagrama de equilibrio, ya que se coló a 700 grados centígrados. Se aprecian claramente las estructuras de solidificación columnar y equiaxial, de un tamaño vasto, estimulado por un alto sobrecalentamiento y un coeficiente de transferencia calórica en la interfaz metal-molde relativamente bajo. Es casi nula la aparición de granos de zona chill, mientras que los granos columnares muestran un avance corto y pueden ser apreciados en los márgenes próximos al contacto con el molde.

Figura 64. **Lingote uno. 5% cobre**

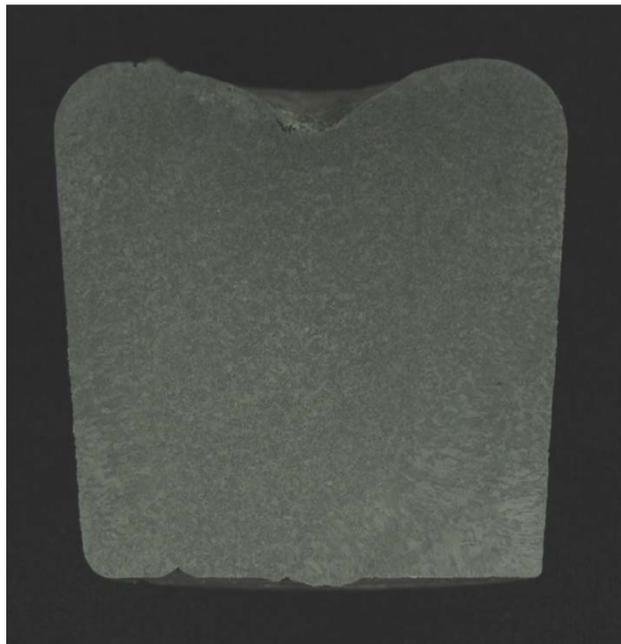


Fuente: Laboratorio de Metalografía, edificio T-7, Facultad de Ingeniería, USAC.

- Lingote número dos. 5% cobre

El lingote número dos con 5 por ciento cobre, fue colado en la lingotera de acero al medio carbono, atacada con el mismo reactivo para aleaciones aluminio cobre; con sobrecalentamiento de 100 grados centígrados, aproximadamente. Se aprecia que la zona con mayor presencia es la equiaxial de grano reducido, esto por la rápida extracción calórica producida por el molde. Sin embargo, se aprecia claramente la presencia de la zona columnar, principalmente en los vértices de la base del lingote.

Figura 65. **Lingote dos. 5% cobre**

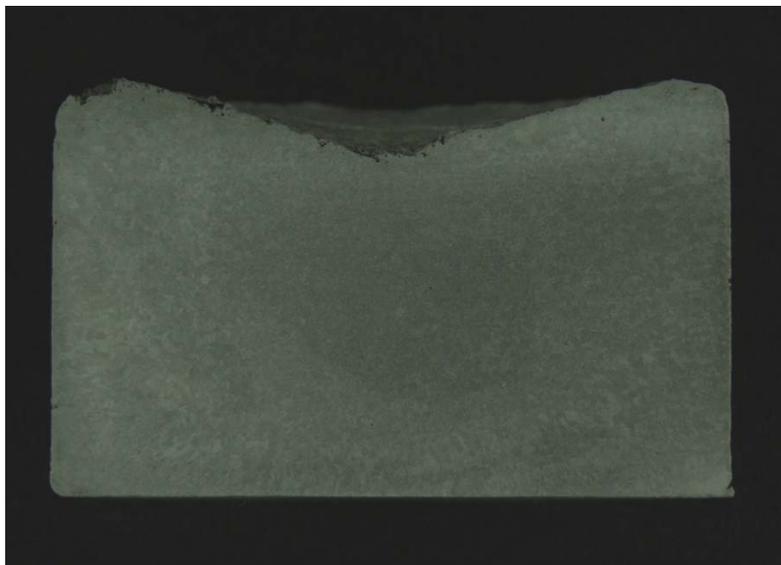


Fuente: Laboratorio de Metalografía, edificio T-7, Facultad de Ingeniería, USAC.

