

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO**



**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

Trabajo Experimental previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico

**Tema:**

---

**“ANÁLISIS CUANTITATIVO DE LOS ELEMENTOS ALEANTES PRINCIPALES PRECIPITADOS EN LA FORMACIÓN DE BILLETS DE ALUMINIO DE ALEACIÓN 6063 EN EQUIPO DE FUNDICIÓN TIPO HERTWICH DE COLADA CONTINUA HORIZONTAL QUE SE PRODUCEN EN LA EMPRESA CEDAL S.A DE LA CIUDAD DE LATACUNGA PARA EL PROCESO DE EXTRUSIÓN”**

---

**AUTOR:** Navas Moscoso Hernán Alberto

**TUTOR:** Ing. Mg. Henry Vaca

**AMBATO – ECUADOR**

**2016**

## **CERTIFICACIÓN**

En mi calidad de Tutor del trabajo experimental sobre el tema: “ANÁLISIS CUANTITATIVO DE LOS ELEMENTOS ALEANTES PRINCIPALES PRECIPITADOS EN LA FORMACIÓN DE BILLETS DE ALUMINIO DE ALEACIÓN 6063 EN EQUIPO DE FUNDICIÓN TIPO HERTWICH DE COLADA CONTINUA HORIZONTAL QUE SE PRODUCEN EN LA EMPRESA CEDAL S.A DE LA CIUDAD DE LATACUNGA PARA EL PROCESO DE EXTRUSIÓN”, presentado por: Navas Moscoso Hernán Alberto, egresado de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, considero que el presente trabajo experimental reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la evaluación del jurado examinador designado por el Consejo Directivo de esta facultad.

---

Ing. Mg Henry Vaca

Tutor de Tesis

## **AUTORÍA DEL TRABAJO**

Yo, Navas Moscoso Hernán Alberto, portador de la cédula de ciudadanía N° 050200192-8, tengo a bien indicar que el presente trabajo experimental con el tema: “ANÁLISIS CUANTITATIVO DE LOS ELEMENTOS ALEANTES PRINCIPALES PRECIPITADOS EN LA FORMACIÓN DE BILLETS DE ALUMINIO DE ALEACIÓN 6063 EN EQUIPO DE FUNDICIÓN TIPO HERTWICH DE COLADA CONTINUA HORIZONTAL QUE SE PRODUCEN EN LA EMPRESA CEDAL S.A DE LA CIUDAD DE LATACUNGA PARA EL PROCESO DE EXTRUSIÓN”, así como los conceptos, ideas y resultados son de exclusiva responsabilidad de mi persona como autor.

Navas Moscoso Hernán Alberto

El Autor

## **DERECHOS DE AUTOR**

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que se haga de ésta tesis o parte de ella un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación según las normas de la Institución.

Cedo los Derechos en línea patrimoniales de mi tesis, con líneas de difusión pública, además apruebo la reproducción de ésta tesis, dentro de las regulaciones de esta prestigiosa Universidad, siempre y cuando dicha reproducción o generación de algún tipo de rédito económico sea efectuado respetando mis derechos de autor.

Navas Moscoso Hernán Alberto

Autor

## **APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO**

Los miembros del Tribunal de Grado aprueban el informe del trabajo experimental realizado por el estudiante Hernán Alberto Navas Moscoso de la carrera de Ingeniería Mecánica, bajo el tema “ANÁLISIS CUANTITATIVO DE LOS ELEMENTOS ALEANTES PRINCIPALES PRECIPITADOS EN LA FORMACIÓN DE BILLETS DE ALUMINIO DE ALEACIÓN 6063 EN EQUIPO DE FUNDICIÓN TIPO HERTWICH DE COLADA CONTINUA HORIZONTAL QUE SE PRODUCEN EN LA EMPRESA CEDAL S.A DE LA CIUDAD DE LATACUNGA PARA EL PROCESO DE EXTRUSIÓN”.

Ambato, Enero del 2017

Para constancia firman:

---

Ing. Mg Diego Nuñez

---

Ing. Mg. Juan Paredes

## **DEDICATORIA**

De todo corazón, todo el esfuerzo llevado acabo es y ha sido siempre gracias a la guía y bendición de Dios, porque él escuchó las oraciones de mi madre e hizo realidad uno de los sueños de mi padre.

Padre celestial, esto va dedicado a ti.

También lo dedico a mi mami Mariela y a mi papi Hernán por su amor, amistad, apoyo y ejemplo como personas, como profesionales y como buenos hijos de Dios.

A mi ñañita Fernanda, a mis ñañitos Vladimir y José quienes han sido a lo largo de toda mi vida mis amigos y mi motivo de ejemplo para mejorar día a día.

Astro, por ser compañero, amigo y parte de nuestra familia.

Y a todos mis seres queridos quienes descansan en paz y supieron entregarme en vida todo su amor y sabiduría.

## **AGRADECIMIENTO**

A todas las personas que Dios puso en mi camino y que colaboraron de manera directa e indirecta en el presente trabajo.

Para todas las personas que forman parte de la empresa CEDAL S.A en todos sus niveles organizacionales: Ing. Martín Burbano, Ing. Bladimiro Navas, Lcda. María Elena Maya, Ing. Germán Correa, Ing. Roberto García, Tcnlg. Polo Cadena; también al talento humano que forman parte de los departamentos de: Fundición, Mantenimiento, Calidad y Matriceria, gracias por su sencillez, humildad, colaboración y amistad hacia mi persona.

De igual manera a todo el talento humano que son parte de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, gracias por su amabilidad, calidez y solidaridad.

Un agradecimiento especial a todos mis profesores y en especial a mi tutor Ing. Henry Vaca Ortega, por haber sido quien respaldó y creyó en la idea de llevar a cabo este trabajo experimental.

A todos ustedes gracias y que Dios los bendiga siempre.

## ÍNDICE GENERAL

CERTIFICACIÓN .....	i
AUTORÍA DEL TRABAJO.....	ii
DERECHOS DE AUTOR.....	iii
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO .....	iv
DEDICATORIA .....	v
AGRADECIMIENTO.....	vi
ÍNDICE GENERAL.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE TABLAS .....	xii
RESUMEN EJECUTIVO .....	xiv
ABSTRACT .....	xv
Capítulo 1 EL PROBLEMA .....	1
1.1 TEMA DEL TRABAJO EXPERIMENTAL.....	1
1.2 ANTECEDENTES.....	1
1.3 JUSTIFICACIÓN .....	4
1.4 OBJETIVOS .....	4
1.4.1 OBJETIVO GENERAL.....	4
1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	5
Capítulo 2 FUNDAMENTACIÓN .....	6
2.1 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	6
2.1.1 EL ALUMINIO Y SUS PRINCIPALES ALEACIONES .....	6
2.1.2 ALEANTES PRINCIPALES DE LA SERIE 6000.....	8

2.1.3 ALEACIÓN 6063 .....	10
2.1.4 PROCESO DE COLADA CONTINUA HORIZONTAL .....	12
2.1.5 TRATAMIENTO TÉRMICO DE LAS ALEACIONES DE ALUMINIO ....	14
2.1.6 PRECIPITACIÓN.....	16
2.1.7 SEGREGACIÓN.....	17
2.1.8 HOMOGENIZADO .....	18
2.1.9 ESPECTROMETRÍA DEL ALUMINIO .....	19
2.2 HIPÓTESIS.....	21
2.3 SEÑALAMIENTO DE VARIABLES DE LA HIPÓTESIS .....	21
Capítulo 3 METODOLOGÍA .....	22
3.1 NIVEL O TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	22
3.2 POBLACIÓN Y MUESTRA.....	23
3.2.1 CÁLCULO TAMAÑO DE LA MUESTRA.....	23
3.3 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES .....	25
3.3.1 OPERACIONALIZACIÓN DE LA VARIABLE INDEPENDIENTE.....	25
3.3.2 OPERACIONALIZACIÓN DE LA VARIABLE DEPENDIENTE.....	26
3.4 PLAN DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN .....	27
3.5 PLAN DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS .....	28
3.5.1 PLAN DE PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN.....	28
3.5.2 PLAN DE ANÁLISIS .....	30
Capítulo 4 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	31
4.1 RECOLECCIÓN DE DATOS .....	32
4.1.1 PRIMERA FASE RECOLECCIÓN DE MUESTRAS.....	32
4.1.2 SEGUNDA FASE ANÁLISIS ESPECTROMÉTRICO.....	36
4.1.3 TERCERA FASE ENSAYO DE DUREZA .....	38

4.1.4 CUARTA FASE ENSAYO DE TRACCIÓN.....	39
4.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	40
4.2.1 COMPARACIÓN ESPECTROMETRÍA ENTRE CASTING Y TUNDISH	40
4.2.2 RELACIONES ENTRE VARIABLES.....	45
4.2.3 ANÁLISIS RESULTADOS ESPECTROMETRÍA EN BILLETS.....	49
4.2.4 CUANTIFICACIÓN DE LOS ELEMENTOS ALEANTES PRINCIPALES PRECIPITADOS.....	54
4.2.5 ANÁLISIS RESULTADOS CURVA DE CALENTAMIENTO Y ENFRIAMIENTO.....	58
4.2.6 ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL ENSAYO DE DUREZA BRINELL..	61
4.2.7 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS ENSAYO DE TRACCIÓN.....	67
4.3 RELACIÓN ENTRE DUREZA BRINELL Y PRECIPITADOS DE SILICIURO DE MAGNESIO .....	69
4.4 COMPARACIÓN NIVELES DE DUREZA TRANSVERSAL ENTRE PROCESO COLADA SEMI-CONTINUA VERTICAL y COLADA CONTINUA HORIZONTAL.....	71
4.5 VERIFICACIÓN DE LA HIPÓTESIS .....	76
4.5.1 EVALUACIÓN Y DECISIÓN .....	80
Capítulo 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	81
5.1 CONCLUSIONES .....	81
5.2 RECOMENDACIONES .....	83
BIBLIOGRAFÍA.....	84
ANEXOS.....	86
ANEXO A.....	86
ANEXO B.....	88
ANEXO C.....	89

ANEXO D.....	90
ANEXO E .....	91
ANEXO F.....	94
ANEXO G.....	95

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Nomenclatura de aleaciones de aluminio según “The Aluminum Association” .....	7
Figura 2.2 Magnesio en forma de lingotes para uso en aleación AA6063. ....	8
Figura 2.3 Silicio en trozos para uso en aleación AA6063. ....	9
Figura 2.4 Diagrama Al-Mg <sub>2</sub> Si. ....	11
Figura 2.5 Equipo completo para Proceso de Colada Continua Horizontal. ....	13
Figura 2.6 Resumen proceso teórico de espectrometría.....	20
Figura 2.7 Espectrómetro de Emisión Óptica perteneciente a CEDAL S.A.....	20
Figura 3.1 Plan para recolección de información.....	27
Figura 3.2 Plan de procesamiento de la información.....	29
Figura 3.3 Plan de análisis de la información .....	30
Figura 4.1 Diagrama de flujo proceso de recolección, análisis e interpretación de resultados.....	31
Figura 4.2 Toma de muestras de casting y tundish. ....	33
Figura 4.3 Corte de muestras proveniente de billet.....	34
Figura 4.4 Proceso para obtención de la curva de calentamiento en homogenizado. ....	35
Figura 4.5 Procedimiento preparación muestra y análisis espectrométrico.....	37
Figura 4.6 Espectrometría de cortes proveniente de billets. ....	38
Figura 4.7 Medición de dureza Brinell. ....	39

Figura 4.8 Gráfico comparativo del porcentaje en peso de Silicio entre casting y tundish. .....	42
Figura 4.9 Gráfico comparativo del porcentaje en peso de Magnesio entre casting y tundish. ....	44
Figura 4.10 Relación entre temperatura de tundish y velocidad de avance de mesa. ....	46
Figura 4.11 Composición en porcentaje de materia prima en aleación AA6063 producida en CEDAL S.A.....	47
Figura 4.12 Representación de distribución longitudinal de principales elementos en billet homogenizado de aleación “A” .....	51
Figura 4.13 Representación de distribución longitudinal de principales elementos en billet homogenizado de aleación “B” .....	53
Figura 4.14 Comparación entre aleación "A" y "B" de niveles de precipitado de Siliciuro de Magnesio a lo largo de billet homogenizado.....	57
Figura 4.15 Vista superior de la distribución de zonas en horno de homogenizado con nomenclatura de medición propia del sistema de control en sus distintos puntos. ....	59
Figura 4.16 Diagrama de curva de calentamiento en billet de aleación 6063 durante el proceso de homogenizado. ....	59
Figura 4.17 Comparación niveles de temperatura por zona del horno de homogenizado. .....	60
Figura 4.18 Diagrama curva de enfriamiento en billet de aleación 6063. ....	61
Figura 4.19 Contraste dureza HB promedio entre billet homogenizado de aleación “A” y “B” .....	63
Figura 4.20 Dureza Brinell a lo largo del billet homogenizado de aleación "A". ....	64
Figura 4.21 Dureza Brinell a lo largo del billet homogenizado de aleación "B". ....	65
Figura 4.22 Comparación niveles promedio de dureza Brinell de manera longitudinal en billets de aleación “A” y aleación “B”.....	66

Figura 4.23 Relación Dureza Brinell y Porcentaje en peso de Mg <sub>2</sub> Si en billet homogenizado de aleación “A” .....	69
Figura 4.24 Relación Dureza Brinell y Porcentaje en peso de Mg <sub>2</sub> Si en billet homogenizado de aleación “B” .....	70
Figura 4.25 Comparación entre aleaciones con respecto a los niveles de dureza HB medidas transversalmente en muestras aleatorias. ....	74

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Aleaciones de forja de aluminio.....	7
Tabla 2.2 Composición química aleación 6063. ....	10
Tabla 2.3 Resumen características PCCH.....	12
Tabla 2.4 Resumen de las principales designaciones de tratamientos térmicos. ....	14
Tabla 3.1 Variable independiente .....	25
Tabla 3.2 Variable dependiente.....	26
Tabla 4.1 Compilación proceso recolección en casting y tundish. ....	32
Tabla 4.2 Compilación procedimiento corte de muestras de billet homogenizado aleación normal. ....	33
Tabla 4.3 Compilación procedimiento obtención curva de calentamiento y enfriamiento. ....	34
Tabla 4.4 Compilación procedimiento espectrometría discos tipo B. ....	36
Tabla 4.5 Compilación procedimiento espectrometría de billets.....	37
Tabla 4.6 Compilación procedimiento ensayo de dureza Brinell. ....	38
Tabla 4.7 Compilación procedimiento ensayo de tracción. ....	39
Tabla 4.8 Resumen resultados espectrometría de porcentaje en peso de Silicio. ....	41
Tabla 4.9 Resumen resultados espectrometría de porcentaje en peso de Magnesio.....	43

Tabla 4.10 Valores promedio registrados de temperatura de moldeo en tundish y velocidad de avance de mesa. ....	45
Tabla 4.11 Rango de porcentaje en peso de elementos principales a controlar durante proceso de colada continua horizontal en aleación “A”.....	48
Tabla 4.12 Rango de porcentaje en peso de elementos principales a controlar durante proceso de colada continua horizontal en aleación “B”.....	49
Tabla 4.13 Resumen espectrometría de control en muestra de tundish de aleación "A".	49
Tabla 4.14 Compilación resultado análisis espectrométrico de billet homogenizado de aleación “A”.....	50
Tabla 4.15 Resumen espectrometría de control en muestra de tundish de aleación "B".	52
Tabla 4.16 Compilación resultado análisis espectrométrico de billet homogenizado de aleación “B”. ....	52
Tabla 4.17 Resumen comparativo niveles de dureza Brinell entre billet homogenizado de aleación “A” y “B”.....	62
Tabla 4.18 Resumen resultados ensayo de tracción en probetas de billet homogenizado de aleación “A”. ....	67
Tabla 4.19 Resumen resultados ensayo de tracción en probetas de billet homogenizado de aleación “B”. ....	68
Tabla 4.20 Resultados obtenidos de muestra proveniente de billet homogenizado de proceso de colada semi-continua vertical. ....	72
Tabla 4.21 Resultados obtenidos de muestra proveniente de billet homogenizado de proceso de colada continua horizontal.....	73
Tabla 4.22 Resultados obtenidos de muestra proveniente de billet homogenizado de proceso de colada continua horizontal.....	75
Tabla 4.23 Datos para verificación de la hipótesis. ....	79

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

“ANÁLISIS CUANTITATIVO DE LOS ELEMENTOS ALEANTES PRINCIPALES PRECIPITADOS EN LA FORMACIÓN DE BILLETS DE ALUMINIO DE ALEACIÓN 6063 EN EQUIPO DE FUNDICIÓN TIPO HERTWICH DE COLADA CONTINUA HORIZONTAL QUE SE PRODUCEN EN LA EMPRESA CEDAL S.A DE LA CIUDAD DE LATACUNGA PARA EL PROCESO DE EXTRUSIÓN”

**Autor:** Navas Moscoso Hernán Alberto.

**Tutor:** Ing. Mg. Henry Vaca.

**Fecha:** Octubre del 2016.

**RESUMEN EJECUTIVO**

La escasez de estudios “*in-situ*” sobre procesos de colada continua horizontal en aleaciones de aluminio, impulsa la necesidad de investigar la influencia de: temperatura, velocidad y materia prima en *billets* de aluminio homogenizados AA6063. Aplicando ensayos de espectrometría, permiten cuantificar el porcentaje en peso de aleantes principales magnesio y silicio. Estos elementos al precipitar forman siliciuro de magnesio ( $Mg_2Si$ ) durante el proceso de homogenizado. Para este estudio se produjo *billets* de aleación normal y experimental, demostrando una relación inversa entre los niveles de siliciuro de magnesio y dureza Brinell; así también la influencia de bajos niveles de porcentaje en peso de  $Mg_2Si$  en la reducción de la resistencia a la tracción en el material.

**Descriptor:** Aleación 6063, billet, colada continua horizontal, siliciuro de magnesio.

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO**  
**FACULTY OF CIVIL AND MECHANICAL ENGINEERING**  
**DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING**

“QUANTITATIVE ANALYSIS OF MAIN PRECIPITATE ALLOY ELEMENTS IN ALUMINUM ALLOY 6063 CAST BILLETS MADE IN HERTWICH’S HORIZONTAL CONTINUOUS CASTING MACHINE PRODUCED BY CEDAL S.A COMPANY IN LATACUNGA CITY FOR THE EXTRUSION PROCESS”

**Author:** Hernán Alberto Navas Moscoso.

**Tutor:** Ing. Mg. Henry Vaca.

**Date:** October of 2016.

**ABSTRACT**

Lack of “*in-situ*” studies about horizontal continuous casting process applied in production of aluminum alloy 6063 cast billets, promotes to investigate the direct influence of: temperature, velocity and raw material. Applying spectrometric tests to quantify the weight percent of main alloying elements such as Magnesium and Silicon. These elements precipitate to form magnesium silicide ( $Mg_2Si$ ) during homogenization process. For this study it was necessary to produce billets with normal and experimental alloy levels to demonstrate an inverse relation between magnesium silicide and Brinell hardness. Equally important, the effect of reduction of the material tensile strength due to low levels of magnesium silicide.

**Keywords:** AA6063, billet, horizontal continuous casting machine, magnesium silicide.

## **CAPÍTULO I**

### **CAPÍTULO 1 EL PROBLEMA**

#### **1.1 TEMA DEL TRABAJO EXPERIMENTAL**

“ANÁLISIS CUANTITATIVO DE LOS ELEMENTOS ALEANTES PRINCIPALES PRECIPITADOS EN LA FORMACIÓN DE BILLETS DE ALUMINIO DE ALEACIÓN 6063 EN EQUIPO DE FUNDICIÓN TIPO HERTWICH DE COLADA CONTINUA HORIZONTAL QUE SE PRODUCEN EN LA EMPRESA CEDAL S.A DE LA CIUDAD DE LATACUNGA PARA EL PROCESO DE EXTRUSIÓN”

#### **1.2 ANTECEDENTES**

Varios estudios referentes a la aleación A6063, han tenido lugar en laboratorio o en procesos de colada continua vertical, sin embargo, en proceso de colada continua horizontal “*in-situ*” no se registra estudios anteriores.

En primer lugar se tiene que en 2008, en la National Metal and Materials Technology Center en Bangkok, el trabajo investigativo “Quantification of Precipitated Phases in 6063 Aluminum Billet by Image Analysis for Improvement of Homogenization Condition” y realizada por: Thanaporn Kord, John TH Pearce, Mana Ponboon y Umarin Phongsophitanan.

Dicha investigación presenta resultados para determinar la relación entre el tratamiento térmico, tasa de enfriamiento y las fases precipitadas en la microestructura homogenizada antes de ser extruido. Concluyen dentro de sus resultados que:

- La cuantificación de las faces interdendríticas precipitadas en billet de aluminio 6063 por medio de análisis de imagen, es útil para predecir la habilidad de formado de un billet cuya composición química este bien controlada.
- Menores cantidades de precipitados en fases, es recomendable para procesos de extrusión más complejos.
- Muchos de los precipitados en las fases son de  $Mg_2Si$  y para los billets, las condiciones de producción por lotes deben ser tratados para alcanzar condiciones de solución en los hornos de homogenizado.
- Al comparar el enfriamiento con agua o con aire, muestran diferencias no muy significativas.

En segundo lugar se tiene que en 2011, en State Key Laboratory of Powder Metallurgy perteneciente a la Central South University of Changsha en China, el trabajo investigativo “Precipitation Sequence of an Aged Al-Mg-Si Alloy” y realizada por: X. Fang, M. Song, K. Li y Y. Du.

Sus investigadores presentan que la secuencia de precipitación de una aleación de Al-0.89Mg-0.75Si con trazas de Fe y Zn durante el envejecimiento a 180 °C fue investigada usando microscopio de transmisión de electrones (TEM) y microscopio de alta resolución de transmisión de electrones (HRTEM) y pruebas de dureza para mostrar la secuencia de precipitación de la aleación e identificar sus fases, para concluir lo siguiente:

- La secuencia de precipitación de la aleación Al-0.89Mg-0.75Si con trazas de Fe y Zn, puede ser resumida de la siguiente manera: Solución super-saturada de Al → Guinier-Preston zone → Precipitados  $\beta''$  → Precipitados  $\beta'$  → Precipitados  $\beta$  + Si, con los Precipitados  $\beta''$  manteniéndose estables hasta 30 horas.
- Las medidas de dureza indican que la medida más alta se da en la fase de endurecimiento en  $\beta''$ .
- La máxima dureza se alcanza después de 4 a 6.5 horas de homogenizado cuando se obtiene un máximo número de densidad en Precipitados  $\beta''$ .

En tercer lugar se tiene que en 2012, por parte Departamento de Ciencias de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica, perteneciente a la Universidad de Oviedo de España, el trabajo investigativo “Análisis cuantitativo y caracterización morfológica de la aleación 6063. Diferencias microestructurales y mecánicas entre la superficie y el núcleo de barras cilíndricas de colada semicontinua” y realizada por: J. Arsenio Lozano y B. Suárez Peña.