- Lingote número tres. 5% cobre

La figura 66 muestra el corte transversal de un lingote colado en el molde de tubo de acero de bajo carbono. Se tienen los mismos sobrecalentamientos y metodología de ataque que para las coladas anteriores. Observando detenidamente se puede apreciar que la superficie muestra una zona de crecimiento granular equiaxial copiosa, y una zona columnar de crecimiento fino, casi en forma de agujas de reducido tamaño, muy semejante a la anterior.

Figura 66. **Lingote tres. 5% cobre**



Fuente: Laboratorio de Metalografía, edificio T-7, Facultad de Ingeniería, USAC.

- Lingote número cuatro. 5% cobre

El lingote número cuatro, con 5 por ciento de cobre como elemento aleante mostrado en la figura 67, es muy difícil de apreciar debido a que la metodología del ataque no proporciona los resultados de fotografía más

aceptables. Esto debido a que las inclinaciones de los granos revelados que reflejan en muchas direcciones la luz, no son captadas en gran medida por la cámara fotográfica. De lo posible a observar, se destaca el crecimiento casi similar con todas las aleaciones coladas en molde de arena, es decir granos equiaxiales de tamaño considerable.

Figura 67. **Lingote cuatro. 5% cobre**



Fuente: Laboratorio de Metalografía, edificio T-7, Facultad de Ingeniería, USAC.

#### **4.3.3. Análisis comparativo de los resultados**

Tal como fuera propuesto al principio del trabajo, se realiza un análisis comparativo de las estructuras resultantes de solidificación, inducidas por la modificación o manipulación de dos parámetros o variables independientes, que actúan directamente sobre las características fundamentales de dichas estructuras y que pueden ser manipuladas durante los procesos artesanales,

tendiendo a controlar las propiedades de las piezas coladas, en función de la manipulación de dichas variables. O sea, a) El efecto de la manipulación del sustrato cuando se mantiene la composición química invariable, y, b) El efecto de la modificación de la composición química cuando se mantiene un sustrato invariable. A saber:

#### **4.3.3.1. Efecto del coeficiente de transferencia calórica en la interfaz metal-molde, hi. Modificación del sustrato**

El coeficiente de transferencia calórica, en la interfaz sólido-líquido, como ya se ha mencionado, juega un papel muy importante en la formación y crecimiento de las estructuras granulares de los metales. A los efectos de observar las diferencias que se tienen al variar este parámetro, se colaron lingotes en distintos sustratos.

- Aluminio de alta pureza

La figura muestra cuatro lingotes fundidos en diferentes tipos de moldes, es decir, cuatro sustratos diferentes, a saber: de izquierda a derecha a) grafito, hi moderado, b) acero de medio carbono, hi alto, c) tubo de acero de bajo carbono, hi alto, pero con menor efecto que el anterior por las características volumétricas del molde, y, c) molde de arena, hi bajo. Las muestras son en esencia aluminio de alta pureza. Como se puede apreciar la forma, tamaño y presencia de las diferentes estructuras de solidificación es muy bien definida; la variación del molde, es decir el cambio del sustrato, a través del hi, durante la solidificación, juega un papel muy importante en la obtención de dichas estructuras.

Figura 68. **Comparación lingotes alta pureza**



Fuente: Laboratorio de Metalografía, edificio T-7, Facultad de Ingeniería, USAC.

Se puede observar que, un coeficiente de transferencia calórica ( $h_i$ ) más elevado, produce estructuras de granos resultantes de colada de tamaño reducido; esto debido a que los núcleos son más susceptibles a ser creados y multiplicados antes que llegar a crecer. En contraparte mientras el calor es evacuado de una manera más lenta, los núcleos son propensos a aumentar su tamaño y no a multiplicarse.

Una granulometría pequeña juega un papel importante al momento de seleccionar elementos de máquina que sean aplicados a esfuerzos mayores, variables y con mayor resistencia a distintos medios de trabajo.

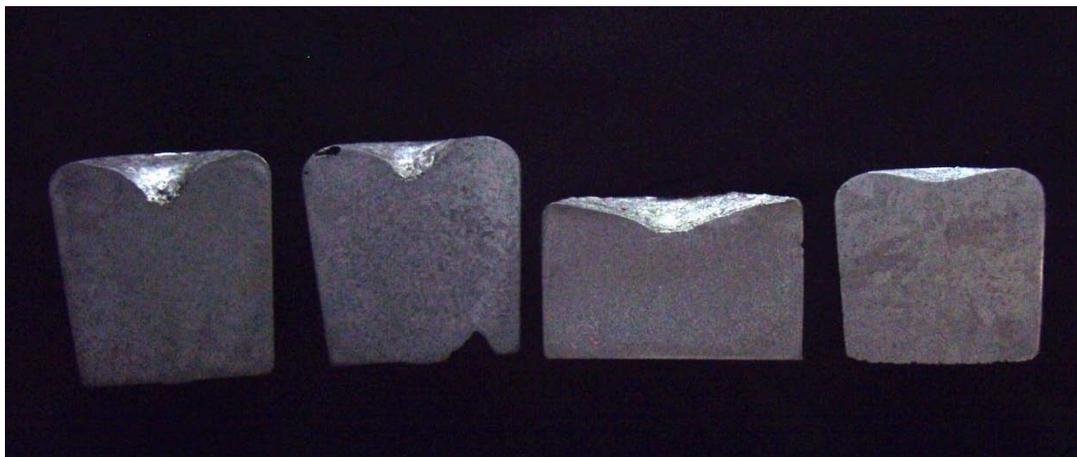
- Aluminio 1 por ciento cobre

La figura muestra las diferentes probetas obtenidas con un contenido de cobre de 1 por ciento, su variación de sustrato se diferencia, al igual que en la

figura anterior, de izquierda a derecha a) grafito, b) acero de medio carbono, c) tubo de acero de bajo carbono, y d) molde de arena.

Se aprecia que, con un leve incremento del contenido de cobre en las aleaciones, las estructuras son similares a las de aluminio de alta pureza. Los resultados son representativos del bajo sobre-calentamiento aplicado al proceso de colada.

Figura 69. **Comparación aleaciones aluminio 1% cobre**



Fuente: Laboratorio de Metalografía, edificio T-7, Facultad de Ingeniería, USAC.

- **Aluminio 3 por ciento cobre**

Al incrementar el contenido de cobre hasta un 3 por ciento, se puede apreciar que sucede lo mismo que en las muestras de aluminio de alta pureza, vuelve a observarse la tendencia a un crecimiento granular más amplio en función de una capacidad de extracción calórica menor. La zona columnar aparece bien definida en todas las muestras, y la zona equiaxial está presente siempre en los núcleos de los lingotes.

Figura 70. **Comparación aleaciones aluminio 3% cobre**



Fuente: Laboratorio de Metalografía, edificio T-7, Facultad de Ingeniería, USAC.