Los investigadores presentan el estudio del efecto que posee sobre las propiedades mecánicas en tracción, así como la diferencia microestructural que existe entre la superficie y el núcleo de lingotes en la aleación industrial 6063; así como la relación entre su composición química, característica microestructural y evolución durante el tratamiento térmico de homogenizado para extrusión. También sus características mecánicas en distintas partes del lingote de aluminio sometido a fuerzas de tracción para llegar a las siguientes conclusiones:

- Después del tratamiento térmico de homogenizado, la corteza superficial del lingote apenas sufrió una modificación de su espesor en 50 micras.
- La morfología de los intermetálicos de base hierro están influenciados por la velocidad de solidificación que predomina en cada zona del lingote.
- Las velocidades lentas de solidificación favorecieron a la formación de morfologías aciculares. y que las velocidades de solidificación altas dieron lugar a morfología más redondeadas.
- El tratamiento térmico provoca que el tamaño de los intermetálicos de base hierro disminuyan y su morfología evolucione a tener un aspecto más redondeado en todas las zonas del lingote.
- Los resultados de ensayos de tracción mostraron una ligera mejora en la ductilidad sobre la zona central del lingote, lo cual muestra la importancia de tener una baja presencia de segundas fases precipitadas.

### **1.3 JUSTIFICACIÓN**

El proceso de fundición de colada continua horizontal con equipo tipo HERTWICH fue diseñado en principio para empresas extrusoras para un proceso de *remelting*; no obstante, la empresa CEDAL S.A ha logrado incorporar este equipo para convertir chatarra de aluminio en *billets* o lingotes de aleación según sea la serie a producir.

Pocas empresas poseen la capacidad para incluir en su proceso de fundición este tipo de equipo, debido a la complejidad y singularidad del mismo, ya que se requiere de meticulosos procedimientos manejados de forma confidencial por cada empresa, por ello la formación del *billet* de aluminio de manera horizontal representa un gran reto, de manera que es necesario un control continuo de los niveles en los que se encuentren los principales elementos de la aleación por cada turno de producción.

Existe la necesidad de conocer cómo están los niveles de fluctuación de los aleantes principales a lo largo de la formación del *billet* de aluminio de aleación 6063 y su nivel de precipitación luego del proceso de homogenizado.

Se justifica el presente estudio debido a la necesidad que tiene el área de fundición para conocer cuantitativamente como están distribuidos los niveles de porcentaje en peso de aleantes principales a lo largo del *billet* y el porcentaje en peso de precipitación después del proceso de homogenizado.

Hay que aclarar lo siguiente, no existe registro alguno de estudios realizados anteriormente que ayuden a establecer una guía referente para la planta de fundición de la empresa CEDAL S.A en la ciudad de Latacunga.

### **1.4 OBJETIVOS**

#### **1.4.1 OBJETIVO GENERAL**

Cuantificar los niveles de precipitación de los elementos aleantes principales que conforman la aleación de aluminio 6063 a lo largo del *billet*, en equipo de fundición tipo HERTWICH.

### 1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar espectrométricamente muestras de *casting* y *tundish* para comparar los niveles de los elementos principales de aleación AA6063.
- Examinar la distribución a lo largo del *billet* de aluminio de magnesio y silicio espectrométricamente, para cuantificar los niveles de precipitación de los mismos después del proceso de homogenizado.
- Trazar la respectiva curva de calentamiento y enfriamiento en horno de homogenizado apoyado por equipo RTD en *billet* de aluminio.
- Evaluar la influencia de los precipitados cuantificados por medio de la composición química de la aleación AA6063 con respecto a los niveles de dureza a lo largo del *billet* de aluminio.
- Cuantificar los datos experimentales de estudio obtenidos, para diagramar la distribución de aleantes principales longitudinalmente.

## **CAPÍTULO II**

### **CAPÍTULO 2 FUNDAMENTACIÓN**

#### **2.1 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA**

##### **2.1.1 EL ALUMINIO Y SUS PRINCIPALES ALEACIONES**

El aluminio es considerado como el tercer elemento más abundante sobre la corteza terrestre (8% en forma de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  en la naturaleza); sin embargo únicamente se utilizan los óxidos de aluminio para su extracción, en este caso denominado bauxita (alúmina hidratada de Baux) a todas las rocas ricas en alúmina más o menos hidratadas. [1]

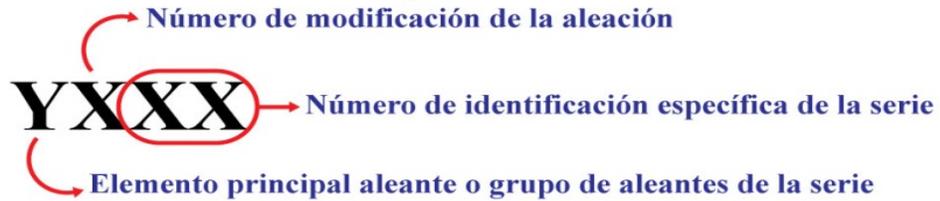
Se requiere de cuatro a cinco toneladas de bauxita para extraer por electrólisis dos toneladas de alúmina que es calcinada para eliminar la humedad, así mismo utilizando electrólisis se rompen las uniones moleculares para liberar oxígeno y obtener una tonelada de aluminio puro al 99.9%. [1]

Tanto el aluminio y sus aleaciones poseen una estructura cristalina FCC (cubica centrada en las caras). [1]

Al incorporar altas cantidades de aleantes principales y debido a la característica de solubilidad de estos en el aluminio, es posible obtener varios tipos de aleaciones. [1]

Tomando en cuenta el acuerdo a nivel internacional por medio de la “International Alloy Designation System for Wrought Aluminum and Wrought Aluminum Alloys” designa a las principales aleaciones de aluminio bajo la siguiente nomenclatura: [1]

## Aleación de forja



## Aleación de colada

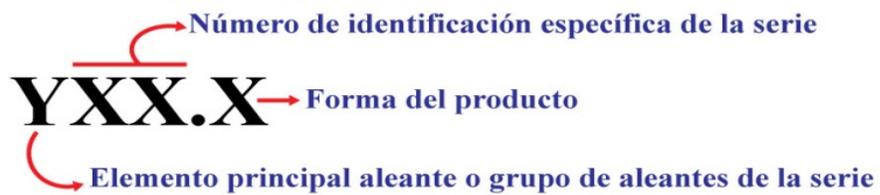


Figura 2.1 Nomenclatura de aleaciones de aluminio según "The Aluminum Association"

Fuente: Autor.

Tabla 2.1 Aleaciones de forja de aluminio

Fuente: Autor.

DESIGNACIÓN	SERIE	DESCRIPCIÓN	ADMITE TRATAMIENTO TÉRMICO
1XXX	1000	Puro Al (99%)	No
2XXX	2000	Al+Cu, Al+Cu+Li	Si
3XXX	3000	Al+Mn	No
4XXX	4000	Al+Si	Si
5XXX	5000	Al+Mg	No
6XXX	6000	Al+Mg+Si	Si
7XXX	7000	Al+Mg+Zn+Cu	Si
8XXX	8000	Al+Otros elementos	En estudio

## 2.1.2 ALEANTES PRINCIPALES DE LA SERIE 6000

Las aleaciones de aluminio correspondientes a la serie 6000 poseen como elementos principales de aleación al magnesio y silicio porque ambos contribuyen a la formación de Siliciuro de Magnesio ( $Mg_2Si$ ), compuesto que ayuda a fortalecer su estructura cristalina durante el proceso de solución sólida. [2]

Tanto el magnesio y silicio son parte de los elementos llamados “Básicos” o “Principales” porque al ser incluidos en aleaciones de aluminio, ellos definen las propiedades químicas y mecánicas intrínsecas de cada aleación perteneciente a esta serie. [6]

### 2.1.2.1 PROPIEDADES DEL MAGNESIO EN ALEACIÓN

El Magnesio es un metal cuyo símbolo es Mg, posee un peso atómico de 24.3050 y con un punto de fusión de 650 °C; por esta razón es agregado como elemento aleante en forma de barras o lingotes. [2][6]

Las aleaciones de la serie 6000 se benefician de la alta solubilidad en sólido del Magnesio, además incrementa la resistencia a la corrosión, ductilidad y conductividad térmica. También mejora la respuesta al proceso de anodizado. [2][6]

Está demostrado que el Mg incrementa la ductilidad y fortalecimiento de la aleación, sin embargo al sobrepasar una concentración de 0.7 de porcentaje en peso, disminuye el límite de solubilidad sólida y dificulta la extrusión del *billet*. [2][6]



**Figura 2.2** Magnesio en forma de lingotes para uso en aleación AA6063.

**Fuente:** Autor.

### 2.1.2.2 PROPIEDADES DEL SILICIO EN ALEACIÓN

El Silicio pertenece al grupo de los carbonoides, su símbolo es Si con un peso atómico de 28.0855, este elemento en las aleaciones de la serie 6000 es un elemento endurecedor, debido a su alta solubilidad en aluminio es agregado en colada en pequeños trozos o barras para mezclarse con otros elementos en el aluminio fundido sin llegar a sobrecalentar el metal. [2][6]

Facilita la respuesta de los perfiles extruidos al proceso de envejecido artificial para proveer de un mayor fortalecimiento que aquel por medio de envejecido natural.

Garantiza una óptima fluidez de la aleación y consigue un adecuado moldeo; también reduce el coeficiente de expansión térmica del material. [2][6]



**Figura 2.3** Silicio en trozos para uso en aleación AA6063.

**Fuente:** Autor.

### 2.1.3 ALEACIÓN 6063

La aleación 6063 ha llegado a situarse como una de las mayormente usadas en proceso de extrusión para la obtención de perfiles de aluminio por su alta extrudibilidad y resistencia a la corrosión para sus aplicaciones estructurales, ornamentales, entre otras. [3]

Pertenece a la designación 6XXX al tener como elementos aleantes principales al magnesio y silicio en proporciones adecuadas para dar lugar a la formación de siliciuro de magnesio ( $Mg_2Si$ ). [3]

Forma parte de una de las cuatro series de aleaciones que acepta tratamiento térmico, sin embargo la aleación 6063 al estar incluida en la serie 6000 admite el temple y la maduración natural o artificial. [3]

**Tabla 2.2** Composición química aleación 6063.

Fuente: Autor.

<b>DENOMINACIÓN ESTÁNDARES INTERNACIONALES</b>									
<b>ESTÁNDAR:</b>	<b>AA</b>	<b>ISO</b>		<b>DIN</b>		<b>UK</b>	<b>UNI</b>		<b>AFNOR</b>
<b>ALEACIÓN:</b>	6063	Al-Mg 0.5-Si		Al-Mg-Si 0.5		H9	P Al-Mg-Si		6060
<b>ELEMENTO:</b>	<b>Mg</b>	<b>Si</b>	<b>Fe</b>	<b>Mn</b>	<b>Cu</b>	<b>Cr</b>	<b>Zn</b>	<b>Ti</b>	<b>OTROS</b>
<b>RANGO:</b>	0.45 0.90	0.20 0.6	0.35	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.15
<p><b>Nota:</b> Los valores están dados porcentaje en peso y el restante del total debe ser aluminio. El rango mostrado en algunos elementos representa un máximo que debe contener sin especificar un valor mínimo.</p>									

### 2.1.2.1 EL SILICIO DE MAGNESIO

Químicamente definido como una sal neutra, este compuesto fue considerado por mucho tiempo como un compuesto iónico, sin embargo estudios recientes han demostrado que el siliciuro de magnesio ( $Mg_2Si$ ) es un semiconductor. [3]

El Siliciuro de Magnesio en la aleación 6063 produce un efecto de fortalecimiento por medio de la solución sólida molecular fijando las dislocaciones. [3]

Como referencia a señalar en la serie 6000, indica la dificultad de considerar dentro de un diagrama ternario por separado al Silicio y Magnesio con el Aluminio; por lo cual se encuentra descrito en memorias de varias investigaciones que el  $Mg_2Si$  forma un sistema cuasi-binario.[3]

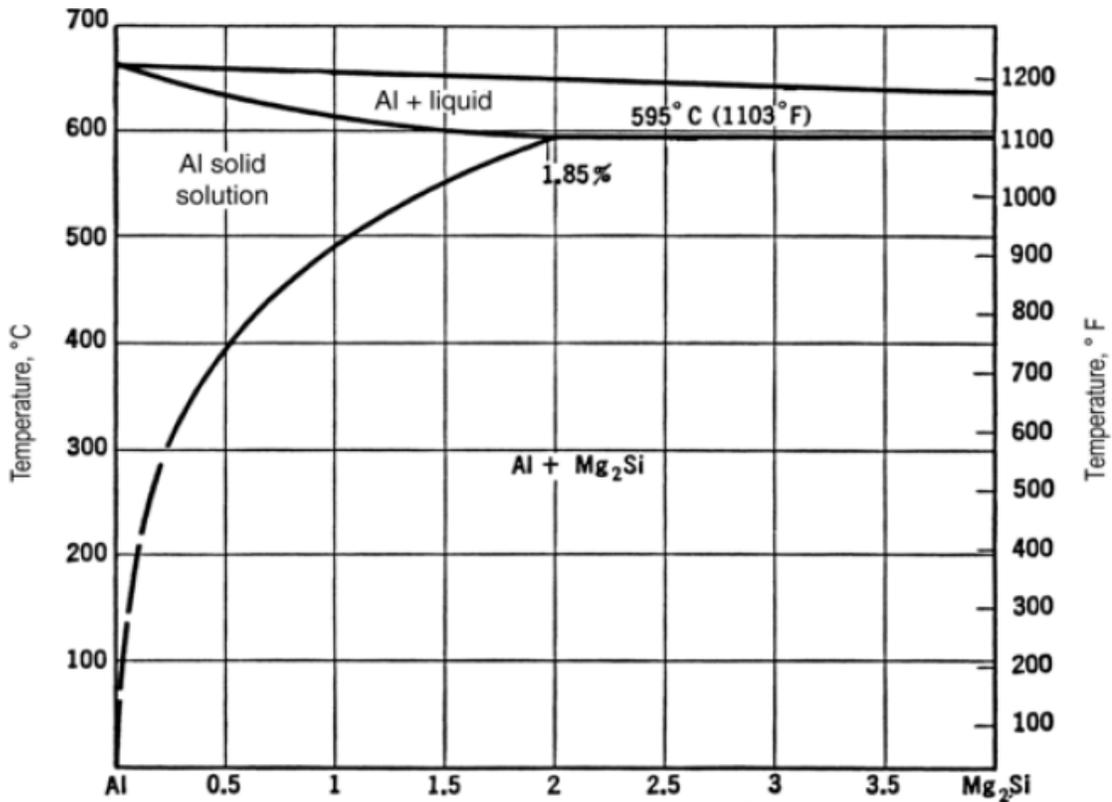


Figura 2.4 Diagrama Al- $Mg_2Si$ .  
Fuente: ASM METAL HANDBOOK VOL 9.

Esencialmente hay que destacar el vínculo entre el Silicio y el Magnesio en las aleaciones de la serie 6000; porque solamente el Silicio con el Aluminio nunca presenta compuesto alguno, es decir, queda libre; por lo cual requiere de otros elementos para poder formar parte de su micro-estructura. En este caso se requiere evaluar las cantidades estequiométricas de Silicio y Magnesio para formar  $Mg_2Si$  porque su solubilidad en el aluminio varía en función con la temperatura. Cabe recalcar que estudios experimentales han determinado en aleaciones industriales 6063 que precisan un exceso de Silicio para controlar niveles de Magnesio y para dar lugar a la formación de Siliciuro de Magnesio el cien por ciento de Magnesio se precipita. [2][3][14]

#### 2.1.4 PROCESO DE COLADA CONTINUA HORIZONTAL

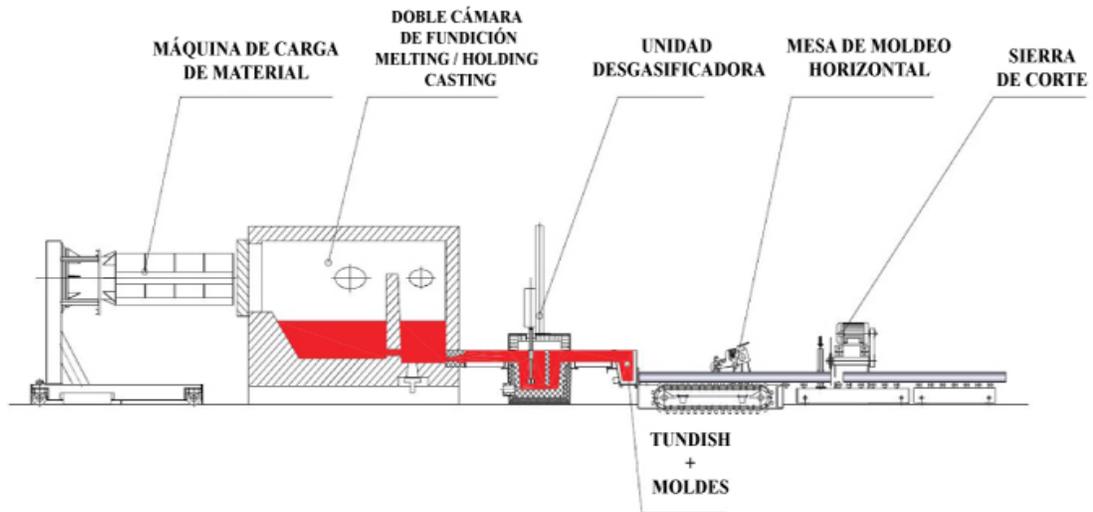
Es un proceso diseñado para empresas extrusoras de aluminio con el fin que puedan realizar el proceso de refundido con chatarra de alta calidad proveniente de su propio proceso de extrusión. [4]

Este equipo sirve para una operación continua logrando maximizar la producción en periodos de tiempo desde un mínimo de tres días y reportados en mejor de los casos tres semanas ininterrumpidas. [4]

Por medio de la técnica de molde abierto se logra producir con un mismo equipo: lingotes, *billets* (cilindros), barras T, entre otros; cada uno de ellos con diferentes dimensiones y longitudes con la integración de un sistema con sierra de corte. [4]

**Tabla 2.3** Resumen características PCCH.  
Fuente: Autor.

<b>RESUMEN CARACTERÍSTICAS PROCESO COLADA CONTINUA HORIZONTAL</b>	
<b>TIPO DE OPERACIÓN</b>	Semiautomático – Automático.
<b>TIEMPO DE PRODUCCIÓN</b>	Continua mínimo 3 días.
<b>TÉCNICA DE MOLDEO</b>	Molde Abierto.
<b>MÁXIMA LONGITUD DE PRODUCTO</b>	Variable sin límite establecido.
<b>FORMA DE PRODUCTO</b>	Lingotes, Billets, Barras T, entre otros.



**Figura 2.5** Equipo completo para Proceso de Colada Continua Horizontal.  
**Fuente:** HERTWICH ENGINEERING SMS GROUP.

- **Equipo de carga:** Compuesto por la máquina de carga de material la cual posee en su plataforma de trabajo una báscula para pesar los elementos que se van adicionar en el horno de fusión.
- **Horno de fusión:** Posee doble cámara siendo la primera cámara de fusión (melting) y la segunda cámara de colado (casting), cada cámara tiene su respectivo quemador, sistema de recuperación de calor y ductos de salida de gases con respectivo sistema de filtrado y control automático de temperatura.
- **Equipo de casting:** Contiene el sistema de control de flujo, los canales de moldeo que guían la aleación a la unidad desgasificadora que posee su rotor con impulsor de grafito para inyectar argón y refinador de grano.
- **Tundish:** En conjunto con el filtro se encarga de albergar el aluminio para suministrar a los moldes y permitir la producción continua de *billets*.
- **Moldes:** Se encuentran adaptados en la base de Tundish, son elaborados con aleación de cobre; poseen forma circular con sistema de lubricación combinado con aceite biodegradable y grafitos, tiene un sistema de refrigeración con agua.
- **Mesa de moldeo horizontal:** También llamada mesa de salida donde facilita el avance guiado de los *billets* moldeados con un sistema de rodillos y cadena.
- **Sierra de corte:** Conocida también como sierra volante, corta automáticamente los *billets* según longitud específica de acuerdo al lote de producción.

### 2.1.5 TRATAMIENTO TÉRMICO DE LAS ALEACIONES DE ALUMINIO

El tratamiento térmico dado a las aleaciones de aluminio sirve para conseguir el efecto de fortalecimiento en aquellas que lo admiten ya que pertenecen a la serie: 2000, 4000, 6000 y 7000. Además de conseguir la modificación de sus propiedades mecánicas deseadas con motivo de alcanzar un mayor fortalecimiento mediante el endurecimiento por precipitación, es necesaria una secuencia controlada de calentamiento y enfriamiento de la aleación. [5]

Dentro de las designaciones básicas para los diferentes tratamientos térmicos, se establece el escribir la letra correspondiente al tipo de tratamiento térmico después de la serie de la aleación y seguida de un guion; como por ejemplo: 6063-T6, esto quiere decir que la aleación 6063 ha tenido un tratamiento térmico por solución, temple y maduración artificial. [5]

A continuación se listan las principales designaciones correspondientes a los tratamientos térmicos para aleaciones de aluminio: [5]

**Tabla 2.4** Resumen de las principales designaciones de tratamientos térmicos.

**Fuente:** Autor.

DESIGNACIÓN	DESCRIPCIÓN
-F	De Fabricación.
-O	Recocido.
-H	Trabajo en frío.
-W	Tratamiento térmico de disolución.
-T	Previamente tratado térmicamente y diferente de -F, -O, -H.

- **F:** Designado aquellos productos que adquieren algunas propiedades de templado, propio del proceso de fabricación de conformado.
- **O:** Señala únicamente para aquellas aleaciones de forja, sometidos a recocido de recristalización para mejorar su ductilidad.
- **H:** Destinado para aquellos productos que alcanzan su endurecimiento por deformación con o sin algún tipo de tratamiento térmico suplementario. Se escriben dos dígitos después de la designación para diferenciarlos.
- **H1:** Muestra que el producto es únicamente endurecido por deformación y el número subsecuente señala el grado de endurecimiento.
- **H2:** Denota que el producto fue endurecido por deformación y parcialmente recocido; el número subsecuente señala el grado de endurecimiento.
- **H3:** Significa que el producto fue endurecido por deformación y sometido a un tratamiento de estabilización.
- **W:** Aplica únicamente a las aleaciones de forja que admiten el envejecido natural a temperatura ambiente, después del tratamiento térmico de disolución.
- **T:** Asignado a las aleaciones de forja que fueron tratadas térmicamente para obtener efectos diferentes de –F, -H, -O. Se escribe uno o dos dígitos de 1 al 10 subsecuente de –T para diferenciar el tipo de operación y sus detalles varían para cada aleación.
- **T1:** Designados para productos que no son endurecidos por acritud y fueron enfriados desde el conformado en caliente para posteriormente a un envejecido natural.
- **T2:** Confiere únicamente aquellas aleaciones de colada que fueron sometidas a proceso de recocido para mejorar ductilidad y estabilidad dimensional.

- **T3:** Aplica aquellos producto que después del tratamiento térmico de solución fueron trabajados en frio para acrecentar su fortalecimiento; así como se requiere el laminado y aplanado.
- **T4:** Destinado para aleación de forja y de colada, muestra que el producto no fue trabajado en frio después del tratamiento térmico de solución y tuvo un envejecimiento natural para conseguir una condición estable.
- **T5:** Atribuido para aleaciones de forja y de colada que fueron envejecidos artificialmente sin tratamiento térmico de solución.
- **T6:** Conferido para aleaciones de forja y de colada que tuvieron tratamiento térmico de solución, templado y envejecido artificial, donde no se requiere trabajo en frio alguno.
- **T7:** Expresa que la aleación de colada tuvo un tratamiento térmico de solución, donde las condiciones de estabilización de temperatura y tiempo, fueron llevados más allá del punto de máxima dureza.
- **T8:** Manifiesta que la aleación de forja obtuvo tratamiento térmico de solución, luego trabajada en frio (aplanado o laminado) para subsecuentemente sometido maduración artificial.
- **T9:** Señala que la aleación de forja se sometió a tratamiento térmico de solución, envejecido artificial y trabajo en frio para fortalecer la aleación.
- **T10:** Menciona que la aleación de forja fue envejecida artificialmente sin ningún tipo de tratamiento térmico previo y posteriormente trabajado en frio para fortalecer la aleación.

### **2.1.6 PRECIPITACIÓN**

Con respecto a los diferentes elementos que poseen las aleaciones de aluminio, dichos constituyentes al ser combinados tienden a formar compuestos que pueden quedar excluidos de la solución o separarse en partículas independientes. [5][6]

Sin embargo, son tan pequeñas dichas partículas que se sitúan entre la red cristalina actuando como candados y evitar las dislocaciones con el fin de incrementar la resistencia mecánica del material, dureza, fragilidad, entre otras. [5][6]

La precipitación o separación dentro de la fundición de las aleaciones de aluminio, podemos apelar a un ejemplo, al tener agua hirviendo en un recipiente, le agregamos varias cucharadas de sal hasta que no pueda disolver más y tenemos en el fondo partículas de sal no disueltas. A continuación tomamos parte de esa solución caliente dejando la sal en exceso y lo colocamos en un vaso, entonces tenemos una “Solución Saturada”. Comenzamos a enfriar esta solución sin dejar de mezclar, hasta una temperatura donde no es capaz de mantener toda la sal en solución, por lo tanto obtenemos una “Solución Super-saturada” con precipitados de sal en el fondo del vaso.

Tomando en cuenta el mismo efecto del ejemplo descrito, cuando una aleación de aluminio inicia su enfriamiento, varios elementos y combinaciones van a precipitar fuera de la aleación en función del descenso de temperatura, mientras otros elementos precipitaran después de solidificar la aleación. [5][6]

Cuando estos elementos precipitan tienden alojarse como anteriormente se describió: Entre los límites de grano o entre la red cristalina para evitar las dislocaciones de los planos en las paredes cristalinas. [5][6]

Se debe aclarar que la precipitación se puede dar en estado líquido como también en estado sólido, por el contrario este último no posee una analogía simple para su fácil explicación o ejemplificación. [5][6]

### **2.1.7 SEGREGACIÓN**

Durante el proceso de moldeo de la aleación de aluminio, se inicia su solidificación, dando lugar a la formación de los primeros cristales en la superficie que tienen contacto con las paredes del molde. [5][6]

Mientras la temperatura disminuye, más cristales tienden a formarse uno sobre otro, propiciando al crecimiento del tamaño de grano en dirección al centro del *billet* a 90° con respecto a las paredes del molde. [5][6]

Anteriormente se mencionó el efecto de la caída de temperatura en la precipitación de elementos y compuestos, sin embargo, con la variación de temperatura a lo largo del *billet* se evidencia una precipitación desorganizada, por tal razón, da lugar a una segregación de los precipitados. [5][6]

## **2.1.8 HOMOGENIZADO**

El Homogenizado o Difusión Solida, es un término aplicado para referirse a la disolución de un metal en otro cuando ambos están en estado sólido.[3]

Tiene como objetivo modificar la estructura de fundición (microestructura) para eliminar o minimizar la micro-segregación y remover tensiones en la aleación. [3]

Se lo realiza aplicando un calentamiento prolongado a alta temperatura para igualar la composición química por difusión y redisolución de las fases segregadas durante la solidificación. [3]

Para referirse a los efectos que produce un homogenizado en aleaciones de aluminio, este generaría dos transformaciones: [3]

- a) Uniformización de la composición en la solución solida mediante la difusión, cuando se sitúa la solución más o menos total de las fases separadas con coalescencia en exceso.
- b) Precipitación fina de la solución en exceso, la cual se desarrolla de manera más fina y abundante cuanto más baja es la temperatura.

### **2.1.8.1 PROCESO DE HOMOGENIZADO**

Con respecto al proceso de homogenizado, podemos poner en manifiesto que involucra el calentamiento de lingotes o *billets* con el objetivo de elevar la temperatura donde la aleación forme una solución homogénea con el aluminio. [3][5]

Es importante mencionar que está constituido por tres etapas necesarias: [3][5]

- a) Calentamiento.
- b) Permanencia de temperatura.
- c) Enfriamiento hasta temperatura de ambiente.

En primer lugar, el inicio del proceso de homogenizado se los considera cuando toda la masa metálica del lingote o *billet* se ha calentado a la temperatura deseada, la cual varía de acuerdo al tipo de aleación. Dicha temperatura se halla entre los 510 °C y los 600 °C con el fin de evitar alcanzar el punto de fusión. [3][5]

En segundo lugar la impregnación térmica o permanencia de temperatura, que en relación al tiempo, van a estar sometidos los lingotes o billets de dicha aleación. El tiempo de permanencia de temperatura está entre 5 a 48 horas según la aleación, dimensión de los elementos, carga y potencia de horno, entre otros. [3][5]

Finalmente el enfriamiento que puede ser por convección natural o por medio de enfriamiento por aire forzado a una velocidad que varía entre 48 °C por hora y 182 °C por hora. Sin embargo este proceso de enfriamiento puede ser de forma brusco utilizando agua. [3][5]

### **2.1.9 ESPECTROMETRÍA DEL ALUMINIO**

Con el avance de la metalurgia, la composición química de las aleaciones de aluminio cada vez otorgaba una tolerancia más estrecha sobre los elementos aleantes, por lo cual métodos como el de “Marcha Analítica” o el “Análisis de vía húmeda” tomaban mucho tiempo y no permitían un control estricto para garantizar un producto de calidad. [7]

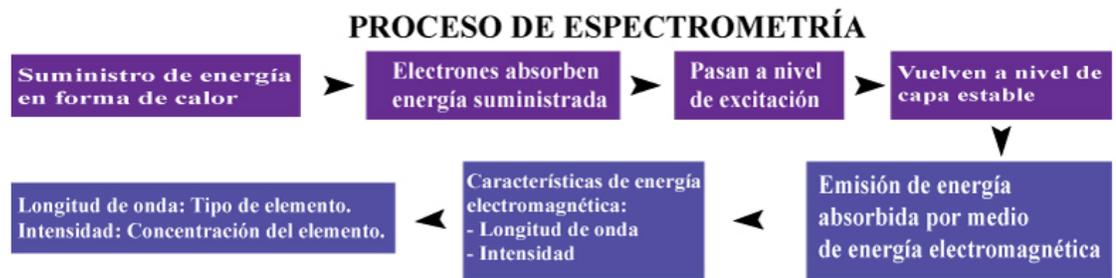
El uso del “Espectrómetro de Emisión Óptica” como un método no destructivo ayuda a proporcionar información de forma rápida para un control estricto y poder monitorear que los niveles de composición química de la aleación estén dentro de los rangos aceptables. [7]

El Espectrómetro de Emisión Óptica genera la energía externa necesaria para excitar a los electrones por medio de una chispa o arco eléctrico usando un electrodo de tungsteno que funde y evapora parte de la muestra emitiendo un haz de luz bajo una atmósfera de argón con el fin de incrementar su sensibilidad a la medición de impurezas. El haz de luz está compuesto de todos los elementos que componen la aleación. Después, utilizando un sistema óptico, el haz de luz pasa por un condensador a través de un espacio micrométrico donde se la somete a un haz de luz poli-cromático para luego dirigirla y enfocarla hacia un elemento dispersante que consigue reflejar por separado las radiaciones monocromáticas provenientes del haz poli-cromático. [7]

Al momento que se separan las radiaciones según la longitud de onda correspondiente a cada elemento, es necesario medir la cantidad de átomos excitados, es decir, la intensidad. [7]

Para medir la intensidad se utiliza un foto-tubo que es un dispositivo electrónico utilizado para transformar la energía radiante en energía eléctrica y dependiendo del nivel de radiación emitida producirá una diferencia de potencial que dará el porcentaje de concentración del elemento. [7]

La calibración del espectrómetro, se debe realizar con patrones estándares de aleación previamente conocida su composición química. [7]



**Figura 2.6** Resumen proceso teórico de espectrometría.  
**Fuente:** Autor.



**Figura 2.7** Espectrómetro de Emisión Óptica perteneciente a CEDAL S.A.  
**Fuente:** Autor.

## **2.2 HIPÓTESIS**

El análisis cuantitativo en *billets* de aluminio de aleación 6063 producidos en equipo de fundición de colada continua horizontal posibilitará calcular el porcentaje en peso de los aleantes principales precipitados a lo largo del *billet* para el proceso de extrusión.

## **2.3 SEÑALAMIENTO DE VARIABLES DE LA HIPÓTESIS**

Para el presente trabajo experimental se identificó las siguientes variables:

### **Variable Independiente:**

Proceso de colada continua horizontal en la producción de *billets* de aluminio de aleación 6063.

### **Variable dependiente:**

Composición química de la aleación 6063.

## **CAPÍTULO III**

### **CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA**

#### **3.1 NIVEL O TIPO DE INVESTIGACIÓN**

El presente trabajo experimental tendrá un enfoque CUANTITATIVO ya que poseerá un conjunto de procesos secuenciales y probatorios; con el fin de cuantificar la precipitación de los principales elementos aleantes.

El alcance de la investigación como dicta la literatura, será en su inicio de carácter EXPLORATORIA porque no se ha abordado antes este tema en un proceso de colada continua horizontal para aleaciones de aluminio, así mismo será DESCRIPTIVO ya que por medio de la examinación y análisis de las muestras, permitirá especificar propiedades, características y rasgos de las mismas a lo largo del proceso. También será EXPLICATIVO para conocer la razón que se dan esos niveles de precipitación y bajo qué tipo de condiciones se suscitan. Esto se logrará al utilizar el equipo RTD para que nos muestre su respectiva curva de calentamiento y enfriamiento del *billet* en el horno de homogenizado.

## **3.2 POBLACIÓN Y MUESTRA**

Acerca de la población, está conformada por todos aquellos elementos que poseen y concuerdan con determinadas especificaciones. Así mismo la muestra debe ser estadísticamente representativa y debe corresponder a un subgrupo de la población con el objetivo de proceder con el proceso cuantitativo para el presente trabajo experimental.[8]

El tipo de la muestra para el presente trabajo debe ser **PROBABILÍSTICA** para que todos los elementos de la población seleccionada tengan la misma posibilidad de ser elegidos. También hay que especificar el tamaño de la muestra, lo cual requiere de dos procedimientos: [8]

- Cálculo del tamaño de la muestra.
- Seleccionar los elementos de la muestra.

### **3.2.1 CÁLCULO TAMAÑO DE LA MUESTRA**

Para el cálculo del tamaño de la muestra, primero hay que definir la unidad de análisis que ayuda a delimitar la población.

La unidad de análisis estará basada bajo la norma ASTM E716 (Estándar de prácticas para la recolección de muestras de aluminio y aleaciones de aluminio para análisis espectrométrico), utilizando un disco de enfriamiento moldeado (chill-cast disk) del tipo B, el cual es utilizado para el análisis cuantitativo utilizando un espectrómetro.

En la empresa CEDAL S.A, se recolecta en un turno de trabajo de ocho horas, dos muestras de tundish por hora, dando un total de dieciséis muestras.

Es importante mencionar que existen restricciones para el presente trabajo como son el tiempo otorgado para su estudio y la situación económica actual del país que ha afectado directamente a la empresa CEDA S.A; por tales razones se establece como población al total de muestras tomadas en tres turnos de trabajo, lo que equivale a cuarenta y ocho discos tipo B. Una vez definida la población se procede a calcular el tamaño de la muestra aplicando la siguiente ecuación matemática para población finita: [8]

$$n = \frac{Z_{\alpha}^2 \times N \times p \times q}{i^2(N - 1) + Z_{\alpha}^2 \times p \times q}$$

**Ecuación 3-1**

Donde:

n: Tamaño de la muestra.

N: Población o universo.

Z: Valor del nivel de confianza del 95.5% para Z: 1.96. Valor del nivel de confianza del 99.9% para Z: 2.58.

i: Margen de error.

p: Prevalencia esperada del parámetro a evaluar en caso de desconocerse.

q: 1-p.

Para el presente trabajo experimental se ha seleccionado los siguientes valores:

N: 48 discos tipo B.

Z: 1.96 porque es un nivel de confianza recomendado y aplicado en varias investigaciones.

i: 5% porque la literatura aconseja que el margen de error no supere el 5%.

p = q: 0.5 porque es un valor ideal para obtener de la población la máxima diversidad posible.

Reemplazando los valores obtenemos:

$$n = \frac{1.96^2 \times 48 \times 0.5 \times 0.5}{0.05^2(48 - 1) + 1.96^2 \times 0.5 \times 0.5} = 43$$

**Ecuación 3-2**

Obtuvimos un tamaño de muestra de 43 discos tipo B.

### 3.3 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

La operacionalización de las variables es un procedimiento que permite identificar las variables que posean la característica de ser medibles bajo parámetros llamados indicadores en relación con unidades de medida. [8]

#### 3.3.1 OPERACIONALIZACIÓN DE LA VARIABLE INDEPENDIENTE

Se define la variable independiente como: El proceso de colada continua horizontal.

**Tabla 3.1** Variable independiente  
Fuente: Autor

Conceptualización	Dimensiones	Indicadores	Items	Técnicas e Instrumentos
El proceso de colada continua horizontal con equipo HERTWICH, está orientado a la producción de aleaciones de aluminio con molde abierto para reducir los costos de producción y mantener una producción continua por lotes.	Parámetros	Temperatura	(°C) en Tundish	Observación Paneles de Control Fichas de registro
		Velocidad	(cm/min) Avance de mesa	
	Material	Materia Prima	% Chatarra negra % Chatarra blanca % Mg y Si	Fichas de registro

### 3.3.2 OPERACIONALIZACIÓN DE LA VARIABLE DEPENDIENTE

Se define la variable dependiente como: Composición química de la aleación 6063.

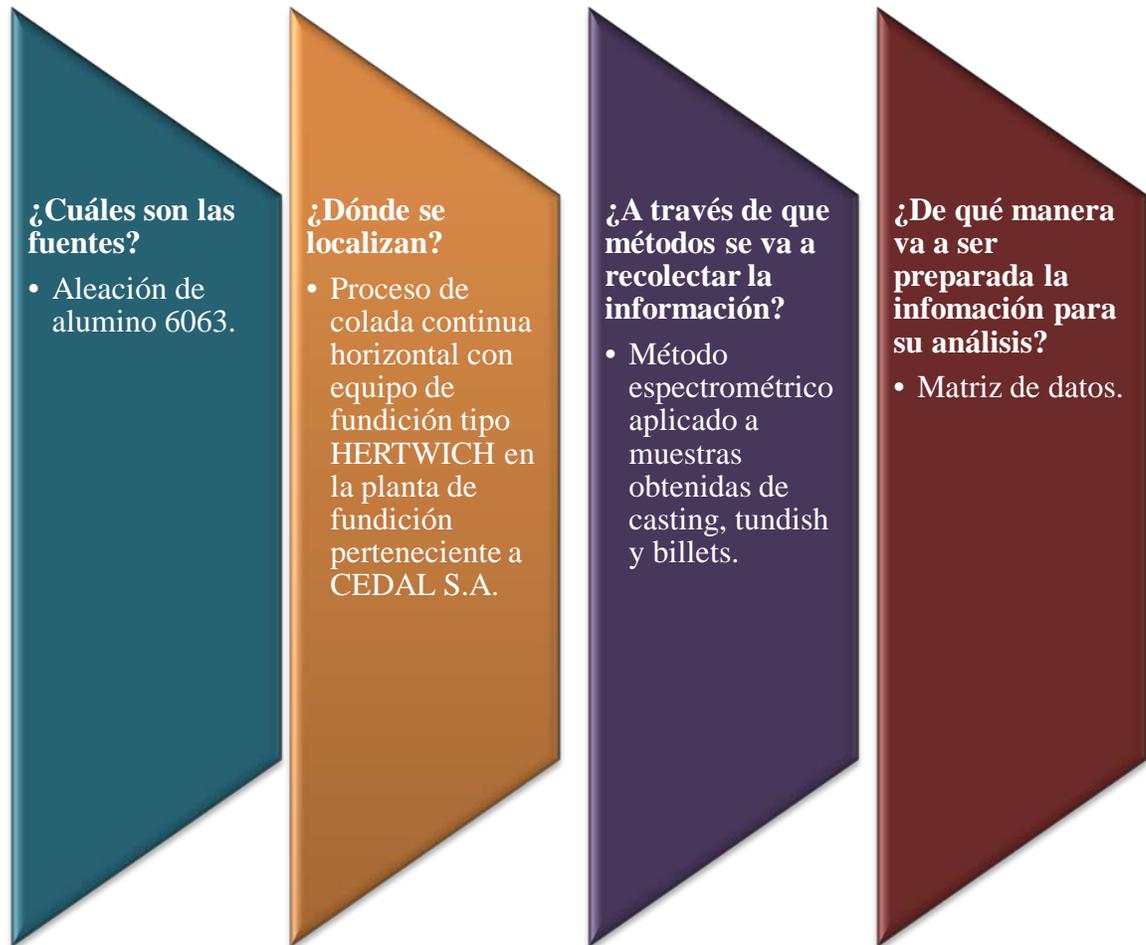
**Tabla 3.2** Variable dependiente

Fuente: Autor

Conceptualización	Dimensiones	Indicadores	Items	Técnicas e Instrumentos
La aleación 6063 como dicta la literatura, es una mezcla de elementos químicos. Cada uno de los aleantes deben estar en ciertos niveles para que la aleación sea aceptable y obtener sus bondades, por consiguiente esto va a influir en los niveles de precipitación.	Espectrometría	Niveles de elementos químicos	% Mg	Espectrómetro ASTM E716 ASTM E1251
			% Si	
	% Fe			
	Propiedades mecánicas	Resistencia a la tracción	MPa	ASTM B557M
		Dureza superficial	HB	Durómetro Fichas técnicas de dureza

### 3.4 PLAN DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

Para dar inicio a un plan de recolección de información, es necesario determinar lo siguiente:



**Figura 3.1** Plan para recolección de información  
**Fuente:** Autor

Para el siguiente estudio, la recolección de los datos tuvo lugar en la planta de fundición de la empresa CEDAL S.A ubicado en la ciudad de Latacunga, donde poseen el proceso de colada continua horizontal con equipo tipo HERTWICH. Los respectivos análisis y ensayos tendrán lugar en el laboratorio de materiales de la misma empresa.

Con el objetivo de mantener un orden en la recolección de los datos, se ha dividido por fases.

La primera fase se refiere a la recolección de muestras, para ello se tomó la decisión de dividir el tamaño de la muestra equitativamente con el fin de tomar veintidós muestras de casting y veintidós muestras de tundish para realizar su respectiva comparación. También se obtendrán cortes provenientes de billets homogenizados. No obstante, a de estos billets se obtendrán los elementos respectivos para ser sometidos a los ensayos de dureza y tracción.

La segunda fase está destinada a examinar las muestras obtenidas de casting, tundish y de los billets bajo norma ASTM E1251 y utilizando el espectrómetro que posee el laboratorio de materiales de la misma empresa, con el objetivo de obtener los datos necesarios para realizar el análisis cuantitativo de los aleantes principales precipitados.

La tercera fase se confiere al ensayo respectivo de dureza correspondiente a las muestras obtenidas de los billets.

La cuarta fase se realizará el respectivo ensayo de tracción con probetas bajo norma ASTM-B557M de los billets analizados previamente.

### **3.5 PLAN DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS**

#### **3.5.1 PLAN DE PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN**

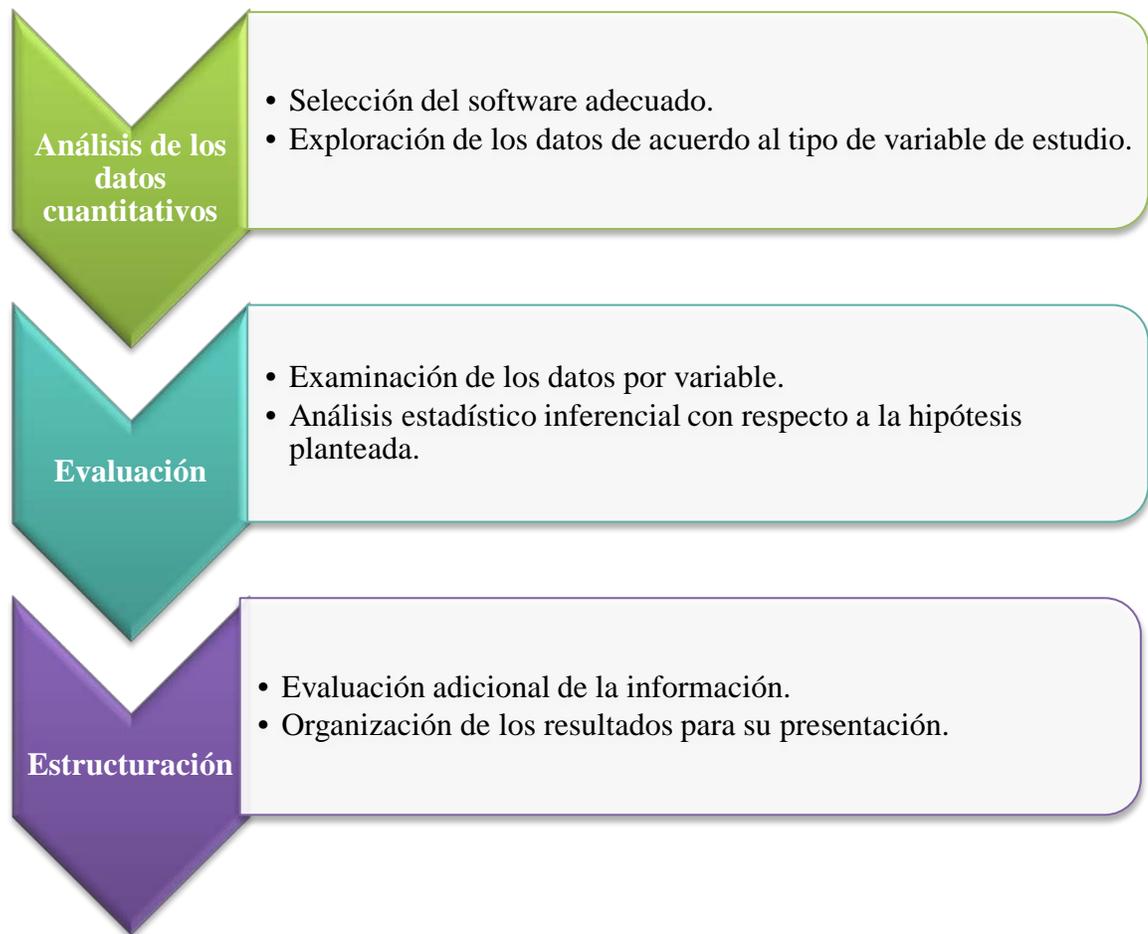
Planificar como se va a proceder a tratar la información, conviene dividirlo en etapas que facilitaran su posterior análisis y validación de los datos obtenidos. [8]



**Figura 3.2** Plan de procesamiento de la información  
**Fuente:** Autor

### 3.5.2 PLAN DE ANÁLISIS

El análisis de los datos cuantitativos se los prepara por medio de una matriz de datos donde se registra cada valor de manera organizada para su respectiva evaluación de la información de manera correcta. [8]

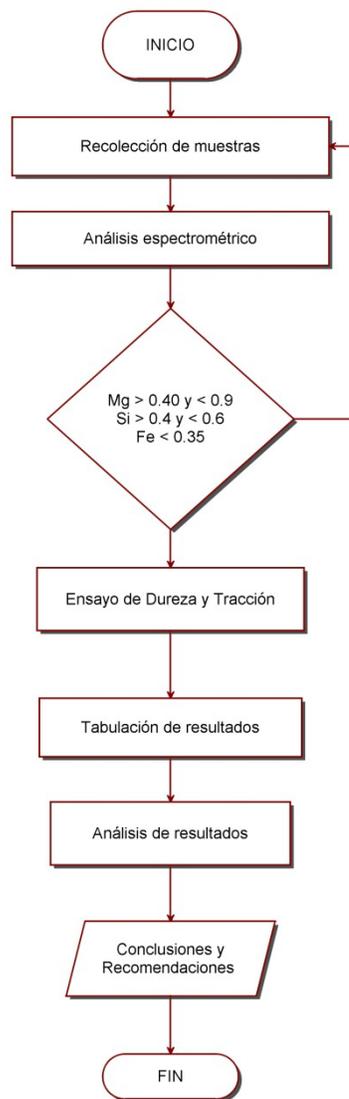


**Figura 3.3** Plan de análisis de la información

**Fuente:** Autor

## CAPÍTULO IV

### CAPÍTULO 4 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS



**Figura 4.1** Diagrama de flujo proceso de recolección, análisis e interpretación de resultados.

**Fuente:** Autor.

## 4.1 RECOLECCIÓN DE DATOS

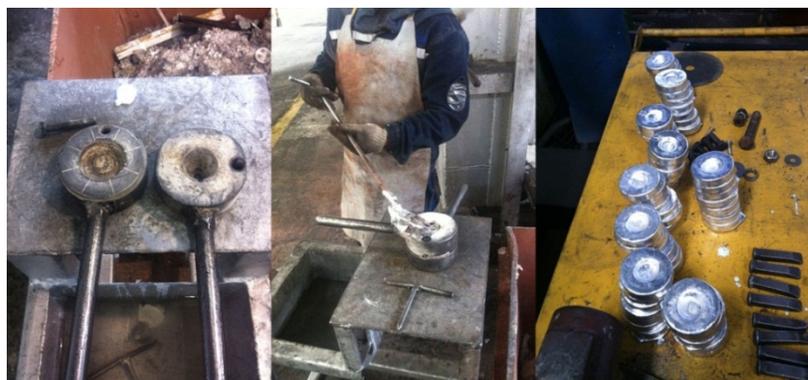
### 4.1.1 PRIMERA FASE RECOLECCIÓN DE MUESTRAS

#### 4.1.1.1 RECOLECCIÓN DE MUESTRAS DE CASTING Y TUNDISH

**Tabla 4.1** Compilación proceso recolección en casting y tundish.

Fuente: Autor.