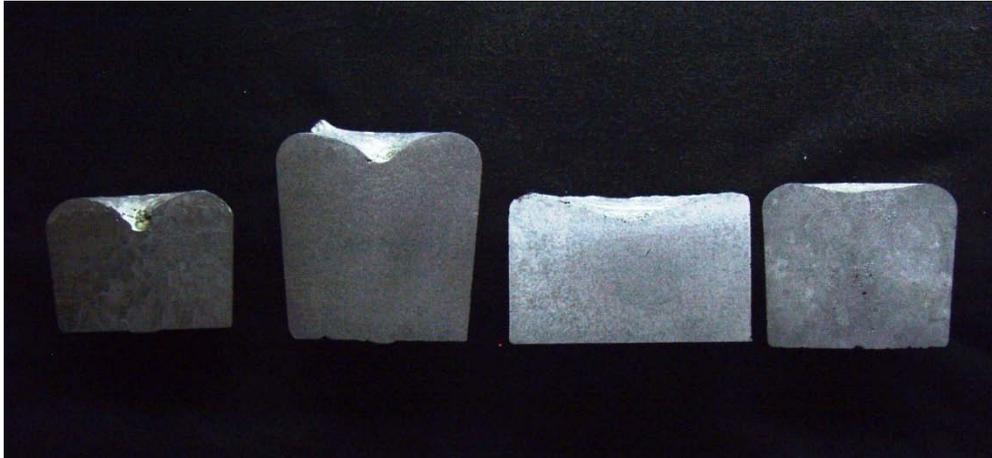
- Aluminio 5 por ciento cobre

La figura muestra los lingotes con un contenido de cobre del 5 por ciento, variando en función del sustrato donde fueron solidificados. Al igual que las muestras obtenidas con 1 por ciento de cobre, los granos son de dimensiones pequeñas en la muestra dos y tres; sin embargo, las muestras uno y cuatro, presentan un crecimiento marcado tanto en la zona equiaxial, cuanto en la zona columnar.

#### **4.3.3.2. Efecto de la composición química. Aumento de la concentración de soluto**

Cuando se varía la composición del soluto en una aleación ocurren variaciones en la forma y tamaño de las estructuras de solidificación obtenidas en las muestras. La concentración de soluto se modificó en cantidades de 1, 3 y 5 por ciento.

Figura 71. **Comparación aleaciones aluminio 5% cobre**



Fuente: Laboratorio de Metalografía, edificio T-7, Facultad de Ingeniería, USAC.

- Sustrato: molde de grafito

La figura muestra los lingotes en los cuales se cambia la composición química, a saber, de izquierda a derecha: a) Aluminio de alta pureza, b) aluminio 1 por ciento cobre, c) aluminio 3 por ciento cobre, y, d) aluminio 5 por ciento cobre. Se observa con claridad que el aumento de la concentración de soluto, para un mismo coeficiente de transferencia calórica,  $h_i$ , correspondiente al molde de grafito, permite ver las diferencias marcadas de una zona columnar creciente en función del aumento del soluto. Lo mismo puede decirse de la zona equiaxial, que se manifiesta con granulometría más vasta con el aumento del soluto.

Figura 72. **Comparación fundiciones en molde de grafito**



Fuente: Laboratorio de Metalografía, edificio T-7, Facultad de Ingeniería, USAC.

Cabe preguntarse ¿cómo se manifestaría el efecto de sobrecalentamientos crecientes bajo las mismas condiciones analizadas?

- Sustrato: molde de acero de medio carbono

En comparación con el sustrato de grafito, el acero de medio carbono tiene la capacidad de extracción calórica más alta, resultando en granulometría más fina. Como se puede apreciar, las zonas columnares aparecen en la parte inferior de la muestra, desapareciendo casi en su totalidad al llegar a la parte superior. Es de hacer notar que la lingotera de acero de medio carbono tiene una figura cúbica exterior y en su interior un cono, por lo que las paredes del molde se van adelgazando de abajo hacia arriba, aunque siempre son de un espesor considerable, sin embargo esto podría manifestarse en un flujo heterogéneo de extracción calórica, lo cual introduciría algunas diferencias en el crecimiento de las estructuras superiores con respecto a las inferiores.

Sin embargo, a los fines de la presente investigación estos efectos no se tomarán en cuenta. Finalmente, puede apreciarse la presencia de una estructura más fina, para las cuatro composiciones en función de un coeficiente de extracción calórica mayor.

Figura 73. **Comparación fundiciones en molde de acero de medio carbono**



Fuente: Laboratorio de Metalografía, edificio T-7, Facultad de Ingeniería, USAC.

- Sustrato: tubo de acero bajo carbono

A diferencia de la primera muestra observada en la figura, los granos de los demás lingotes aparentan uniformidad, tanto en su tamaño como en la presencia estructural. La capacidad del tubo de acero de bajo carbono de poseer dimensiones iguales en toda su figura, garantiza que la extracción calórica sea uniforme en todas direcciones. En este caso, también los resultados presentan estructuras más finas, con la excepción del primer lingote que podría haber sido afectado por un sobre-calentamiento mayor no controlado.

Figura 74. **Comparación fundiciones en molde hecho de tubo de acero de bajo carbono**



Fuente: Laboratorio de Metalografía, edificio T-7, Facultad de Ingeniería, USAC.