<b>Fase:</b>	Primera.
<b>Método:</b>	Recolección de muestras provenientes de casting y tundish.
<b>EPP Obligatorio:</b>	Ropa protectora, Calzado de seguridad, Protección del cráneo, Protector facial, Protección auditiva, Protector de vías respiratorias, Protector de manos y antebrazos.
<b>Herramientas o Equipos:</b>	Molde tipo B (ASTM-E716), Banco de chill-cast, Cuchara.
<b>Procedimiento</b>	
<ol style="list-style-type: none"><li>1. Registrar temperatura de casting y tundish.</li><li>2. Tomar alternadamente la muestra de casting y tundish para verter en el molde tipo B.</li><li>3. Desmoldar cuidadosamente en el banco de chill-cast.</li><li>4. Marcar las muestras de casting con la letra “C” seguida del número correspondiente a la muestra.</li><li>5. Marcar las muestras de tundish con la letra “T” seguida del número correspondiente a la muestra.</li><li>6. Repetir el procedimiento con un intervalo de tiempo aproximado de quince minutos.</li></ol>	



**Figura 4.2** Toma de muestras de casting y tundish.

**Fuente:** Autor.

#### 4.1.1.2 CORTE DE MUESTRAS DE BILLETS HOMOGENIZADOS

**Tabla 4.2** Compilación procedimiento corte de muestras de billet homogenizado aleación normal.

**Fuente:** Autor.

<b>Fase:</b>	Primera.
<b>Método:</b>	Corte de muestra proveniente de billet homogenizado.
<b>EPP Obligatorio:</b>	Ropa protectora, Calzado de seguridad, Protección del cráneo, Protección de ojos, Protección auditiva, Protector de vías respiratorias, Protector de manos.
<b>Herramientas o Equipos:</b>	Sierra de corte semiautomática, Montacargas.
<b>Procedimiento</b>	
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Marcar el billet de 2794 mm (110") después del proceso de moldeado para identificarlo.</li> <li>2. Trasladarlo con el montacargas hacia el carro de homogenizado para el tratamiento térmico.</li> <li>3. Llevar hacia el área designada como "Sierra Loma".</li> <li>4. Señalar la distancia aproximada entre dos a cuatro centímetros a la que se van a efectuar los cortes a lo largo del billet y apilarlos de forma ordenada.</li> </ol>	



**Figura 4.3** Corte de muestras proveniente de billet.

**Fuente:** Autor.

#### 4.1.1.3 OBTENCIÓN CURVA DE CALENTAMIENTO Y ENFRIAMIENTO

**Tabla 4.3** Compilación procedimiento obtención curva de calentamiento y enfriamiento.

**Fuente:** Autor.

<b>Fase:</b>	Primera.
<b>Método:</b>	Obtención de curva de calentamiento y enfriamiento del proceso de homogenizado apoyado en equipo RTD.
<b>EPP Obligatorio:</b>	Ropa protectora, Calzado de seguridad, Protección del cráneo, Protección de ojos, Protección auditiva, Protector de vías respiratorias, Protector de manos.
<b>Herramientas o Equipos:</b>	Montacargas, Taladro eléctrico, Broca metálica de ¼”, Alambre tipo K, Pinza cortadora de alambre, Destornillador #6 de punta plana, Equipo RTD, Computadora portátil, Extensión eléctrica.
<b>Procedimiento</b>	
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Trasladar el billet de 5588 mm (220”) de longitud con la ayuda del montacargas hacia una zona segura para su preparación.</li> <li>2. Señalar una distancia de cinco centímetros de cada extremo del billet.</li> <li>3. Medir desde las anteriores marcas sesenta y ocho centímetros consecutivamente.</li> <li>4. Perforar en dirección al centro de billet utilizando el taladro eléctrico con la broca de ¼”.</li> </ol>	

5. Establecer el lugar donde va a ser posicionado la computadora y el equipo RTD.
6. Medir los diferentes segmentos de alambre tipo K.
7. Pelar ambos extremos del alambre tipo K, entorchar las puntas que van a ser introducidas en cada orificio del billet y etiquetarlas.
8. Introducir las puntas entorchadas y sellar con cemento a base de fibra cerámica para fijarlos.
9. Conectar cada alambre etiquetado de acuerdo al puerto correspondiente al equipo RTD y dar inicio al registro automático de los datos.



**Figura 4.4** Proceso para obtención de la curva de calentamiento en homogenizado.  
**Fuente:** Autor.

## 4.1.2 SEGUNDA FASE ANÁLISIS ESPECTROMÉTRICO

### 4.1.2.1 ANÁLISIS ESPECTROMÉTRICO MUESTRAS DE CASTING Y TUNDISH

**Tabla 4.4** Compilación procedimiento espectrometría discos tipo B.  
**Fuente:** Autor.

<b>Fase:</b>	Segunda.
<b>Método:</b>	Análisis espectrométrico de las muestras de casting y tundish.
<b>EPP Obligatorio:</b>	Ropa protectora, Calzado de seguridad, Protección del cráneo, Protección visual, Protección auditiva, Protector de manos.
<b>Herramientas o Equipos:</b>	Torno, Espectrómetro.
<b>Procedimiento</b>	
<ol style="list-style-type: none"><li>1. Refrentar los discos tipo B (entre 14 a 22% del espesor original).</li><li>2. Revisar que la superficie sea lisa y no presente poros.</li><li>3. Limpiar la base y la cabeza del electrodo antes de cada chispeo.</li><li>4. Colocar el disco tipo B refrentado.</li><li>5. Ingresar la información respectiva al tipo de muestra, en el cuadro de dialogo del programa.</li><li>6. Presionar el botón de inicio.</li><li>7. Realizar el chispeo alrededor del disco equivalente a la posición de los números en la cara de un reloj, es decir, a las 12, 3, 6 y 9.</li><li>8. Guardar los resultado de cada chispeo.</li></ol>	



**Figura 4.5** Procedimiento preparación muestra y análisis espectrométrico.  
**Fuente:** Autor.

#### 4.1.2.2 ANÁLISIS ESPECTROMÉTRICO DE BILLETS

**Tabla 4.5** Compilación procedimiento espectrometría de billets.  
**Fuente:** Autor.

<b>Fase:</b>	Segunda.
<b>Método:</b>	Análisis espectrométrico de las muestras obtenidas de los billets.
<b>EPP Obligatorio:</b>	Ropa protectora, Calzado de seguridad, Protección visual.
<b>Herramientas o Equipos:</b>	Espectrómetro.
<b>Procedimiento</b>	
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Tomar ordenadamente la muestra.</li> <li>2. Revisar que la superficie sea lisa, limpia y sus bordes no tengan rebabas de corte.</li> <li>3. Limpiar la base y la cabeza del electrodo antes de cada chispeo.</li> <li>4. Colocar el disco sobre la base del espectrómetro.</li> <li>5. Ingresar la información de la muestra en el cuadro de dialogo del programa.</li> <li>6. Presionar el botón de inicio.</li> <li>7. Realizar de dos a cuatro veces el chispeo en puntos diferentes.</li> <li>8. Guardar los resultado de cada chispeo.</li> </ol>	



**Figura 4.6** Espectrometría de cortes proveniente de billets.

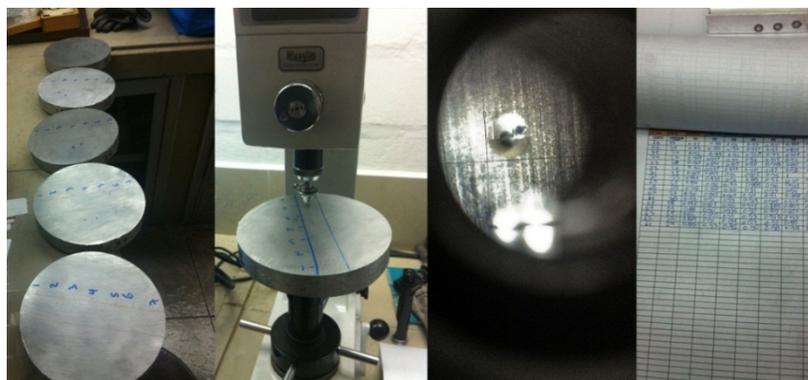
**Fuente:** Autor.

### 4.1.3 TERCERA FASE ENSAYO DE DUREZA

**Tabla 4.6** Compilación procedimiento ensayo de dureza Brinell.

**Fuente:** Autor.

<b>Fase:</b>	Tercera.
<b>Método:</b>	Ensayo de dureza Brinell.
<b>EPP Obligatorio:</b>	Ropa protectora, Calzado de seguridad, Protección visual.
<b>Herramientas o Equipos:</b>	Durómetro, Penetrador de bola con diámetro de 2.5mm, Microscopio de medición.
<b>Procedimiento</b>	
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Verificar la calibración del durómetro utilizando el penetrador adecuado.</li> <li>2. Colocar el penetrador de 2.5 milímetros de diámetro y seleccionar la fuerza de 613 N.</li> <li>3. Revisar que la superficie de la muestra sea lisa.</li> <li>4. Realizar siete marcas con una separación de 25.4 milímetros.</li> <li>5. Colocar el disco sobre la base de durómetro y acercar con el volante hacia el penetrador.</li> <li>6. Soltar la carga en el punto señalado para dejarla actuar entre 10 a 15 segundos y luego liberarla.</li> <li>7. Con el microscopio medir el diámetro de la huella y registrar los datos.</li> </ol>	



**Figura 4.7** Medición de dureza Brinell.

**Fuente:** Autor

#### 4.1.4 CUARTA FASE ENSAYO DE TRACCIÓN

**Tabla 4.7** Compilación procedimiento ensayo de tracción.

**Fuente:** Autor.

<b>Fase:</b>	Tercera
<b>Método:</b>	Ensayo de tracción
<b>EPP Obligatorio:</b>	Ropa protectora, Calzado de seguridad, Protección visual.
<b>Herramientas o Equipos:</b>	Máquina universal para ensayo de tracción, Calibrador digital, Probeta según norma ASTM-B557M, Computadora.
<b>Procedimiento</b>	
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Marcar la longitud inicial de calibración.</li> <li>2. Asegurar la probeta en cada extremo de las mordazas de la máquina.</li> <li>3. Colocar el extensómetro para que vaya registrando de manera automática los datos durante el ensayo.</li> <li>4. Iniciar la aplicación de la carga evitando que supere los 12 Mpa/s acorde a los parámetros establecidos hasta que haya alcanzado su límite de fluencia y llegar a la ruptura.</li> <li>5. Medir con el calibrador la longitud final.</li> <li>6. Registrar los datos y grabarlos en el sistema.</li> </ol>	

## **4.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS**

### **4.2.1 COMPARACIÓN ESPECTROMETRÍA ENTRE CASTING Y TUNDISH**

El proceso de colada continua horizontal, demanda un control constante sobre la marcha para conocer los niveles de aleantes principales y de otros elementos con el objetivo de obtener una aleación dentro de los rangos establecidos por norma NTE INEN 2250 Y ASTM B221.

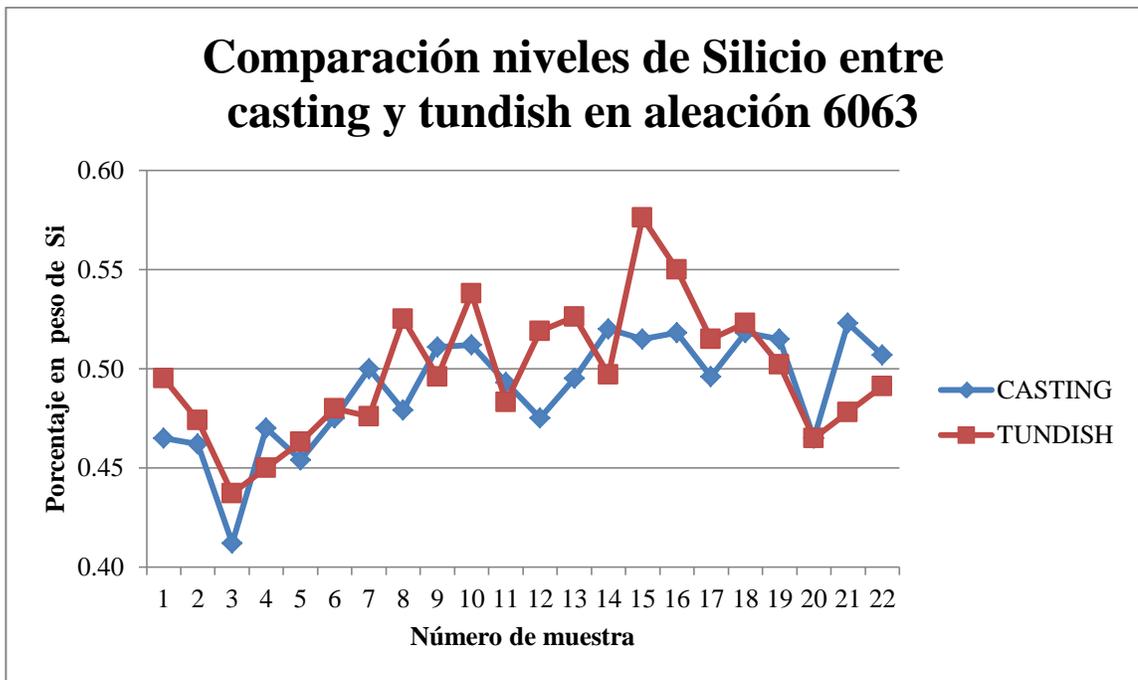
Esta comparación espectrométrica sirve para averiguar si existe diferencia alguna significativa en los niveles de aleantes principales al momento de tomar una muestra de casting o tundish.

Hay que tener en cuenta lo siguiente: “Todos los valores a ser mencionados durante todo este análisis corresponden al porcentaje en peso de los aleantes principales (Magnesio y Silicio) en aleación 6063”.

Con respecto a la diferencia entre los valores obtenidos a partir de los resultados de análisis de espectrómetro de las muestras tomadas en “casting” y “tundish” referente al silicio, en la siguiente tabla se aprecia en ambos casos que un cincuenta por ciento de las muestras están por encima del valor 0.496 con un valor máximo en casting de 0.523 y en tundish de 0.576, el otro cincuenta por ciento en ambos casos está por debajo del valor 0.496 con un valor mínimo en casting de 0.412 y en tundish de 0.437; de hecho el valor promedio en aleación se encuentran en 0.490 en casting y en tundish es de 0.498; en definitiva existe una diferencia del 1.63% menos al tomar muestras de casting.

**Tabla 4.8** Resumen resultados espectrometría de porcentaje en peso de Silicio.  
**Fuente:** CEDAL S.A

		
<b>RESUMEN ANÁLISIS ESPECTROMÉTRICO</b>		
<b>NÚMERO DE MUESTRAS:</b>	22	
<b>ELEMENTO:</b>	Silicio	
<b>PORCENTAJE EN PESO DE SILICIO EN                      ALEACIÓN 6063</b>		
<b>N° MUESTRA</b>	<b>CASTING</b>	<b>TUNDISH</b>
1	0.465	0.495
2	0.462	0.474
3	0.412	0.437
4	0.470	0.450
5	0.454	0.463
6	0.475	0.480
7	0.500	0.476
8	0.479	0.525
9	0.511	0.496
10	0.512	0.538
11	0.493	0.483
12	0.475	0.519
13	0.495	0.526
14	0.520	0.497
15	0.515	0.576
16	0.518	0.550
17	0.496	0.515
18	0.518	0.523
19	0.515	0.502
20	0.465	0.465
21	0.523	0.478
22	0.507	0.491
<b>Promedio</b>	0.490	0.498
<b>Mediana</b>	0.496	0.496
<b>Desviación Estándar</b>	0.028	0.034
<b>Mínimo</b>	0.412	0.437
<b>Máximo</b>	0.523	0.576

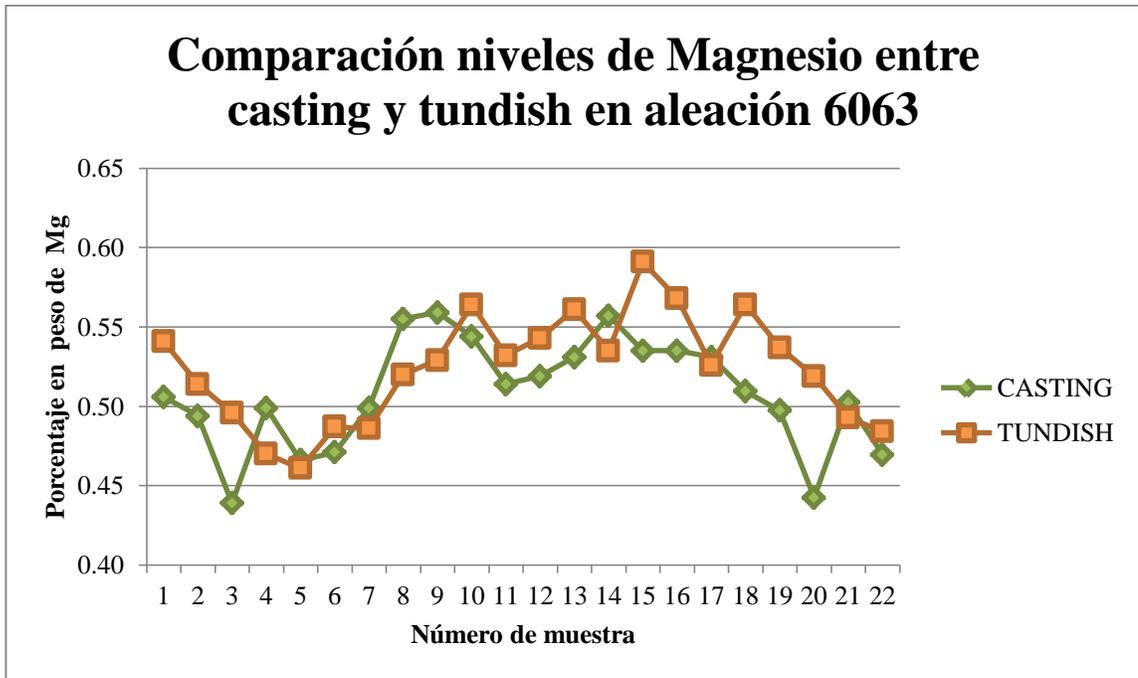


**Figura 4.8** Gráfico comparativo del porcentaje en peso de Silicio entre casting y tundish.  
**Fuente:** Autor.

Por otra parte en la siguiente tabla se puede distinguir la diferencia entre los valores obtenidos a partir de los resultados de análisis de espectrómetro de las muestras tomadas en “casting” y “tundish” referente al Magnesio, lo cual denota en casting que un cincuenta por ciento de las muestras están por encima del valor 0.508 con un valor máximo de 0.559 y el otro cincuenta por ciento está por debajo del valor 0.508 con un valor mínimo de 0.439. En el caso de las muestras tomadas de tundish, el cincuenta por ciento está por encima del valor 0.528 con un valor máximo de 0.591; el porcentaje restante está por debajo del valor de 0.528 con un valor mínimo de 0.461. En promedio los niveles de Magnesio se encuentran en 0.508 en casting y en tundish es de 0.524; aproximadamente registra en tundish un 3.05% más con respecto a los niveles de Magnesio en casting.

**Tabla 4.9** Resumen resultados espectrometría de porcentaje en peso de Magnesio.  
**Fuente:** CEDAL S.A

		
RESUMEN ANÁLISIS ESPECTROMÉTRICO		
NÚMERO DE MUESTRAS:	22	
ELEMENTO:	Magnesio	
PORCENTAJE EN PESO DE MAGNESIO EN ALEACIÓN 6063		
N° MUESTRA	CASTING	TUNDISH
1	0.506	0.541
2	0.494	0.514
3	0.439	0.496
4	0.499	0.470
5	0.466	0.461
6	0.471	0.487
7	0.499	0.486
8	0.555	0.520
9	0.559	0.529
10	0.544	0.564
11	0.514	0.532
12	0.519	0.543
13	0.531	0.561
14	0.557	0.535
15	0.535	0.591
16	0.535	0.568
17	0.531	0.526
18	0.510	0.564
19	0.498	0.537
20	0.443	0.519
21	0.503	0.493
22	0.470	0.484
<b>Promedio</b>	0.508	0.524
<b>Mediana</b>	0.508	0.528
<b>Desviación Estándar</b>	0.035	0.035
<b>Mínimo</b>	0.439	0.461
<b>Máximo</b>	0.559	0.591



**Figura 4.9** Gráfico comparativo del porcentaje en peso de Magnesio entre casting y tundish.  
**Fuente:** Autor.

Para finalizar esta parte del análisis y considerando la diferencia encontrada al momento de tomar muestras en casting y tundish, indistintamente del tipo de aleación a ser producida es preferible tomar muestras de “tundish” cuando se precisa equiparar los niveles de aleantes principales porque varios elementos y combinaciones van a precipitar fuera de la aleación en función del descenso de temperatura; en este caso la temperatura en tundish es menor a la temperatura de casting en un promedio de 35°C. [5][6]

## 4.2.2 RELACIONES ENTRE VARIABLES

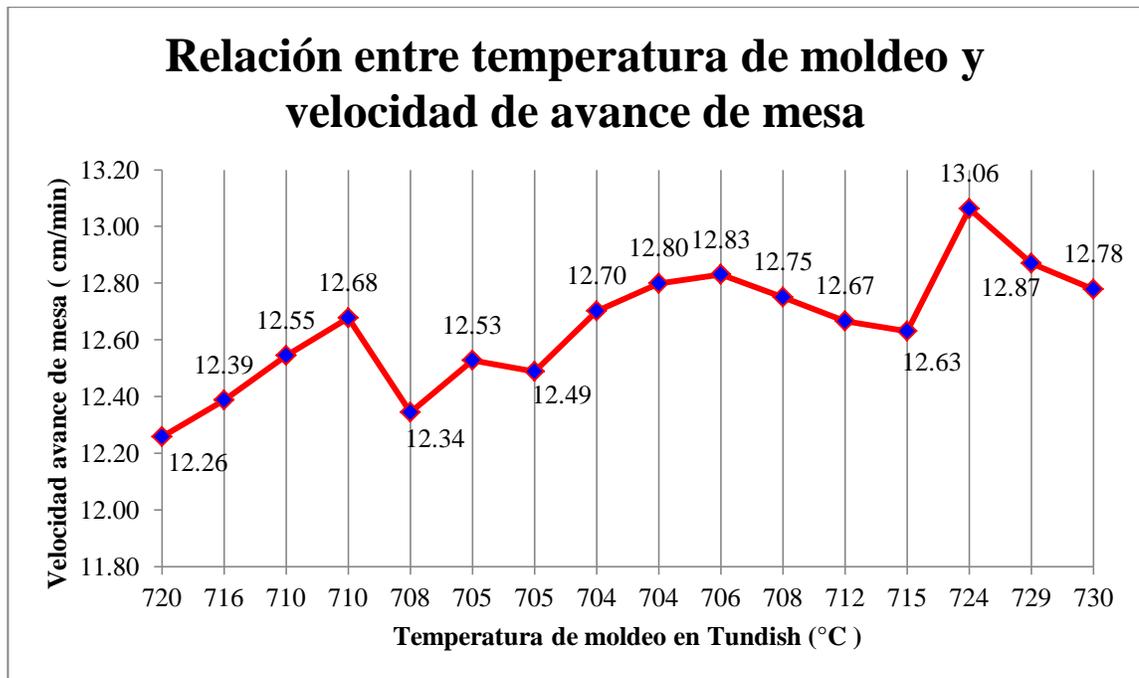
### 4.2.2.1 RELACIÓN ENTRE TEMPERATURA DE MOLDEO Y VELOCIDAD DE AVANCE DE MESA

**Tabla 4.10** Valores promedio registrados de temperatura de moldeo en tundish y velocidad de avance de mesa.  
**Fuente:** Autor.

RESUMEN REGISTRO TEMPERATURA DE MOLDEO Y AVANCE DE MESA		
<b>EMPRESA:</b>	CEDAL S.A	
<b>DEPARTAMENTO:</b>	FUNDICIÓN	
<b>TIPO DE PROCESO:</b>	COLADA CONTINUA HORIZONTAL	
<b>MARCA:</b>	HERTWICH	
<b>ELABORADO POR:</b>	HERNÁN NAVAS MOSCOSO	
HORA INICIO	Temperatura °C	Velocidad cm/min
8:00	720	12.26
8:30	716	12.39
9:00	710	12.55
9:30	710	12.68
10:00	708	12.34
10:30	705	12.53
11:00	705	12.49
11:30	704	12.70
12:00	704	12.80
12:30	706	12.83
13:00	708	12.75
13:30	712	12.67
14:00	715	12.63
14:30	724	13.06
15:00	729	12.87
15:30	730	12.78
Nota: Los datos presentados en esta tabla corresponden a valores promedios obtenidos de varias mediciones durante un turno de producción.		

En relación con respecto a dos variables importantes que son entre la temperatura registrada de moldeo en tundish y la velocidad de avance de mesa, se determinó que la velocidad de avance de mesa está en relación directa a la temperatura en tundish estableciendo las siguientes relaciones importantes:

- A mayor temperatura en tundish menor velocidad de avance de mesa.
- A menor temperatura en tundish mayor velocidad de avance de mesa.



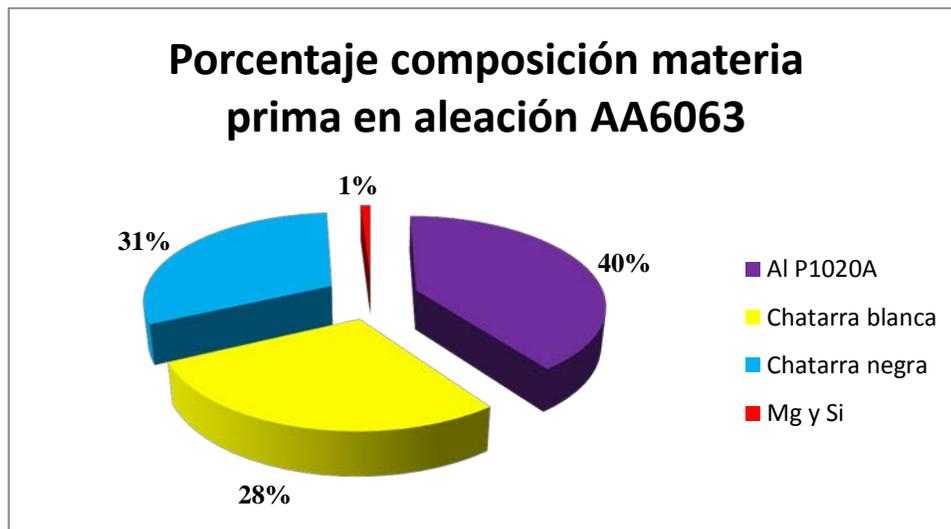
**Figura 4.10** Relación entre temperatura de tundish y velocidad de avance de mesa.  
Fuente: Autor.

El control del avance de mesa es de tipo automático y es fácil apreciar en ciertos puntos de la figura anterior que el mismo sistema trata de regular esa velocidad por el tiempo de respuesta en relación a la temperatura de moldeo en tundish; sin embargo existe un operador encargado de monitorear varios parámetros importantes, dentro de esos está la velocidad de avance de mesa y temperatura.

El operador puede rápidamente regular de forma manual la velocidad de avance de mesa para evitar un derrame en caso de alta temperatura o que se congele en caso de baja temperatura todo con el único objetivo de mantener la producción continua y sus costos de producción en el rango óptimo presupuestado.

#### 4.2.2.2 RELACIÓN ENTRE MATERIA PRIMA Y COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA ALEACIÓN AA6063

La materia prima es la base para el desarrollo de una buena aleación, en el Departamento de Fundición de la empresa CEDAL S.A considera al ciclo del reciclaje del aluminio como fundamental al momento de producir la aleación 6063. El 100% de la materia prima está conformada por: aluminio primario (AIP1020A) que compone el 40% de la aleación; la chatarra blanca (perfiles extruidos, *billets*) que corresponde al 28%; la chatarra negra bien seleccionada (productos laminados, trefilados y moldeados) que ocupa el 31%; aproximadamente el 1% corresponde al magnesio y silicio.



**Figura 4.11** Composición en porcentaje de materia prima en aleación AA6063 producida en CEDAL S.A  
Fuente: CEDAL S.A

La relación de la materia prima con la composición química de la aleación AA6063 es directa porque los niveles de porcentaje en peso de aleantes principales se verán afectados directamente con respecto al tipo de materia prima que sea cargada en la cámara de fusión del proceso de colada continua horizontal.

Los mayores porcentajes correspondientes a la materia prima: aluminio primario, chatarra blanca y chatarra negra, están establecidos por motivos de costos de producción; por otro lado el uno por ciento de la materia prima que corresponde a

Magnesio y Silicio, lo pueden modificar para obtener una aleación experimental y compararla con respecto a la aleación que normalmente se produce bajo rangos establecidos por norma.

El compromiso por parte de este trabajo experimental es el respetar los estándares de calidad que la empresa CEDAL S.A mantiene con cada uno de sus productos; no obstante el estudio realizado en dos billets homogenizados con dos tipos de aleaciones distintas 6063 fueron sometidas a parámetros según norma NTE INEN 2250 y ASTM B22.

De aquí en adelante se va a denominar la aleación con niveles normales como aleación “A” bajo los siguientes rangos de porcentaje en peso de los elementos principales a controlar en aleación:

**Tabla 4.11** Rango de porcentaje en peso de elementos principales a controlar durante proceso de colada continua horizontal en aleación “A”.  
Fuente: CEDAL S.A

<b>Rango de porcentaje en peso de elementos principales en aleación “A”</b>		
<b>Elemento</b>	<b>Máximo</b>	<b>Mínimo</b>
Magnesio (Mg)	0.50	0.48
Silicio (Si)	0.49	0.44
Hierro (Fe)	0.20	No aplica según norma

En cambio, de aquí en adelante se va a denominar la aleación con niveles experimentales como aleación “B” sometida a los siguientes rangos de porcentaje en peso de los elementos principales a controlar en aleación:

**Tabla 4.12** Rango de porcentaje en peso de elementos principales a controlar durante proceso de colada continua horizontal en aleación “B”.

**Fuente:** CEDAL S.A

<b>Rango de porcentaje en peso de elementos principales en aleación “B”</b>		
<b>Elemento</b>	<b>Máximo</b>	<b>Mínimo</b>
Magnesio (Mg)	0.49	0.45
Silicio (Si)	0.42	0.38
Hierro (Fe)	0.17	No aplica según normas

#### 4.2.3 ANÁLISIS RESULTADOS ESPECTROMETRÍA EN BILLETS

Los niveles promedio registrados en tundish para el control de la aleación “A” indican estar dentro de los rangos establecidos anteriormente. Los resultados de espectrometría se los resume en la siguiente tabla:

**Tabla 4.13** Resumen espectrometría de control en muestra de tundish de aleación "A".

**Fuente:** Autor.

<b>Resumen espectrometría en muestra de tundish en aleación “A”</b>			
<b>Elemento</b>	<b>Promedio</b>	<b>Máximo</b>	<b>Mínimo</b>
Magnesio (Mg)	0.4540	0.479	0.432
Silicio (Si)	0.4929	0.530	0.457
Hierro (Fe)	0.1491	0.178	0.140

Nota: Los valores descritos en esta tabla corresponden al porcentaje en peso de cada elemento.

En la tabla siguiente se puede apreciar los niveles de porcentaje en peso de los elementos principales a ser monitoreados en aleación 6063 después del proceso de homogenizado. En el *billet* de aleación “A”; en relación a los niveles de silicio, un cincuenta por ciento

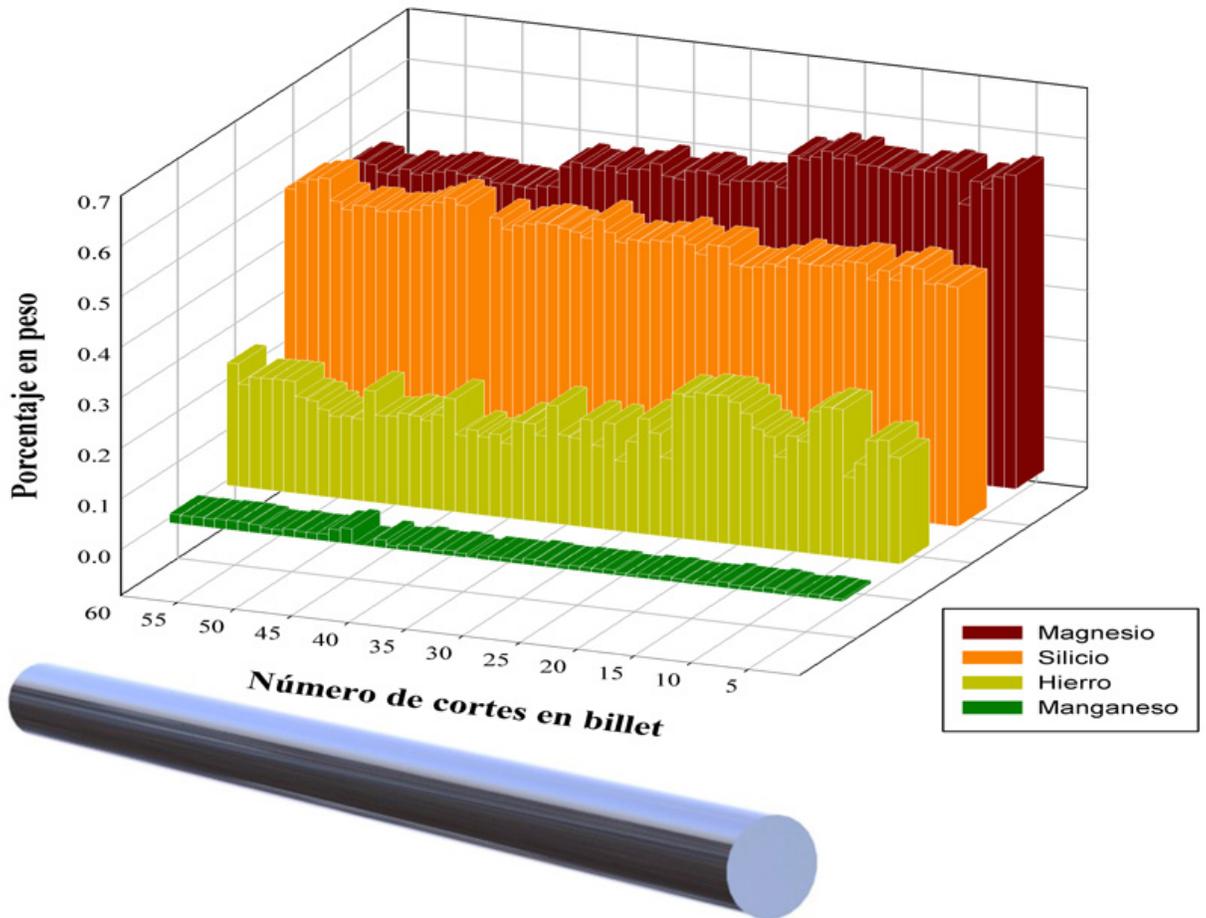
del *billet* está por encima del valor 0.4960 con un valor máximo de 0.5630 y el otro cincuenta por ciento está por debajo del valor 0.4960 con un valor mínimo de 0.4640 y con un promedio de 0.4969. Para los niveles de magnesio, un cincuenta por ciento del *billet* está por encima del valor 0.5450 con un valor máximo de 0.6240 y el otro cincuenta por ciento está por debajo del valor 0.5450 con un valor mínimo de 0.4770 obteniendo un promedio de 0.5470.

**Tabla 4.14** Compilación resultado análisis espectrométrico de billet homogenizado de aleación "A".  
Fuente: CEDAL S.A

<b>CORPORACIÓN ECUATORIANA DEL ALUMINIO</b>					
<b>RESULTADO DE ANÁLISIS DE ESPECTRÓMETRO</b>					
<b>Departamento:</b>	Fundición	<b>Origen:</b>	As cast		
<b>Proceso:</b>	Colada Continua Horizontal				
<b>Aleación:</b>	6063				
<b>Longitud de billet:</b>	2794 mm				
<b>Tratamiento térmico:</b>	Homogenizado			<b>Tipo de aleación</b>	
<b>Total muestras:</b>	59			"A"	
	<b>Al</b>	<b>Si</b>	<b>Fe</b>	<b>Mn</b>	<b>Mg</b>
<b>Promedio</b>	98.50	0.4969	0.2081	0.0111	0.5470
<b>Mediana</b>	98.50	0.4960	0.2020	0.0085	0.5450
<b>Desviación Estándar</b>	0.0919	0.0197	0.0438	0.0063	0.0491
<b>Máximo</b>	98.70	0.5630	0.2930	0.0340	0.6240
<b>Mínimo</b>	98.30	0.4640	0.1390	0.0012	0.4770
Nota: Los valores descritos en esta tabla corresponden al porcentaje en peso de cada elemento.					

La siguiente figura muestra longitudinalmente los niveles de los aleantes principales así como los elementos principales a controlar durante proceso de producción, haciendo notar como la composición química del *billet* evidencia la naturaleza del proceso de colada continua horizontal.

**Distribución longitudinal de elementos aleantes principales y elementos de control en aleación "A"**



**Figura 4.12** Representación de distribución longitudinal de principales elementos en billet homogenizado de aleación "A"

Fuente: Autor.

Los niveles promedio registrados en tundish para el control de la aleación “B” indican estar dentro de los rangos establecidos anteriormente. Los resultados de espectrometría se los resume en la siguiente tabla:

**Tabla 4.15** Resumen espectrometría de control en muestra de tundish de aleación "B".  
Fuente: Autor.

<b>Resumen espectrometría en muestra de tundish en aleación “B”</b>			
<b>Elemento</b>	<b>Promedio</b>	<b>Máximo</b>	<b>Mínimo</b>
Magnesio (Mg)	0.4890	0.4940	0.4670
Silicio (Si)	0.4293	0.4550	0.4060
Hierro (Fe)	0.1657	0.1690	0.1230

Nota: Los valores descritos en esta tabla corresponden al porcentaje en peso de cada elemento.

**Tabla 4.16** Compilación resultado análisis espectrométrico de billet homogenizado de aleación “B”.  
Fuente: CEDAL S.A

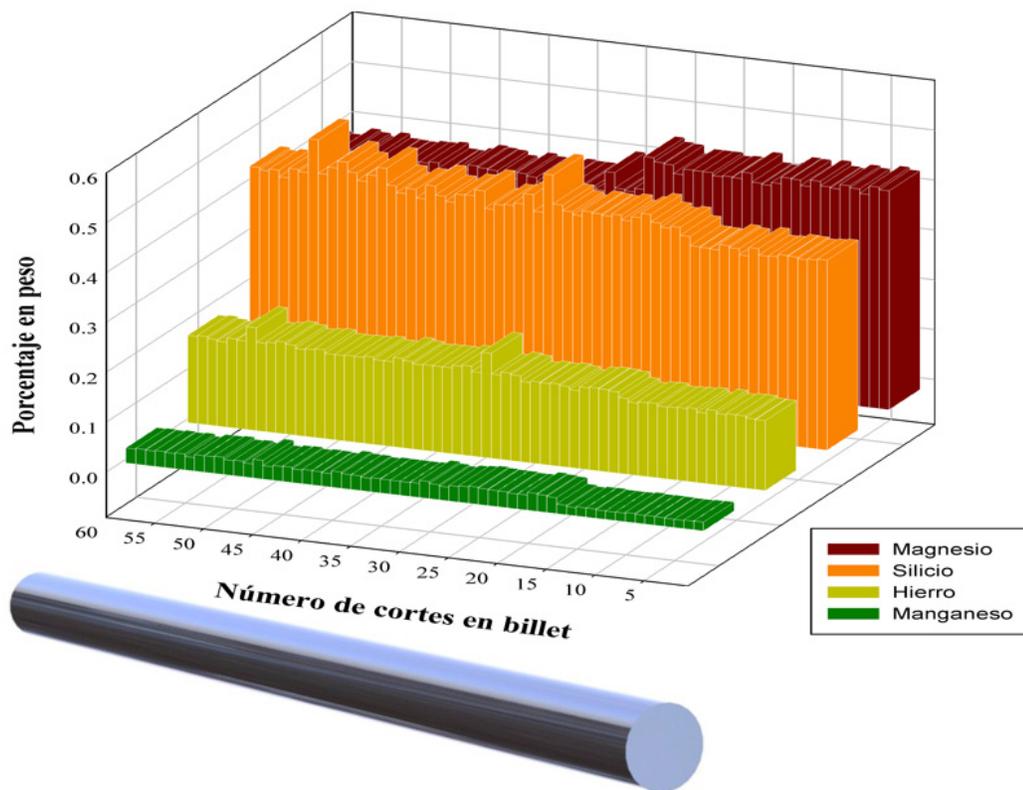
<b>CORPORACIÓN ECUATORIANA DEL ALUMINIO</b>					
<b>RESULTADO DE ANÁLISIS DE ESPECTRÓMETRO</b>					
<b>Departamento:</b>	Fundición	<b>Origen:</b>	As cast		
<b>Proceso:</b>	Colada Continua Horizontal				
<b>Aleación:</b>	6063				
<b>Longitud de billet:</b>	2794 mm				
<b>Tratamiento térmico:</b>	Homogenizado		<b>Tipo de aleación</b>		
<b>Total muestras:</b>	59		“B”		
	<b>Al</b>	<b>Si</b>	<b>Fe</b>	<b>Mn</b>	<b>Mg</b>
<b>Promedio</b>	98.34	0.4169	0.1663	0.0273	0.4055
<b>Mediana</b>	98.40	0.4190	0.1700	0.0294	0.3900
<b>Desviación Estándar</b>	0.5169	0.0276	0.0150	0.0062	0.0261
<b>Máximo</b>	98.80	0.5020	0.2100	0.0375	0.4500
<b>Mínimo</b>	96.30	0.3710	0.1400	0.0164	0.3730

Nota: Los valores descritos en esta tabla corresponden al porcentaje en peso de cada elemento.

En la tabla anterior se puede apreciar los niveles de porcentaje en peso de los elementos principales en la aleación “B” después del proceso de homogenizado; en relación a los niveles de Silicio, un cincuenta por ciento del billet está por encima del valor 0.4190 con un valor máximo de 0.5020 y el otro cincuenta por ciento está por debajo del valor 0.4190 con un valor mínimo de 0.3710 y con un promedio de 0.4169. Para los niveles de Magnesio, un cincuenta por ciento del billet está por encima del valor 0.3900 con un valor máximo de 0.4500 y el otro cincuenta por ciento está por debajo del valor 0.3900 con un valor mínimo de 0.3730 con un promedio de 0.4055.

La siguiente figura muestra cómo quedan distribuidos los aleantes principales en la aleación “B”, así como los elementos principales que se controlan durante proceso de producción.

**Distribución longitudinal de elementos aleantes principales y elementos de control en aleación “B”**



**Figura 4.13** Representación de distribución longitudinal de principales elementos en billet homogenizado de aleación “B”

Fuente: Autor.

#### 4.2.4 CUANTIFICACIÓN DE LOS ELEMENTOS ALEANTES PRINCIPALES PRECIPITADOS

La cuantificación de los elementos aleantes principales precipitados en la aleación 6063, parte al comprender el concepto que el magnesio y silicio precipitan para formar siliciuro de magnesio ( $2Mg + Si = Mg_2Si$ ), mismo que fue descrito en el segundo capítulo del presente trabajo.

El cálculo es posible al poder obtener por medio de espectrometría el porcentaje en peso de silicio y magnesio que son los principales elementos aleantes en aleaciones de la serie 6000.

Como punto de partida de la cuantificación, se lo hace a través de la relación estequiométrica entre magnesio y silicio por encontrarse en la formulación química del  $Mg_2Si$  porque al ser un cuerpo compuesto claramente se ve que posee dos átomos de magnesio y un átomo de silicio, si se conoce el peso atómico de cada elemento se obtiene la siguiente razón para las aleaciones de la serie 6000: [2][9][10][11]

$$\frac{Mg}{Si} = \frac{24.3050 \times 2}{28.0855 \times 1} = \frac{48.61}{28.0855} = 1.73 \quad \text{Ecuación 4-1}$$

Del valor obtenido de 1.73 por medio de la anterior razón estequiométrica, permite establecer lo siguiente: [2]

- Si la relación entre Magnesio y Silicio es mayor a 1.73, la aleación posee exceso de Magnesio.

$$\frac{\%Mg}{\%Si} > 1.73 \quad \therefore \text{Exceso de Mg} \quad \text{Ecuación 4-2}$$

- Si la relación entre Magnesio y Silicio es menor a 1.73, la aleación posee un exceso de Silicio.

$$\frac{\%Mg}{\%Si} < 1.73 \quad \therefore \text{Exceso de Si} \quad \text{Ecuación 4-3}$$

- Si la relación entre Magnesio y Silicio es igual a 1.73, la aleación es de tipo estequiométrica.

$$\frac{\%Mg}{\%Si} = 1.73 \therefore \text{Aleación estequiométrica} \quad \text{Ecuación 4-4}$$

Para cualquier aleación de aluminio perteneciente a la serie 6000, basta con realizar medición espectrométrica y obtener los niveles de porcentaje en peso de silicio y magnesio para aplicar las razones mencionadas anteriormente.