- Sustrato: molde de arena

En las macrográficas, se puede apreciar que las estructuras granulares son de dimensiones muy similares, es decir que el tamaño de grano permanece casi constante, pero de tamaño vasto; esto se debe, fundamentalmente, al bajo coeficiente de transferencia calórica en la interfaz metal-molde característico de los moldes de arena. La zona equiaxial es muy marcada con estructura de granos bastante grandes.

Figura 75. **Comparación fundiciones en molde de arena**



Fuente: Laboratorio de Metalografía, edificio T-7, Facultad de Ingeniería, USAC.

## CONCLUSIONES

1. Las probetas, o lingotes, coladas durante el proceso de la investigación, revelan resultados satisfactorios, en cuanto a las características estructurales obtenidas mediante la manipulación de las variables independientes, externamente controlables, consistentes en la variación del coeficiente de transferencia calórica en la interfaz metal-molde, producidas por los cambios de sustrato, y, la variación de la concentración de soluto en la composición química de las aleaciones aluminio cobre propuestas, cumpliendo con los requisitos de repetitividad de resultados mediante la aplicación de la metodología experimental de la investigación científica.
2. Las muestras de forma cónica garantizaron, en todo momento, una fácil extracción del molde, debido a su geometría, evitándose, de esta manera, la distorsión de las estructuras resultantes debido a la manipulación forzada. Las dimensiones de las probetas fueron adoptadas empíricamente. En trabajos previos al presente, se aprecian diferencias sustanciales en las dimensiones de las muestras estudiadas. Queda a criterio del investigador la selección de las dimensiones más prácticas de la probeta para la ejecución del trabajo en función de las necesidades metalográficas, mecánicas y físicas a ser investigadas. Los lingotes obtenidos experimentalmente, son versátiles, fáciles de manipular, maquinar y observar. A los fines justificados de la presente investigación, los resultados macroscópicos son aceptables en su totalidad.

3. Dentro de las características metalográficas que se investigaron y que son de relevancia se encuentran, el tamaño, la forma y la orientación del crecimiento granular, como puede apreciarse en las macrografías observadas en los resultados de los ensayos individuales en el capítulo cuatro y el análisis comparativo de los resultados.
4. La variación del tamaño, forma y orientación de crecimiento del grano, es función de la capacidad de extracción calórica de la interfaz metal molde proporcionados por el sustrato sobre el cual solidifica la muestra; obteniéndose granulometría vasta en moldes hechos de arena y granos finos en moldes hechos de grafito y acero de medio carbono. El tamaño variable de las estructuras resultantes en las probetas obtenidas en el molde de tubo de acero de bajo carbono, podría deberse, parcialmente, al efecto convectivo de la extracción calórica, producida por eventuales corrientes de aire del medio ambiente, actuado sobre una pared muy delgada de la lingotera. En este último caso no se pudo conservar la forma cónica de las probetas, pero el efecto de la contracción permitió la fácil extracción de las mismas.
5. Para lograr características estructurales de un tipo de fundición particular, para una dada composición química, dentro de los parámetros necesarios, se necesita de controles en el sobrecalentamiento, las características propias del sustrato, variando en función del coeficiente de transferencia calórica en la interfaz metal molde y los parámetros propios de la forma de la colada, velocidad, tiempo de permanencia, altura o presión metalostática.
6. En las muestras obtenidas, pueden reconocerse claramente las tres zonas de cristalización: la zona chill o acoquillada, la zona columnar y la

zona equiaxial. En mayor medida se observa la presencia de zonas equiaxiales en todas las muestras, esto debido a las características de solidificación de las probetas obtenidas, ya que estas están regidas por parámetros preestablecidos como el coeficiente de transferencia calórica en la interfaz metal molde, las características del sustrato y la composición química de las aleaciones. Estos parámetros fueron manipulados durante los ensayos experimentales, obteniéndose con ello granulometría variada.