Basado en los resultados promedio de espectrómetro del *billet* homogenizado de aleación “A”, se procede a evaluar qué tipo de aleación tenemos:

$$\frac{\%Mg}{\%Si} = \frac{0.5470}{0.4969} = 1.101 \quad \text{Ecuación 4-5}$$

Por consiguiente 1.101 es menor a 1.73 lo cual demuestra que la aleación “A” posee exceso de silicio.

Aplicamos el mismo cálculo para la aleación “B”:

$$\frac{\%Mg}{\%Si} = \frac{0.4055}{0.4169} = 0.973 \quad \text{Ecuación 4-6}$$

El valor resultante es de 0.973 que es menor a 1.73 lo que nos indica que la aleación “B” posee exceso de silicio.

A partir de estudios experimentales anteriores, han aportado modelos matemáticos a la industria metalúrgica del aluminio, para ser aplicados durante los continuos controles de calidad sin detener el proceso de producción y evitando encarecer su costo de producción.[2][3][6][9][10] [14]

En la formación de  $Mg_2Si$  se valora que todo el contenido de magnesio en la aleación 6063 se precipita para combinarse con la mitad de Silicio disponible y así formar  $Mg_2Si$ ; por lo contrario estos niveles de Silicio disponible se ven afectados por la presencia de Hierro y Manganeso en la aleación; con el fin de cuantificar nivel de Silicio disponible se procede aplicar la siguiente ecuación: [2][6][14]

$$\%Si \text{ disponible para formar } Mg_2Si = \%Si - \left( \frac{\%Fe + \%Mn}{4} \right) \quad \text{Ecuación 4-7}$$

Donde los valores de Si, Fe y Mn están en porcentaje en peso de cada elemento, por consiguiente el resultado de Si disponible para formar  $Mg_2Si$  está en porcentaje en peso.

Para la aleación “A”, tomando los valores de niveles promedio obtenidos de cada elemento, posee 0.442 de Silicio disponible para formar  $Mg_2Si$ .

En el caso de la aleación “B”, se obtuvo 0.369 de Si disponible para la formación de  $Mg_2Si$ .

A continuación es necesario conocer cuánto de silicio es consumido para formar  $Mg_2Si$ . Mediante la relación estequiométrica se puede establecer aplicando la siguiente ecuación: [2][6][9][10][11][14]

$$\%Si = \frac{\%Mg}{1.73} \cong 0.578 \times \%Mg \quad \text{Ecuación 4-8}$$

Donde los valores de Mg y Si están en porcentaje en peso de cada elemento. Se dedujo en la aleación “A” un total de silicio consumido de 0.3162 para formar  $Mg_2Si$ .

En la aleación “B” se obtuvo 0.234 de silicio consumido para formar  $Mg_2Si$ .

Uno de los objetivos corresponde a cuantificar los precipitados de los aleantes principales que son Mg y Si, sabiendo que el producto de esta precipitación es el siliciuro de magnesio, se procede a calcular el porcentaje en peso de  $Mg_2Si$  obtenido para cada caso a partir de la siguiente ecuación: [2][6][9][10][11][14]

$$\%Mg_2Si = \%Mg + \%Si \text{ consumido} \quad \text{Ecuación 4-9}$$

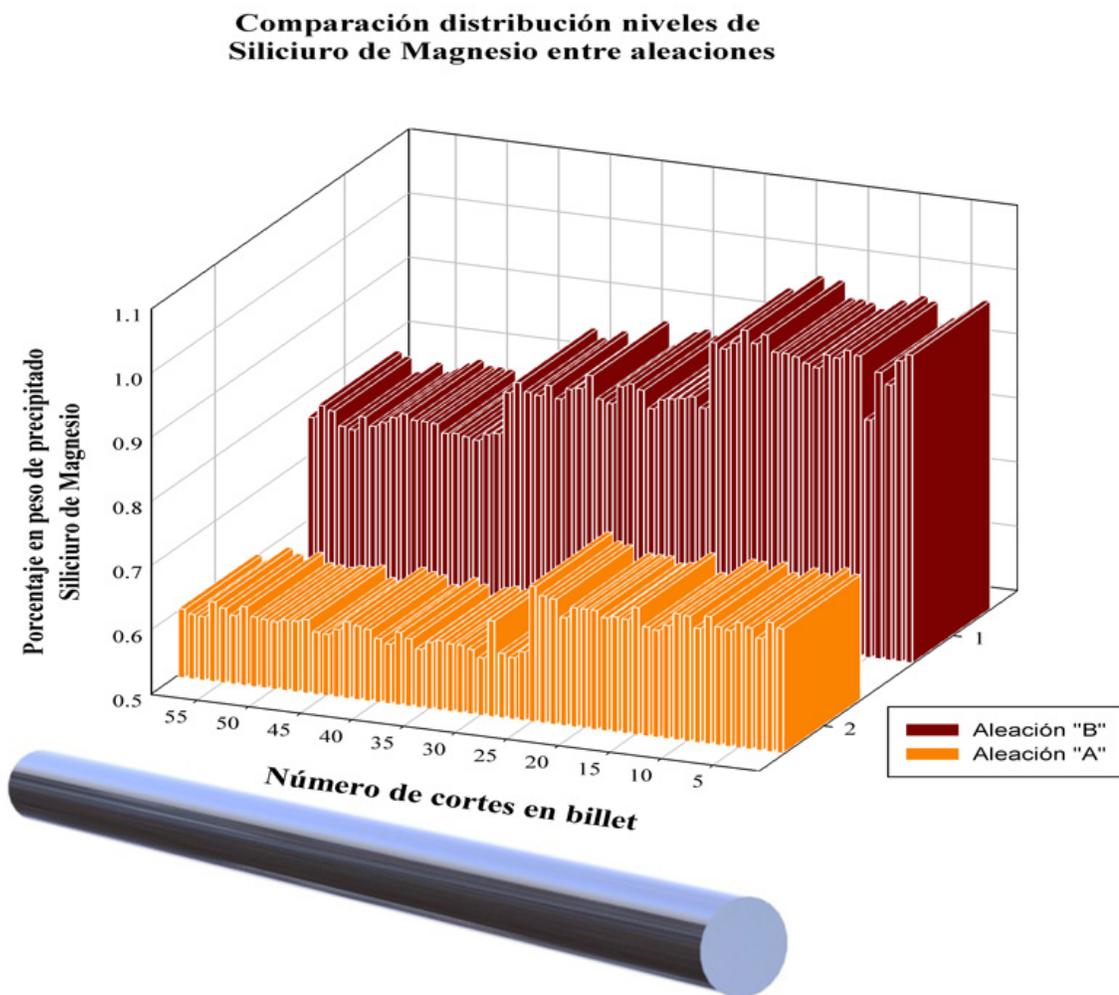
Para la aleación “A” se obtuvo un valor promedio de 0.863 de porcentaje en peso de  $Mg_2Si$  y en la aleación “B” se obtuvo un valor promedio de 0.640 en porcentaje en peso de  $Mg_2Si$ .

Como recomendación técnica, es importante que los niveles obtenidos cuantitativamente de Siliciuro de Magnesio para las aleaciones de la serie 6000 deba poseer un promedio

mínimo de 0.61 de porcentaje en peso de  $Mg_2Si$  sin que supere un valor de 0.90 de porcentaje en peso específicamente para la aleación 6063. [14]

En promedio ambas aleaciones presentan sus niveles de siliciuro de magnesio dentro del rango técnico recomendado. [14]

Al ser un proceso de colada continua horizontal se puede apreciar en la siguiente figura la comparación de la distribución longitudinal en porcentaje en peso de  $Mg_2Si$  en los *billets* de aluminio correspondiente a este estudio.



**Figura 4.14** Comparación entre aleación "A" y "B" de niveles de precipitado de Siliciuro de Magnesio a lo largo de billet homogenizado.

Fuente: Autor.

Se hace visible la variación de la distribución de precipitados de  $Mg_2Si$  de forma longitudinal en los *billets* después del proceso de homogenizado con un punto máximo de 0.9847 en la aleación “A” y de 0.7101 en la aleación “B”; así mismo registra un punto mínimo de 0.7527 para la aleación “A” y de 0.5886 para la aleación “B”.

El siguiente punto es conocer cuánto Silicio “Libre o Exceso” posee la aleación, porque el *billet* luego del proceso de homogenizado va a ser extruido y por ello al tener Silicio libre en porcentaje en peso sobre los 0.20 este va a presentar una reducción de su elasticidad y en la velocidad de extrusión. [2]

Para obtener el valor de Silicio “Libre o Exceso” se aplica la siguiente ecuación:  
[2][9][10][11]

$$\%Si \text{ libre} = \%Si \text{ disponible} - \%Si \text{ consumido} \qquad \text{Ecuación 4-10}$$

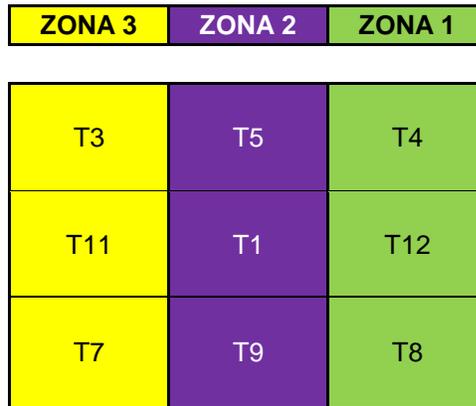
El valor promedio de Silicio “Libre o Exceso” obtenido para la aleación “A” es de 0.1259 y para la aleación “B” es de 0.1341 con un 0.82% mayor con respecto a la aleación “A”; además ambas aleaciones están dentro del rango recomendado que deben poseer en Silicio “Libre o Exceso”.

#### **4.2.5 ANÁLISIS RESULTADOS CURVA DE CALENTAMIENTO Y ENFRIAMIENTO**

El proceso de homogenizado en la empresa CEDAL S.A, actualmente corresponde a un total de diez horas divididas de la siguiente manera:

- Rampa de calentamiento de cinco horas.
- Tiempo de empape de dos horas a 560 °C.
- Tiempo de enfriamiento de tres horas a una razón de 135 °C por hora.

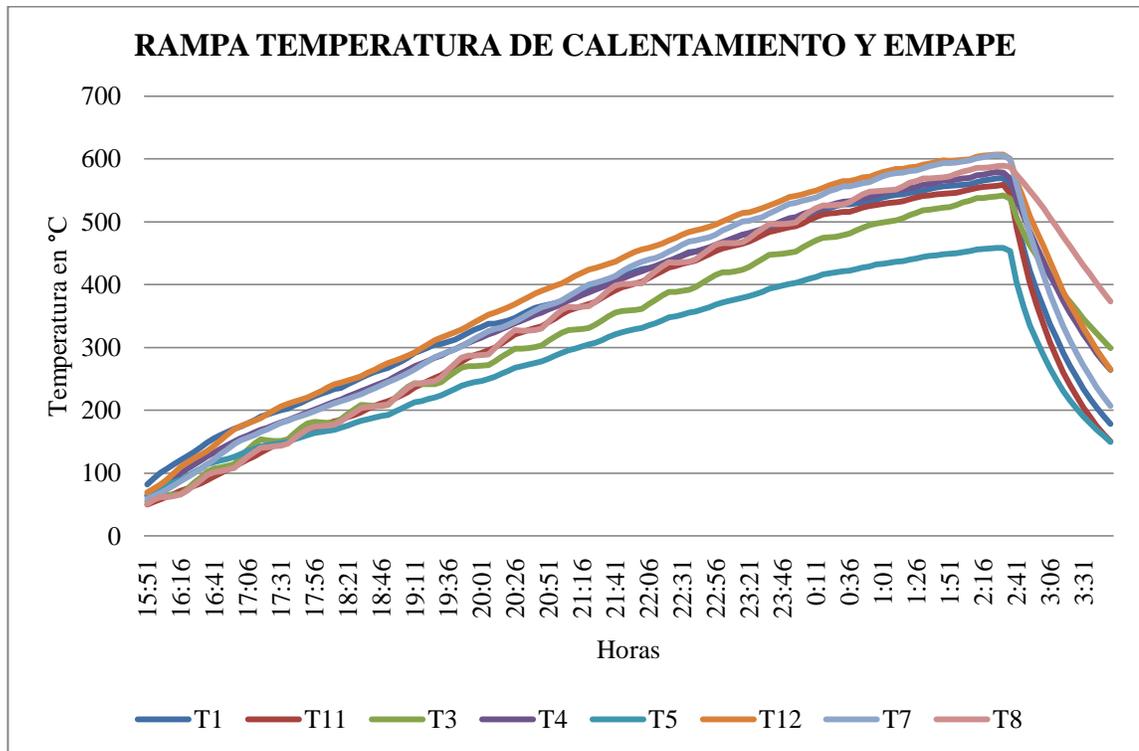
El horno de homogenizado posee tres zonas las cuales se muestran distribuidas de la siguiente manera:



**Figura 4.15** Vista superior de la distribución de zonas en horno de homogenizado con nomenclatura de medición propia del sistema de control en sus distintos puntos.

**Fuente:** Autor.

Para obtener mediciones que permitan conocer la temperatura interna del *billet* durante el proceso de homogenizado, se aplicó el proceso descrito en este capítulo correspondiente a la primera fase. Esto permitió obtener la respectiva curva de calentamiento y enfriamiento “*in-situ*”:



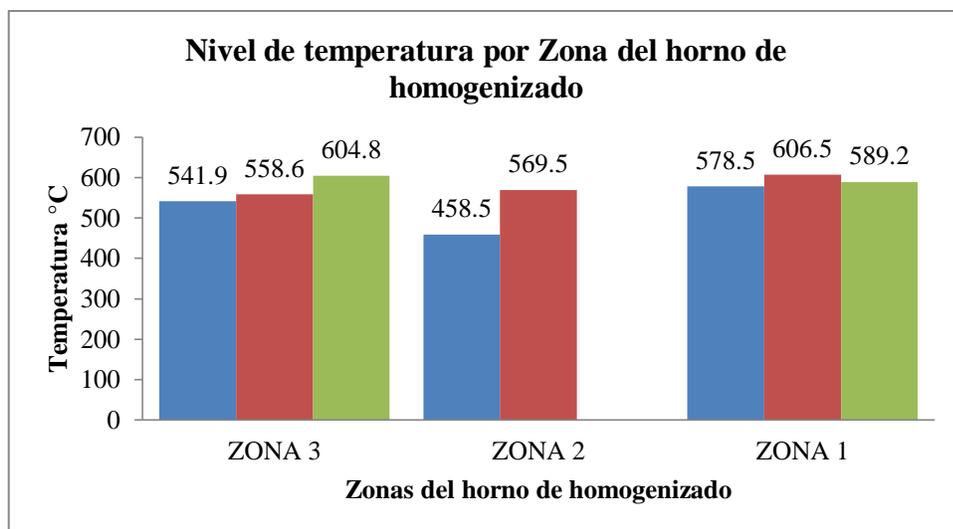
**Figura 4.16** Diagrama de curva de calentamiento en billet de aleación 6063 durante el proceso de homogenizado.

**Fuente:** CEDAL S.A.

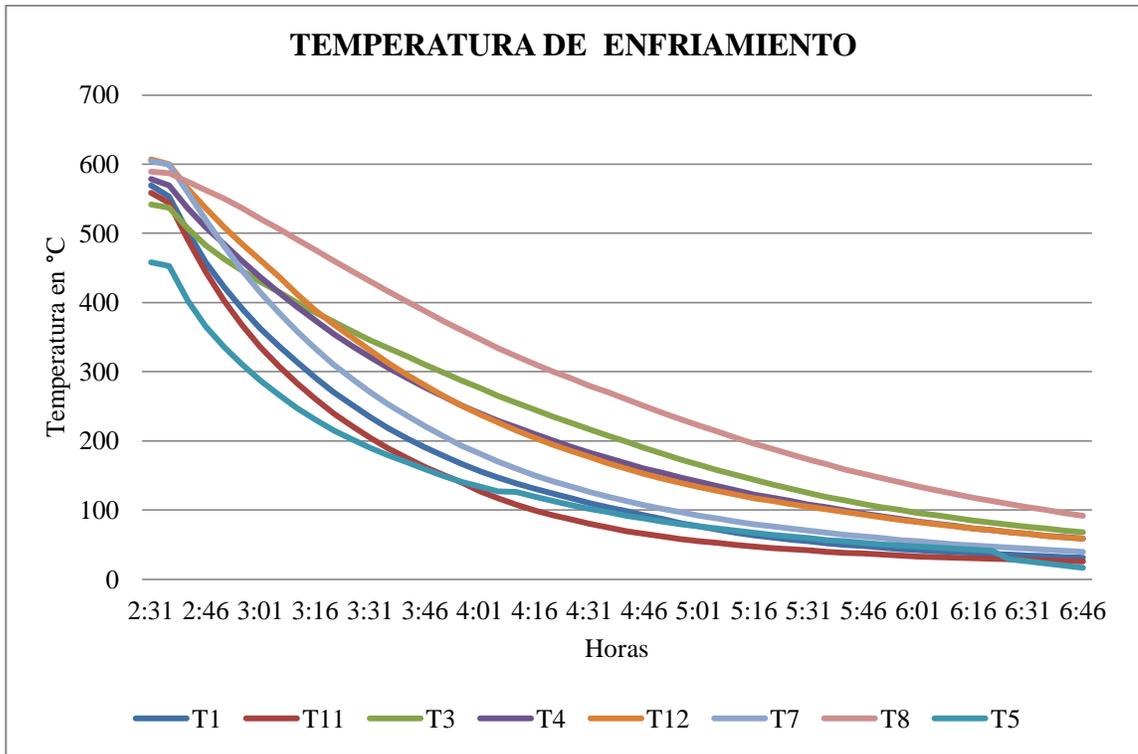
Para el tiempo de empape, en el punto T12 se registró la más alta temperatura que fue de 606.5 °C, en segundo lugar el punto T7 con 604.8 °C, en tercer lugar el punto T8 con 589.2 °C, en cuarto lugar el punto T4 con 578.5 °C, en quinto lugar T1 con 569.5 °C, en sexto lugar está el punto T11 con 558.6 °C, en séptimo lugar el punto T3 con 541.9 °C y por último en el punto T5 la temperatura más baja de 458.5 °C.

En la siguiente figura se muestra la comparación entre zonas, donde el punto más frío está situado en la zona 2 del horno de homogenizado lo cual supone hipotéticamente que en los billets de mayor longitud, en la parte media tendrán una menor concentración de precipitados de siliciuro de magnesio y en los extremos se hallara un mayor nivel de concentración de precipitados de Mg<sub>2</sub>Si.

Técnicamente es recomendable que la razón de enfriamiento desde la temperatura de empape hasta alcanzar los 250 °C en el billet, esta debe ser aproximadamente en promedio entre 200 °C a 185 °C por hora para obtener una distribución más homogénea de los precipitados de Mg<sub>2</sub>Si; no obstante la razón promedio obtenida por medio de la curva de enfriamiento fue de 189.75 °C por hora en un tiempo de dos horas promedio por la distribución heterogénea de la temperatura en el billet en datos obtenidos con el equipo RTD. [2][6][14]



**Figura 4.17** Comparación niveles de temperatura por zona del horno de homogenizado.  
Fuente: Autor.



**Figura 4.18** Diagrama curva de enfriamiento en billet de aleación 6063.  
**Fuente:** CEDAL S.A.

#### **4.2.6 ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL ENSAYO DE DUREZA BRINELL**

El ensayo respectivo de dureza tuvo lugar en el laboratorio de calidad perteneciente a la empresa CEDAL S.A, mismo que se lo realizo bajo norma ASTM-E10. Con una fuerza aplicada de 613 N con el identador de bola de diámetro 2.5 milímetros. Los resultados obtenidos se los resume en las siguientes tablas:

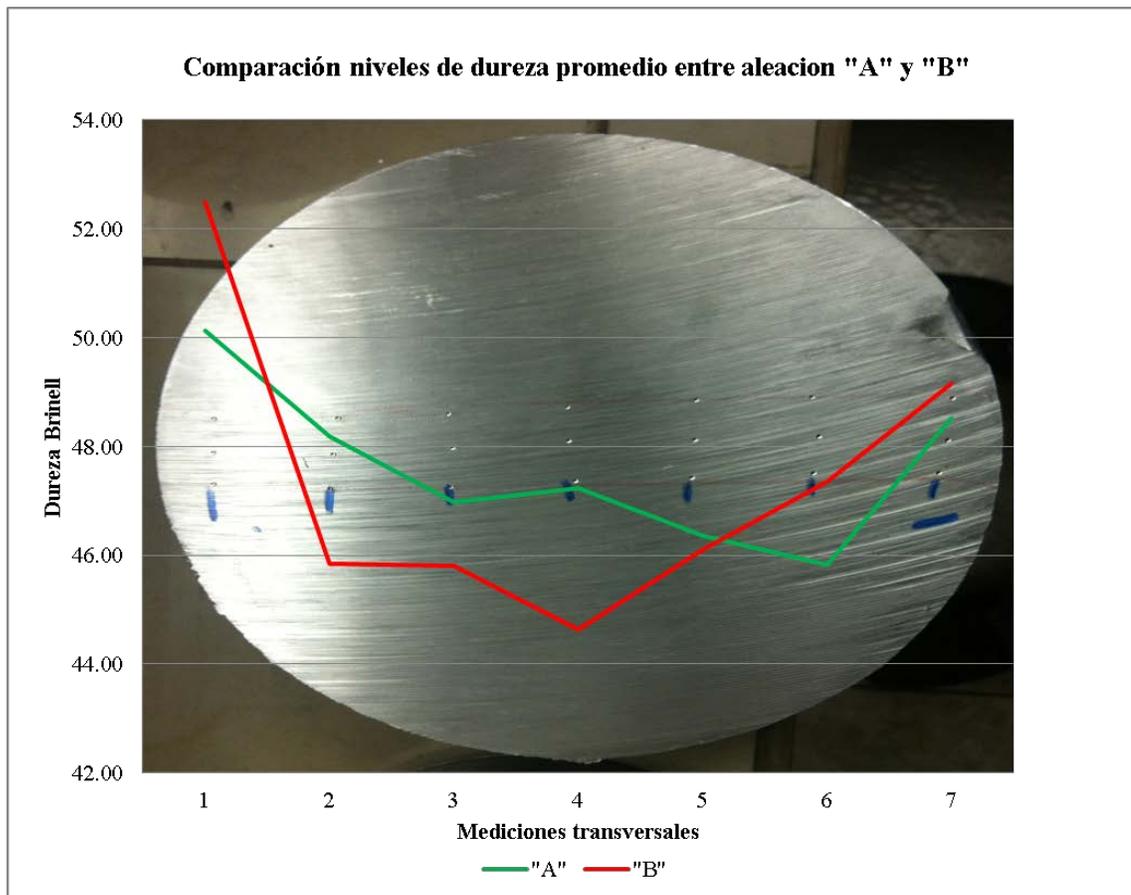
**Tabla 4.17** Resumen comparativo niveles de dureza Brinell entre billet homogenizado de aleación “A” y “B”.  
**Fuente:** Autor.