7. De acuerdo a lo expuesto, las conclusiones del trabajo pueden agruparse bajo dos aspectos sustantivos, separados por los dos conceptos de manipulación experimental señalados, de acuerdo a los resultados y el análisis de los mismos realizado en el capítulo precedente, a saber:

- 7.1. El efecto de la composición química de las aleaciones aluminio-cobre

En función del contenido de soluto presente en las aleaciones, se detectan cambios en la forma del grano, ya que la presencia de un elemento aleante como el cobre induce la aparición más rápida de núcleos cristalinos, lo que repercute en mayor velocidad de solidificación. Para un mismo sustrato, la estructura granular o macro-estructura observada, crece en función de la composición química de la aleación, para el intervalo de las aleaciones que van desde el elemento de alta pureza hasta la aleación con 5 por ciento de soluto. Esto puede deberse también al efecto del crecimiento dendrítico de las aleaciones que propicia el mecanismo de la multiplicación copiosa en función del efecto convectivo.

Por otro lado, es importante observar que en función del aumento del contenido de cobre en las aleaciones la maquinabilidad mejora, con el contenido creciente de soluto, produciéndose un efecto similar al del carbono en las fundiciones grises.

## 7.2. El efecto del coeficiente de transferencia calórica en la interfaz metal-molde

El coeficiente de transferencia calórica en la interfaz metal molde juega un papel preponderante en las necesidades de obtención de granulometría fina o vasta; ya que como se pudo apreciar en las muestras obtenidas los granos crecían más en función de un coeficiente más bajo. En contraparte, un crecimiento de grano menor se aprecia en las muestras coladas en moldes de coeficiente de transferencia calórica superior.

La capacidad de extracción calórica depende en gran medida del sobre-calentamiento del metal fundido, ya que al tenerse un valor más alto, aun teniéndose un molde con coeficiente de transferencia calórica superior, su granulometría sería vasta. En el presente trabajo se realizaron las coladas bajo sobre-calentamientos constantes.

La formación de la zona equiaxial, manifiesta en forma copiosa en la mayoría de ensayos, puede deberse a la homogeneización del proceso de transferencia calórica desde el seno del líquido hacia las zonas ya solidificadas, por lo que la energía puede ser disipada uniformemente, y, por lo tanto, un crecimiento granular homogéneo es posible.

8. Como resultados de utilidad directa sobre los procesos de fundición artesanal, puede señalarse que durante el proceso de solidificación la temperatura de colada juega un papel muy importante, ya que influye en gran medida sobre la fluidez, la formación de núcleos y su posterior crecimiento. Un precalentamiento del molde o la aplicación de una pintura aislante en el mismo, modifican significativamente la capacidad de transferencia calórica, por lo que la solidificación sería controlada en función de obtener granulometría fija o variable. Al tenerse un sobrecalentamiento suficiente mejora la fluidez y por ende la colabilidad, este concepto beneficia los procesos de fabricación de piezas complejas, lo que aunándose a los parámetros antes establecidos daría como resultado la posibilidad de manufacturar elementos específicos en función de criterios de selección propia de la pieza a ser elaborada, contribuyendo al desarrollo de la fundición artesanal.
  
9. Finalmente, se confirma los supuestos señalados en la hipótesis propuesta, en cuanto a que tanto el efecto de la concentración de soluto en las aleaciones aluminio-cobre, cuanto el efecto del coeficiente de transferencia calórica en la interfaz metal molde, inducido por las características del sustrato, juegan un papel preponderante en las características geométricas de las estructuras de solidificación de las piezas fundidas artesanalmente de las aleaciones indicadas.



## RECOMENDACIONES

A los sectores involucrados, científico-técnico, productivo y artesanal:

1. La búsqueda de imperfecciones durante la solidificación sale del alcance de la presente investigación, sin embargo, es interesante observar que la presencia excesiva o no controlada de humedad, fuente de hidrógeno, propicia la aparición de porosidades en la constitución de las muestras coladas en moldes de arena. Esto puede ser tomado en consideración para una próxima investigación en la que el fin primordial sea encontrar la cantidad correcta de humedad necesaria para colar muestras u objetos de aluminio en moldes de arena sin imperfecciones.
2. La correcta manipulación de la colada durante su permanencia en el crisol, y por lo tanto en el horno, es de suma importancia, ya que en las aleaciones se necesita que los metales en cuestión, al alcanzar su punto de fusión, sean mezclados adecuadamente dentro del recipiente, para garantizar una mejor homogeneización en la disolución del soluto, con lo que las características mecánicas de la pieza obtenida serán de igual manera más homogéneas.