		
<b>CORPORACIÓN ECUATORIANA DEL ALUMINIO</b>		
<b>RESULTADO ENSAYO DE DUREZA BRINELL</b>		
<b>Departamento:</b>	Fundición	
<b>Origen:</b>	As cast	
<b>Proceso:</b>	Colada Continua Horizontal	
<b>Aleación:</b>	6063	
<b>Longitud de billet:</b>	2794 mm	
<b>Tratamiento térmico:</b>	Homogenizado	
<b>Total muestras:</b>	59	
<b>Mediciones por muestra:</b>	7	
<b>Identador</b>	2.5 mm	
<b>Fuerza:</b>	613 N	
<b>Tiempo:</b>	10 s	
<b>Tipo de aleación:</b>	<b>“A”</b>	<b>“B”</b>
<b>Promedio</b>	47.60	47.34
<b>Mediana</b>	46.08	46.65
<b>Desviación Estándar</b>	3.60	3.33
<b>Máximo</b>	56.50	57.31
<b>Mínimo</b>	43.08	42.70

Al comparar los resultados entre ambas aleaciones, se aprecian los valores experimentales obtenidos referentes a nivel de dureza Brinell, en el billet de aleación "A" se obtuvo que un cincuenta por ciento posee niveles de dureza que están sobre los 46.08 HB alcanzando una dureza máxima de 56.50 HB y el otro cincuenta por ciento del billet posee niveles de dureza por debajo de 46.08 HB llegando a una dureza mínima de 43.08 HB y con una dureza promedio en su total de 47.60 HB.

La aleación "B" registró un cincuenta por ciento del billet posee niveles de dureza sobre los 46.65 HB con un máximo de 57.31 HB y el otro cincuenta por ciento del mismo alcanzó niveles por debajo del 46.65 HB con un mínimo de 42.70 HB, logrando una dureza promedio en todo el billet de 47.34 HB.

Al contrario que se podría pensar, la aleación "B" posee en promedio un 0.55% menor dureza que la aleación "A".



**Figura 4.19** Contraste dureza HB promedio entre billet homogenizado de aleación "A" y "B".  
Fuente: Autor.

Niveles de dureza Brinell a lo largo de billet homogenizado de aleación "A"

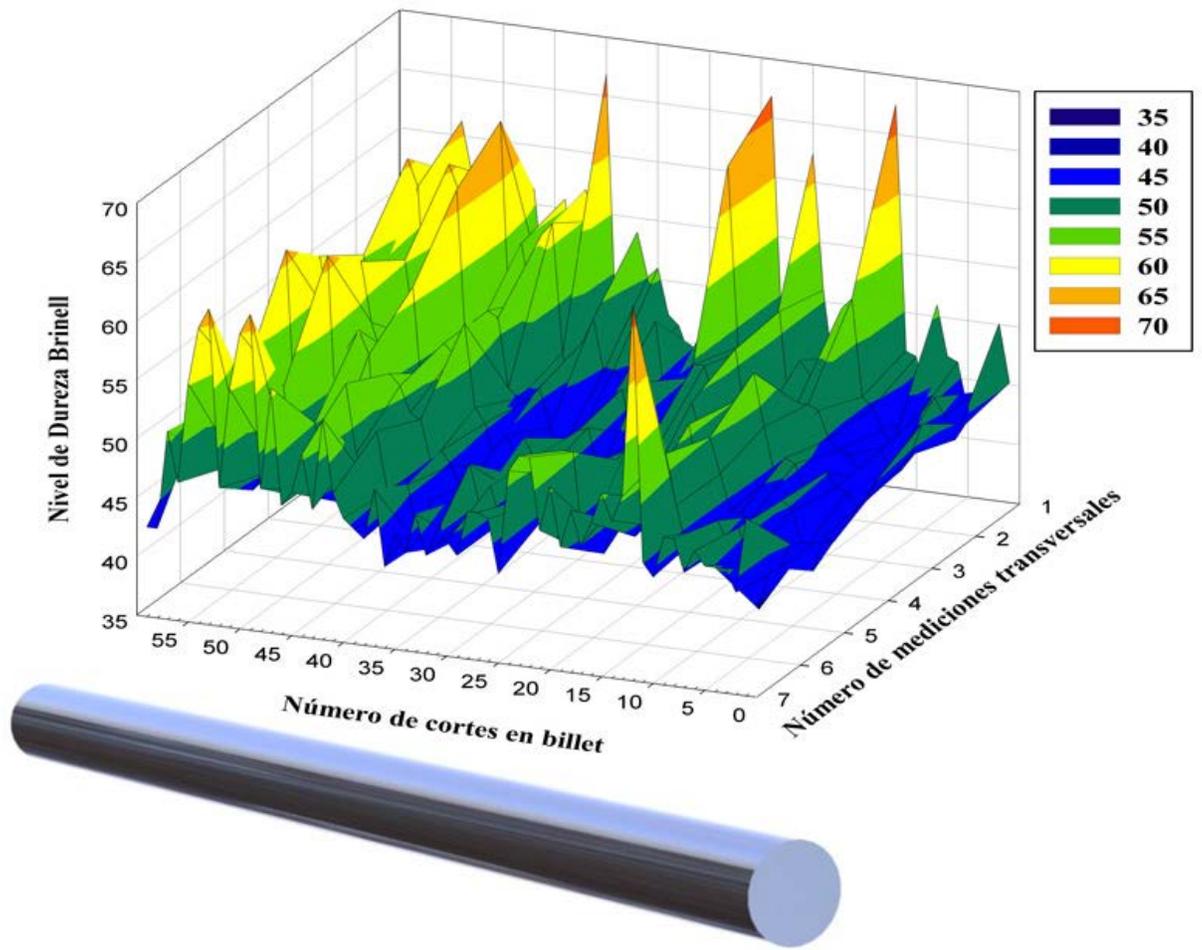


Figura 4.20 Dureza Brinell a lo largo del billet homogenizado de aleación "A".  
Fuente: Autor.

Niveles de dureza Brinell a lo largo de billet homogenizado de aleación "B"

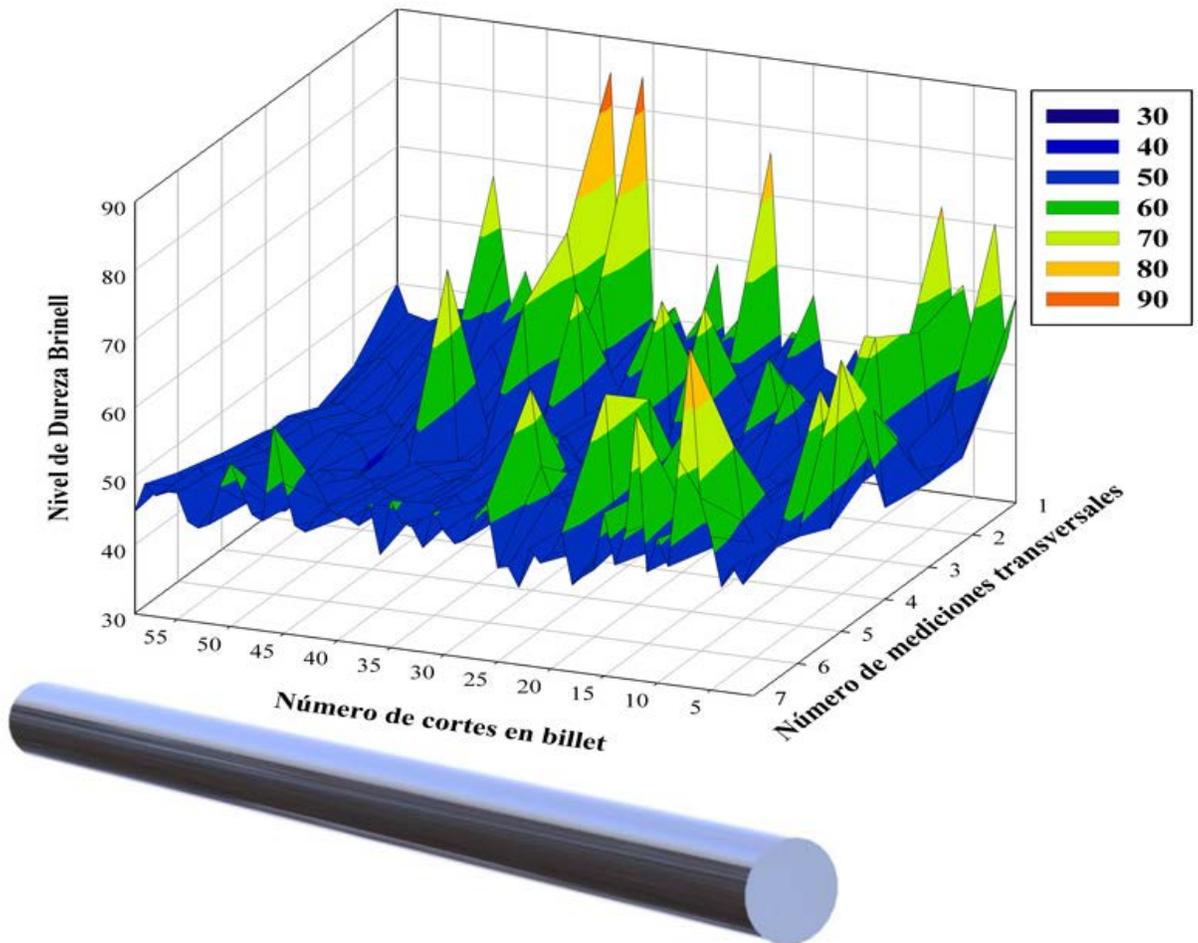
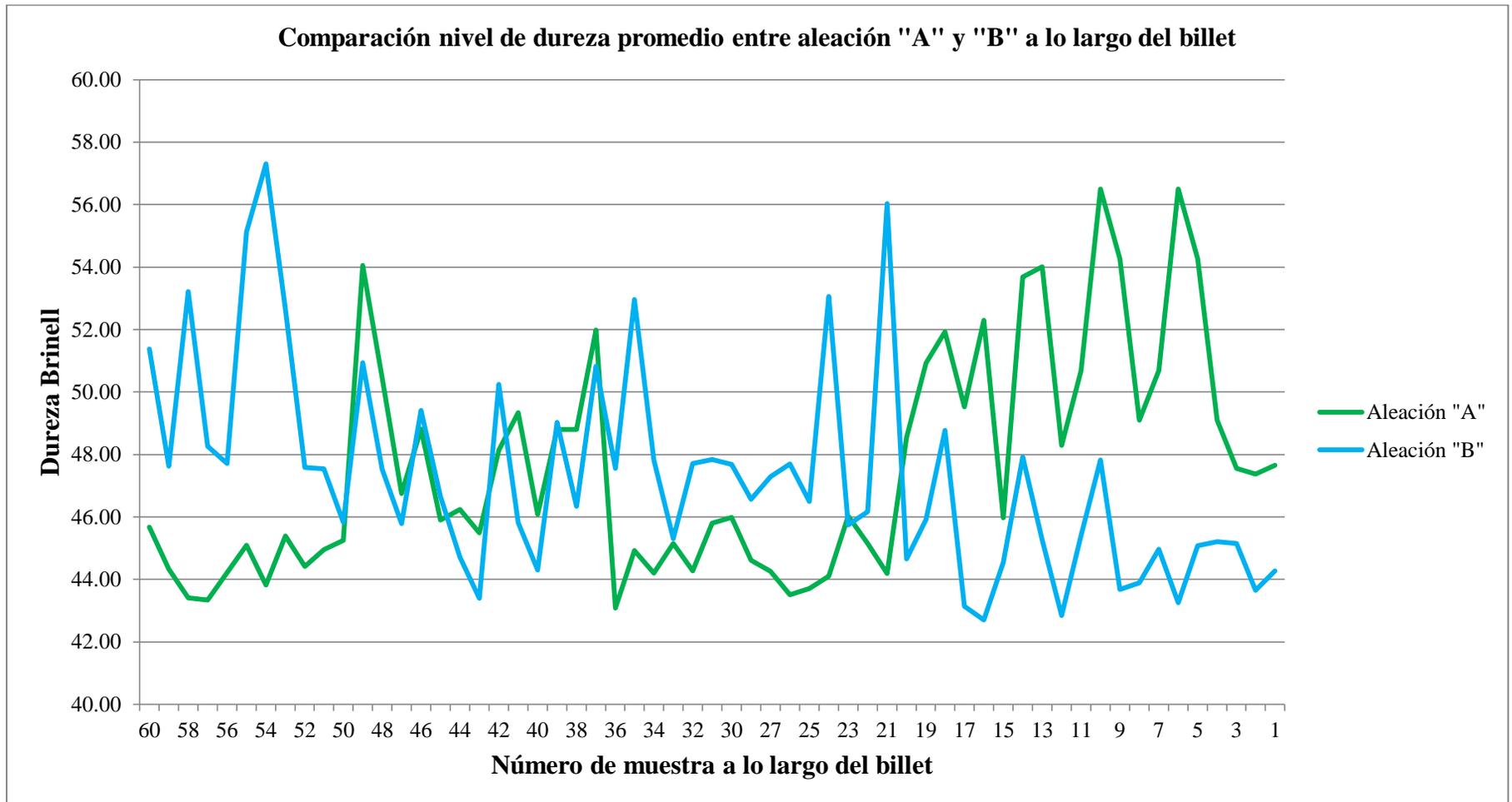


Figura 4.21 Dureza Brinell a lo largo del billet homogenizado de aleación "B".

Fuente: Autor.



**Figura 4.22** Comparación niveles promedio de dureza Brinell de manera longitudinal en billets de aleación "A" y aleación "B".  
**Fuente:** Autor.

#### 4.2.7 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS ENSAYO DE TRACCIÓN

Para el siguiente análisis se debe considerar que este tipo de prueba se aplica por primera vez en la empresa CEDAL S.A para *billets* de aleación 6063 que fueron sometidos al proceso de homogenizado; además no existe registro alguno de estudio “*in-situ*” que haya realizado una prueba de esta naturaleza de *billets* procedentes del proceso de colada continua horizontal.

A partir de las tres probetas extraídas del *billet* de aleación “A”, se registró un límite de fluencia promedio de 66.73 MPa y una resistencia a la tracción promedio de 153 MPa.

**Tabla 4.18** Resumen resultados ensayo de tracción en probetas de billet homogenizado de aleación “A”.  
Fuente: Autor.

CORPORACIÓN ECUATORIANA DEL ALUMINIO					
RESULTADO ENSAYO DE TRACCIÓN					
<b>Departamento:</b>	Fundición	<b>Origen:</b>	As cast		
<b>Proceso:</b>	Colada Continua Horizontal				
<b>Aleación:</b>	6063				
<b>Tratamiento térmico:</b>	Homogenizado				
<b>Número probetas ensayadas:</b>	3		<b>Tipo de aleación:</b>		
<b>Probetas bajo norma técnica:</b>	ASTM B557M		“A”		
Descripción	Resistencia a la tracción	Carga máxima registrada	Límite de fluencia	Carga de fluencia	Elongación en 50 mm
	MPa	kg	MPa	kg	%
N1	153	2450	67.00	1070	36.30
N2	155	2470	67.40	1070	36.50
N3	151	2400	65.80	1050	34.90
<b>Promedio</b>	153	2440	66.73	1063.33	35.90

Con relación a las tres probetas procedentes del billet de aleación “B”, tuvieron un límite de fluencia promedio de 52.70 MPa y resistencia a la tracción promedio de 134 MPa.

**Tabla 4.19** Resumen resultados ensayo de tracción en probetas de billet homogenizado de aleación “B”.

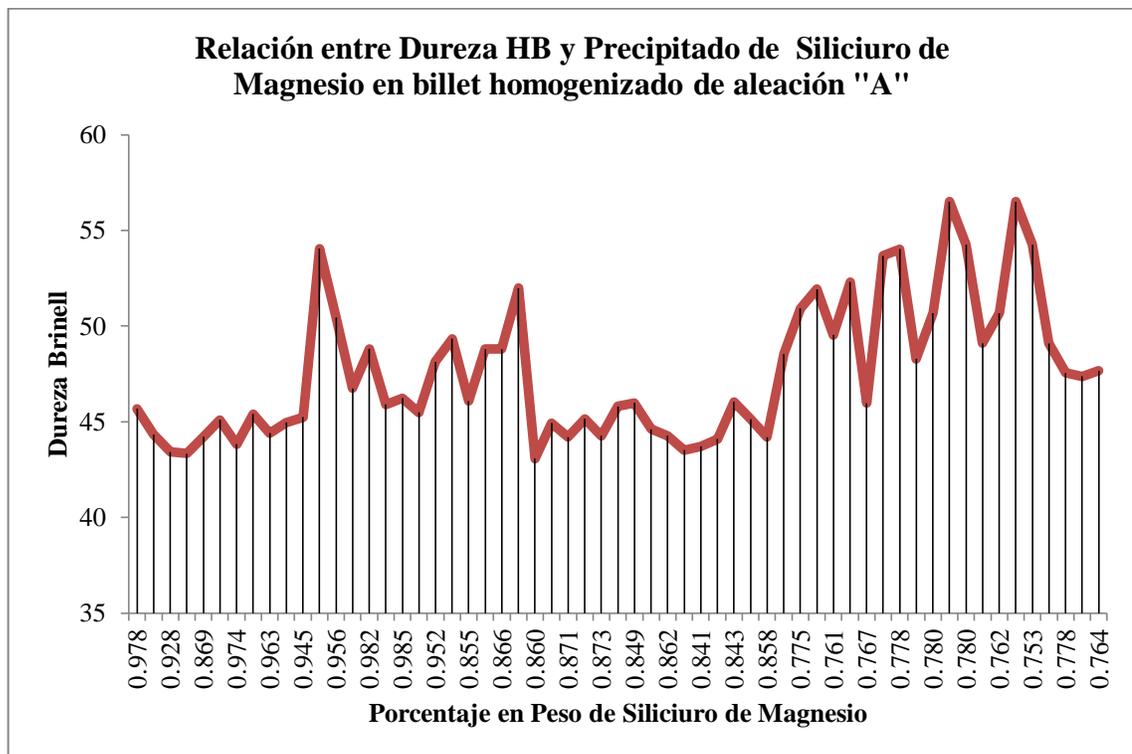
Fuente: Autor.

CORPORACIÓN ECUATORIANA DEL ALUMINIO					
RESULTADO ENSAYO DE TRACCIÓN					
<b>Departamento:</b>	Fundición	<b>Origen:</b>	As cast		
<b>Proceso:</b>	Colada Continua Horizontal				
<b>Aleación:</b>	6063				
<b>Tratamiento térmico:</b>	Homogenizado				
<b>Número probetas ensayadas:</b>		3		<b>Tipo de aleación:</b>	
<b>Probetas bajo norma técnica:</b>		ASTM B557M		“B”	
<b>Descripción</b>	<b>Resistencia a la tracción</b>	<b>Carga máxima registrada</b>	<b>Límite de fluencia</b>	<b>Carga de fluencia</b>	<b>Elongación en 50 mm</b>
	<b>MPa</b>	<b>kg</b>	<b>MPa</b>	<b>kg</b>	<b>%</b>
EXP 1	136	2160	53.90	859	38.50
EXP 2	131	2080	52.00	829	39.50
EXP 3	135	2150	52.20	832	37.90
<b>Promedio</b>	134	2130	52.70	840	38.63

Comparando ambos resultados obtenidos, se puede apreciar que la aleación “B” posee un límite de fluencia promedio menor del 21.03% con respecto a la aleación “A”. De la misma manera se aprecia que la aleación “A” registró una resistencia a la tracción promedio mayor del 12.42% con respecto a la aleación “B”; esto permite suponer una relación directamente proporcional de los niveles de precipitado de  $Mg_2Si$  con respecto a las propiedades mecánicas como es su límite de fluencia y resistencia a la tracción demostrado al comparar ambas aleaciones que la aleación “A” posee un 25.8% mayor de precipitados cuantificados de  $Mg_2Si$  demostrando un 21.03% mayor resistencia a la tracción con respecto a la aleación “B”.

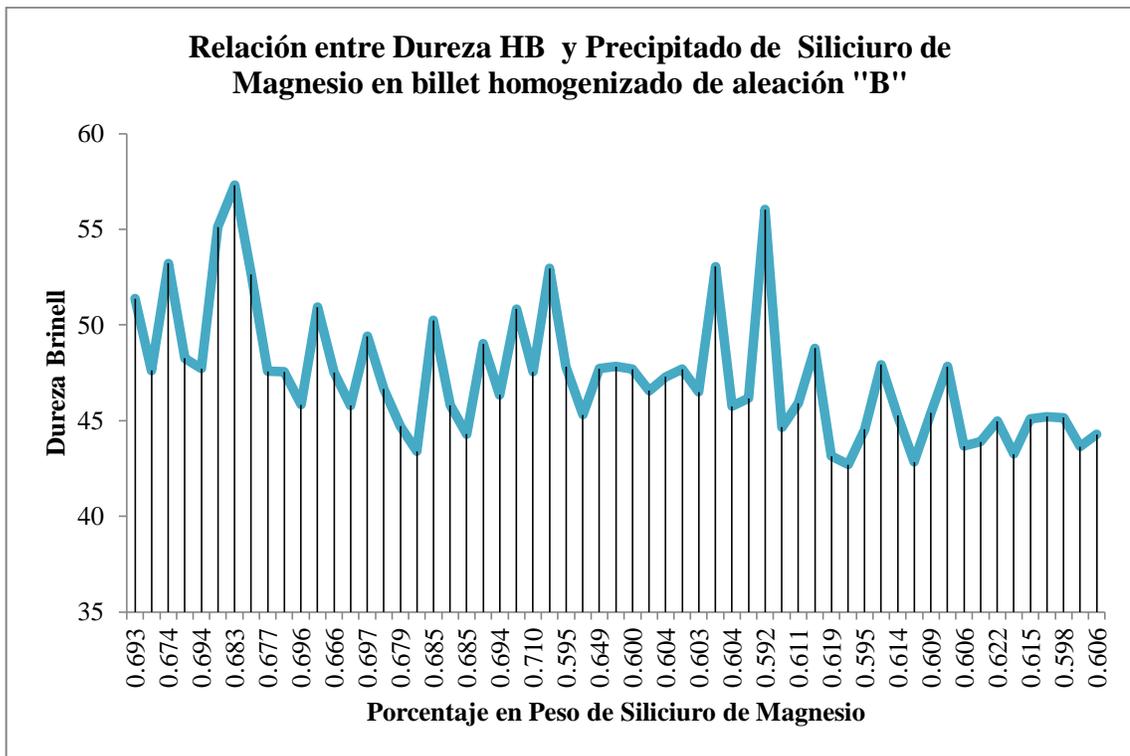
### 4.3 RELACIÓN ENTRE DUREZA BRINELL Y PRECIPITADOS DE SILICIURO DE MAGNESIO

Acerca de la relación entre dureza Brinell y porcentaje en peso de precipitados de siliciuro de magnesio en el *billet* de aleación “A”, se puede distinguir en la siguiente figura que en secciones del *billet*, la dureza es inversamente proporcional al contenido de porcentaje en peso de siliciuro de magnesio; en otras palabras, a menor porcentaje en peso de  $Mg_2Si$  mayor dureza Brinell y a mayor porcentaje en peso de  $Mg_2Si$  menor dureza Brinell.



**Figura 4.23** Relación Dureza Brinell y Porcentaje en peso de  $Mg_2Si$  en billet homogenizado de aleación “A”.  
Fuente: Autor.