A la Escuela de Ingeniería Mecánica de la FIUSAC, a través del “Proyecto de Investigaciones Metalúrgicas”:

3. Continuar con las investigaciones del presente tema en aleaciones aluminio-cobre, analizando el efecto de la variación de los sobrecalentamientos de colada en las características estructurales de

las piezas fundidas artesanalmente y su proyección hacia las características mecánicas de las mismas, particularmente, sobre la resistencia, a través de mediciones de dureza.

4. Realizar un análisis exhaustivo de los efectos analizados, en aleaciones ferrosas, particularmente en piezas de fundición gris de origen artesanal.

## BIBLIOGRAFÍA

1. AGUILAR RIVAS, Roberto Alejandro. *Introducción a la Metalurgia*. Proyecto de Investigaciones Metalúrgicas. Universidad de San Carlos de Guatemala. Escuela de Ingeniería Mecánica. 2012. 192 p.
2. \_\_\_\_\_. *Fluidity of Al-Cu alloys with no superheats and solidification mechanisms*. Tesis doctoral. Atlantic International University. Honolulu Hawaii. 2011. 113 p.
3. \_\_\_\_\_. *Solidificación de metales y aleaciones y el mecanismo de cierre de vena fluida durante los ensayos de fluidez*. Proyecto de Investigaciones Metalúrgicas. Universidad de San Carlos de Guatemala. Escuela de Ingeniería Mecánica. 2011. 73 p.
4. ALVAREZ VALDEZ, Elvis José. *Estructura de los lingotes*. Trabajo de graduación de Ing. Mecánica. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. 1990. 60 p.
5. APARICIO, C.; MANERO, J.M.; RODRÍGUEZ, Andrés; ARANDES, J.M.; PLANELL, J.A. *Aleaciones ligeras*. España: Ediciones UPC, 2001. 155 p. ISBN: 84-8301-480-7.
6. BILONI H. *Solidification. Physical metallurgy*. 3a ed. Cahn R.W. and Haasen P. North Holland Physics Publishing, 1983. 2740p.

7. BILONI H. *Relación entre las estructuras de segregación y las estructuras de fundición*. Argentina: OEA-CNEA. 1968. 1 121 p.
8. CHALMERS B. *Principles of Solidification*. Estados Unidos: J. Wiley and Sons. 1964. 319 p.
9. GROOVER, Mikel P. *Fundamentos de manufactura moderna materiales, procesos y sistemas*. México: Prentice-Hall Hispanoamericana. 1997. 1063 p. ISBN: 84-8301-480-7.
10. *Metals Handbook. Fractography*. Estados Unidos: ASM international Handbook, Vol. 12. 1987. ISBN 0-87170-007-7 (v. 1).
11. \_\_\_\_\_. *Properties and selection: non ferrous alloys and special purpose materials*. Estados Unidos: ASM international Handbook, Vol. 2. 1990-. ISBN: 0-87170-378-5 (V.2).
12. \_\_\_\_\_. *Metallography and microstructures*. Estados Unidos: ASM international Handbook, Vol. 9. 1985-. ISBN 0-87170-007-7 (v. 1).
13. MORALES TORRES, Álvaro. *Efecto de la naturaleza de la superficie del molde sobre la transferencia calórica en el sistema metal/molde y las estructuras resultantes*. Tesis doctoral. Universidad Nacional de Rosario. Argentina. 1975. 161 p.
14. SIDNEY H., Avner. *Introducción a la metalurgia física*. Estrada Haen, José Luis (trad). 2a ed. México: McGraw-Hill, 1988. 695 p. ISBN: 968-6046-01-1.

15. Yu M., Lajtin. *Cristalización de los metales y estructura del lingote metálico. Metalografía y tratamiento térmico de los metales.* La Habana, Cuba: Pueblo y educación, 1990. 440p.