Con respecto a la aleación “B”, se muestra los resultados similares en secciones del *billet* con valores indicando una relación inversamente proporcional debido a secciones con niveles altos en porcentaje en peso de  $Mg_2Si$  que registran baja dureza Brinell y en secciones del *billet* con niveles altos en porcentaje en peso de  $Mg_2Si$  demuestra una baja dureza Brinell.



**Figura 4.24** Relación Dureza Brinell y Porcentaje en peso de  $Mg_2Si$  en billet homogenizado de aleación "B".  
**Fuente:** Autor.

Para poder comprender este análisis realizado de este tipo de relación entre los niveles de dureza Brinell y los niveles en porcentaje en peso de Siliciuro de Magnesio registrados en ambos *billets*, es necesario por parte del lector que tenga claro el concepto de dureza, el efecto en aleaciones de la serie 6000 del  $Mg_2Si$  y del efecto directo del proceso de homogenizado en *billets* de aluminio; vale la pena recalcar que ambos *billets* fueron producidos en proceso de colada continua horizontal con equipo de fundición tipo HERTWICH en la empresa CEDAL S.A; además cada empresa maneja su proceso con el "know-how" adquirido durante los años de experiencia y asesoría técnica directa por expertos.

#### **4.4 COMPARACIÓN NIVELES DE DUREZA TRANSVERSAL ENTRE PROCESO COLADA SEMI-CONTINUA VERTICAL Y COLADA CONTINUA HORIZONTAL**

A lo largo del presente trabajo experimental, existió la oportunidad de obtener una muestra aleatoria proveniente de un *billet* homogenizado producido en proceso de colada semi-continua vertical; por razones éticas el nombre de la empresa a la que corresponde esta muestra se mantendrá en reserva.

En las tres muestras aleatorias se procedió a realizar ensayo de dureza Brinell, bajo iguales condiciones así como análisis espectrométrico.

Los resultados y análisis se muestran a continuación respetando su origen y tipo de proceso.

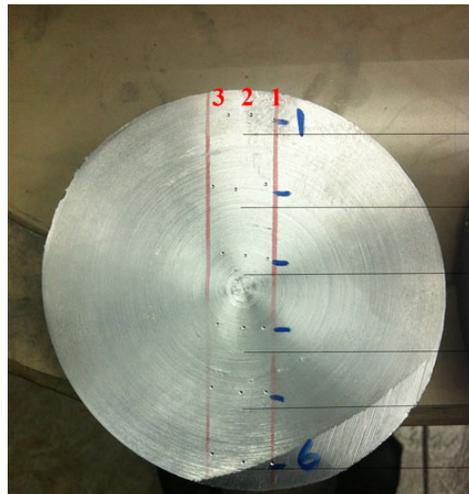
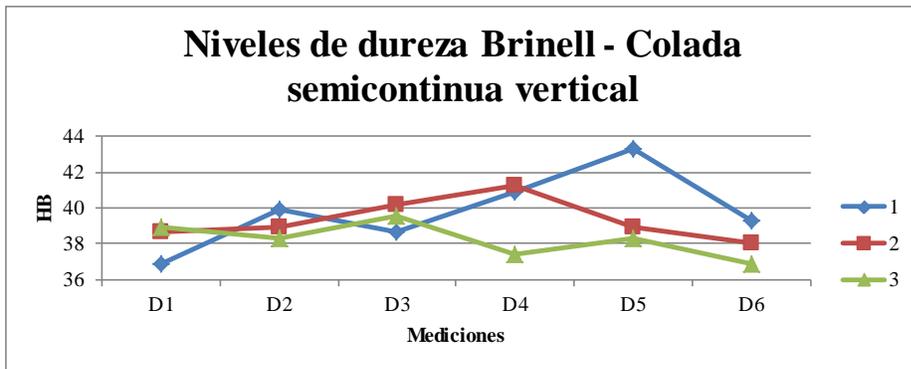
En la siguiente tabla presenta la compilación de las pruebas efectuadas en la muestra aleatoria de un *billet* homogenizado de proceso de colada semi-continua vertical de aleación 6063 con sus niveles de aleantes en porcentaje en peso de: Si a 0.415, Mg a 0.520, Fe a 0.165 y Mn a 0.047; sin embargo la distribución de los niveles de dureza transversales medidos en dieciocho puntos, muestra una fluctuación otorgando al cincuenta por ciento de los valores sobre los 38.948 HB con un máximo promedio de 40.477 HB y el otro cincuenta por ciento de los valores por debajo de 38.948 HB con un mínimo promedio de 37.736 HB, otorgándole una dureza promedio total de 39.098 HB.

Al ser un *billet* proveniente de un proceso que permite una producción por lote más controlada se aprecia sus niveles de dureza transversal de forma heterogénea en los puntos D1, D4, D5 y D6..

**Tabla 4.20** Resultados obtenidos de muestra proveniente de billet homogenizado de proceso de colada semi-continua vertical.

Fuente: Autor

INFORMACIÓN GENERAL:						
ORIGEN:	Colada semi-continua vertical			DIÁMETRO:	6"	
ALEACIÓN:	AA6063					
TRATAMIENTO TÉRMICO:	HOMOGENIZADO					
INFORMACIÓN ENSAYO:						
TIPO ENSAYO:	DUREZA - BRINELL		NORMA:	ASTM-E10-12		
FUERZA APLICADA:	613 N		DIÁMETRO IDENTADOR:	2.5 mm		
TIEMPO APLICACIÓN FUERZA:	10 segundos					
SECCIÓN	D1	D2	D3	D4	D5	D6
1	36.843	39.900	38.638	40.883	43.309	39.262
2	38.638	38.948	40.224	41.218	38.948	38.027
3	38.948	38.331	39.579	37.429	38.331	36.843
MAX	38.948	39.900	40.224	41.218	43.309	39.262
MIN	36.843	38.331	38.638	37.429	38.331	36.843



Colada Semi-continua vertical  
Dureza Promedio

**D1 38.128 HB**

**D2 39.052 HB**

**D3 39.473 HB**

**D4 39.792 HB**

**D5 40.115 HB**

**D6 38.027 HB**

**DUREZA PROMEDIO TOTAL: 39.098 HB**

**MEDIANA: 38.948 HB**

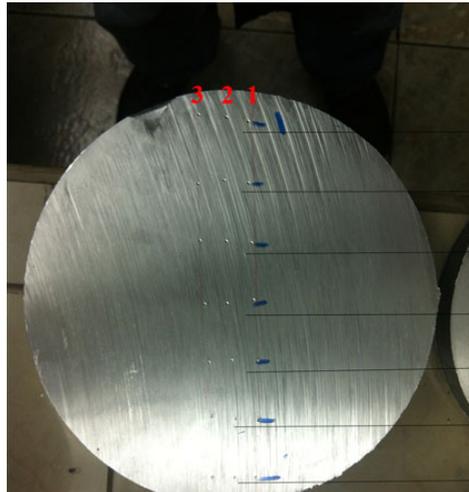
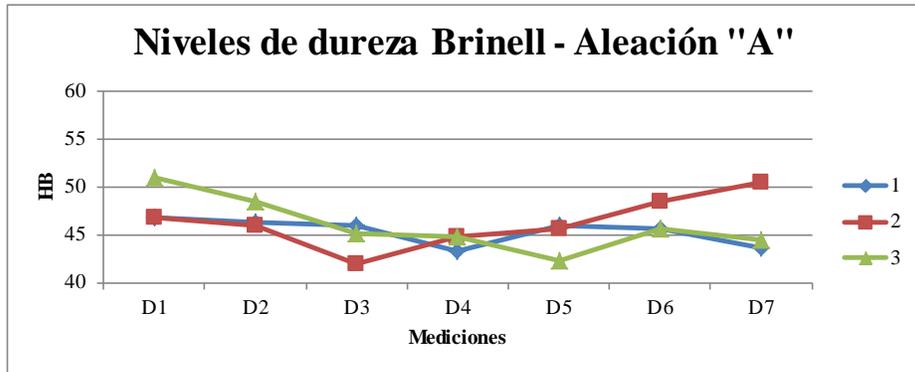
**DESVIACIÓN ESTÁNDAR: 1.552**

Si: 0.415 %  
Mg: 0.520 %  
Fe: 0.165 %  
Mn: 0.047 %

**Tabla 4.21** Resultados obtenidos de muestra proveniente de billet homogenizado de proceso de colada continua horizontal.

Fuente: Autor.

INFORMACIÓN GENERAL:							
ORIGEN:	CEDAL			DIÁMETRO:	7"		
ALEACIÓN:	"A" - AA6063						
TRATAMIENTO TÉRMICO:		HOMOGENIZADO					
INFORMACIÓN ENSAYO:							
TIPO ENSAYO:	DUREZA - BRINELL			NORMA:	ASTM-EI0-12		
FUERZA APLICADA:	613 N			DIÁMETRO IDENTADOR:			2.5 mm
TIEMPO APLICACIÓN FUERZA:				10 segundos			
SECCIÓN	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
1	46.728	46.330	45.937	43.309	45.937	45.548	43.672
2	46.728	45.937	41.900	44.785	45.548	48.367	50.530
3	50.978	48.367	45.164	44.785	42.246	45.548	44.410
MAX	50.978	48.367	45.937	44.785	45.937	48.367	50.530
MIN	46.728	45.937	41.900	43.309	42.246	45.548	43.672



Aleación "A" - HOMOGENIZADO

Dureza Promedio

**D1 43.794 HB**

**D2 45.420 HB**

**D3 43.430 HB**

**D4 43.430 HB**

**D5 42.015 HB**

**D6 41.785 HB**

**D7 45.548 HB**

**DUREZA PROMEDIO TOTAL: 43.632 HB**

**MEDIANA: 44.039 HB**

**DESVIACIÓN ESTÁNDAR: 1.805**

**Si: 0.492 %**

**Mg: 0.550 %**

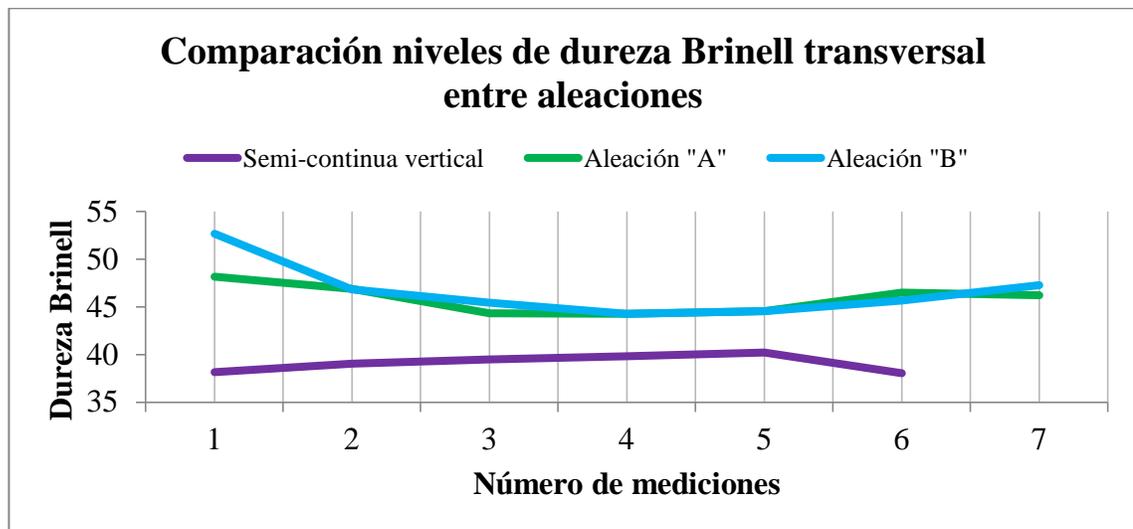
**Fe: 0.176 %**

**Mn: 0.0094%**

Con respecto a la muestra aleatoria del *billet* homogenizado de aleación “A”, en los datos mostrados en la tabla anterior, alcanzó un cincuenta por ciento de los valores sobre los 44.039 HB con un máximo promedio de 47.843 HB y el cincuenta por ciento por debajo de 44.039 HB registrando un mínimo promedio de 44.192 HB. Se registró una dureza promedio total de 43.632 HB; al provenir del proceso de colada continua horizontal, registra niveles de dureza transversales distribuidos de manera más homogénea.

Por último, los datos provenientes de la muestra aleatoria del *billet* homogenizado de aleación “B” se pueden observar en la siguiente tabla, en la cual registró un cincuenta por ciento de los valores sobre los 45.937 HB con un máximo promedio de 48.837 HB y el cincuenta por ciento por debajo de 45.937 HB registrando un mínimo promedio de 44.775 HB con una dureza promedio total de 46.632 HB; esta aleación posee una dureza superior a la aleación “A” en un 6.43% y un 16.16% superior con respecto a la proveniente del proceso de colada semi-continua vertical.

De la misma manera, esta proviene del proceso de colada continua horizontal y registra niveles de dureza transversales heterogénea en el punto D1 y comienza a mostrar una distribución de sus niveles de dureza transversal más homogénea a partir del punto D2 hasta el punto D7.



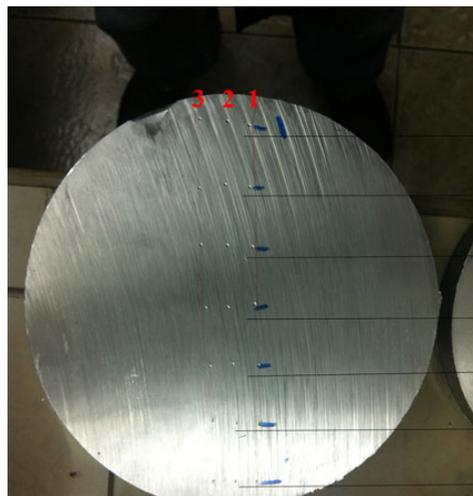
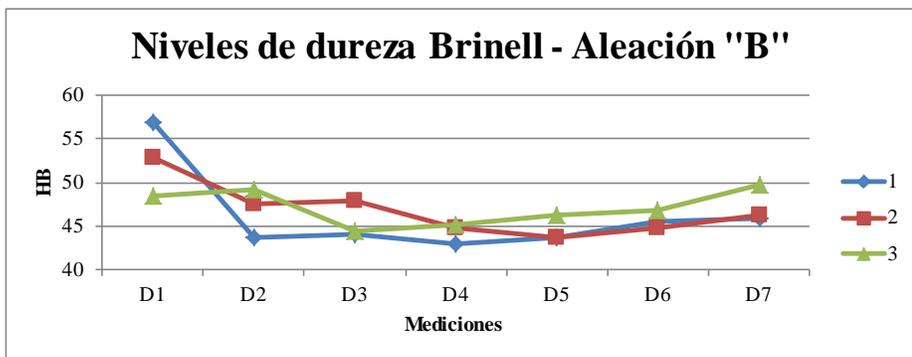
**Figura 4.25** Comparación entre aleaciones con respecto a los niveles de dureza HB medidas transversalmente en muestras aleatorias.

**Fuente:** Autor.

**Tabla 4.22** Resultados obtenidos de muestra proveniente de billet homogenizado de proceso de colada continua horizontal.

Fuente: Autor.

INFORMACIÓN GENERAL:							
ORIGEN:	CEDAL				DIÁMETRO:	7"	
ALEACIÓN:	"B" - AA6063						
TRATAMIENTO TÉRMICO:	HOMOGENIZADO						
INFORMACIÓN ENSAYO:							
TIPO ENSAYO:	DUREZA - BRINELL			NORMA:	ASTM-EI0-12		
FUERZA APLICADA:	613 N			DIÁMETRO IDENTADOR:	2.5 mm		
TIEMPO APLICACIÓN FUERZA:	10 segundos						
SECCIÓN	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
1	56.824	43.672	44.039	42.951	43.672	45.548	45.937
2	52.830	47.538	47.950	44.785	43.672	44.785	46.330
3	48.367	49.216	44.410	45.164	46.330	46.728	49.649
MAX	56.824	49.216	47.950	45.164	46.330	46.728	49.649
MIN	48.367	43.672	44.039	42.951	43.672	44.785	45.937



Aleación "B"- HOMOGENIZADO  
Dureza Promedio

**D1 52.515 HB**

**D2 46.728 HB**

**D3 45.420 HB**

**D4 44.285 HB**

**D5 44.534 HB**

**D6 45.678 HB**

**D7 47.266 HB**

**DUREZA PROMEDIO TOTAL: 46.632 HB**

**MEDIANA: 45.937 HB**

**DESVIACIÓN ESTÁNDAR: 3.28**

**Si: 0.4100 %**

**Mg: 0.3730 %**

**Fe: 0.1690 %**

**Mn: 0.0284%**

#### 4.5 VERIFICACIÓN DE LA HIPÓTESIS

La clave en estadística inferencial es la verificación de la hipótesis a partir de la idea de poder obtener información a partir de muestras obtenidas de una población.

Se debe considerar en un estudio si se conoce la desviación estándar de una población o de un grupo de muestras; para aquellas que se conoce la desviación estándar de una población se aplica la verificación de la hipótesis a partir de la prueba Z, y en el segundo caso cuando se conoce la desviación estándar de un grupo de muestras se aplica la prueba t de student. No obstante, varias teorías sugieren aplicar la prueba t de student cuando se poseen muestras menores a 100 [15]

Para verificar la hipótesis, se aplicará la prueba t de student, porque conocemos la desviación estándar del grupo de muestras obtenidas de los *billets* homogenizados de aleación “A” y “B” y por poseer un número de muestras menor a 100.

La ecuación para la prueba de t de student es la siguiente: [15]

$$t = \frac{\bar{x} - \mu}{S_{\bar{x}}}$$

Ecuación  
4-11

Donde:

t: Valor de la prueba t de student.

$\bar{x}$ : Valor promedio o media de la muestra.

$\mu$ : Valor promedio estimado de la población.

$S_{\bar{x}}$ : Error estándar estimado de la media.

n: Número de muestras.

Para establecer el criterio de aceptación o rechazo de la hipótesis se propone usar el valor promedio mínimo de 0.61 de porcentaje en peso de Mg<sub>2</sub>Si en aleaciones de la serie 6000. [2]

$H_0$ : Hipótesis nula ( $H_0 = \mu \leq 0.61$ )

$H_a$ : Hipótesis alternativa ( $H_a = \mu > 0.61$ )

Se declaran a continuación ambas hipótesis:

- $H_0$ : El análisis cuantitativo en *billets* de aluminio de aleación 6063 producidos en equipo de fundición de colada continua horizontal no posibilitará calcular el porcentaje en peso de los aleantes principales precipitados a lo largo del *billet* para el proceso de extrusión.
- $H_a$ : El análisis cuantitativo en *billets* de aluminio de aleación 6063 producidos en equipo de fundición de colada continua horizontal posibilitará calcular el porcentaje en peso de los aleantes principales precipitados a lo largo del *billet* para el proceso de extrusión.

Se establece un valor “ $\alpha$ ” o p como nivel de confianza de 0.05 y será el análisis en una sola cola dada la condición para la hipótesis alternativa.

El grado de libertad está dado por la siguiente ecuación: [15]

$$gl = n - 1 \quad \text{Ecuación 4-12}$$

El total de muestras efectivas fueron 59 lo cual nos da un total de grados de libertad de 58.

Conocido el valor de p y los grados de libertad podemos ir a tablas t de student de una sola cola y encontrar los valores para t que en este caso es de 1.6716. [15]

Para obtener la media o promedio de cada conjunto muestral estadísticamente se aplica la siguiente ecuación: [15]

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i \quad \text{Ecuación 4-13}$$

Donde

$\bar{x}$ : Valor promedio o media.

n: Número de muestras.

El cálculo de la varianza de la muestra es a partir de la siguiente ecuación: [15]

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (a_i - \bar{x})^2}{n - 1}$$

**Ecuación  
4-14**

Donde:

$S^2$ : Varianza de la muestra.

$\bar{x}$ : Valor promedio o media.

n: Número de muestras.

El error estándar estimado de la media está dado por la siguiente ecuación: [15]

$$S_{\bar{x}} = \frac{\sqrt{S^2}}{n}$$

**Ecuación  
4-15**

Con todos los antecedentes anteriores, podemos fácilmente verificar nuestra hipótesis a partir del análisis cuantitativo realizado anteriormente de los elementos aleantes principales que precipitan y forman Siliciuro de Magnesio a lo largo de los *billets* de aleación normal y experimental.

**Tabla 4.23** Datos para verificación de la hipótesis.

**Fuente:** Autor.

ANÁLISIS HIPÓTESIS		
PRUEBA "t de student"		
<b>Elaborado por:</b>	Hernán Navas Moscoso	
<b>Resultados:</b>	Análisis cuantitativo de billets de aluminio AA6063	
<b>Tratamiento térmico:</b>	Homogenizado	
<b>Numero de muestras:</b>	59	
<b>Descripción:</b>	Porcentaje en peso de Silicio de Magnesio	
MUESTRA	Aleación "A"	Aleación "B"
59	0.978	0.693
58	0.967	0.701
57	0.928	0.674
56	0.945	0.688
55	0.869	0.694
54	0.967	0.680
53	0.974	0.683
52	0.959	0.697
51	0.963	0.677
50	0.940	0.694
49	0.945	0.696
48	0.953	0.675
47	0.956	0.666
46	0.956	0.669
45	0.982	0.697
44	0.966	0.677
43	0.985	0.679
42	0.963	0.675
41	0.952	0.685
40	0.959	0.685
39	0.855	0.685
38	0.871	0.667
37	0.866	0.694
36	0.863	0.697
35	0.860	0.710
34	0.844	0.606
33	0.871	0.595
32	0.879	0.600
31	0.873	0.649
30	0.844	0.589
29	0.849	0.600
28	0.884	0.604
27	0.862	0.604
26	0.858	0.608
25	0.841	0.603
24	0.860	0.590
23	0.843	0.604
22	0.846	0.612
21	0.858	0.592
20	0.841	0.598
19	0.775	0.611
18	0.772	0.614
17	0.761	0.619
16	0.764	0.604
15	0.767	0.595
14	0.765	0.596
13	0.778	0.614
12	0.780	0.609
11	0.780	0.609
10	0.787	0.604
9	0.780	0.606
8	0.770	0.608
7	0.762	0.622
6	0.775	0.606
5	0.753	0.615
4	0.756	0.623
3	0.778	0.598
2	0.784	0.600
1	0.764	0.606
<b>Promedio</b>	<b>0.863</b>	<b>0.640</b>
<b>Desviación estándar</b>	<b>0.078</b>	<b>0.041</b>
<b>Valor prueba "t" de student</b>	<b>25.09</b>	<b>5.58</b>

#### 4.5.1 EVALUACIÓN Y DECISIÓN

Al comparar los resultados obtenidos y comprender que para probar algo se debe encontrar una excepción, de acuerdo a los criterios de aceptación y rechazo establecidos, se evalúa lo siguiente:

- Valor prueba t de student calculada  $>$  valor t de student tablas = Rechaza  $H_0$ .
- Valor prueba t de student calculada  $\leq$  valor t de student tablas = Rechaza  $H_a$ .

El valor obtenido para ambos análisis cuantitativos de los elementos aleantes principales precipitados ( $Mg_2Si$ ) obtenidos durante el presente trabajo experimental, se obtuvo los siguientes valores:

- t de student (aleación "A"):  $25.09 > 1.6716$  t de student tablas.
- t de student (aleación "B"):  $5.58 > 1.6716$  t de student tablas.

En ambos casos se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa que reza de la siguiente manera:

$H_a$ : El análisis cuantitativo en *billets* de aluminio de aleación 6063 producidos en equipo de fundición de colada continua horizontal posibilitará calcular el porcentaje en peso de los aleantes principales precipitados a lo largo del *billet* para el proceso de extrusión.

## CAPÍTULO V

### CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 CONCLUSIONES

- A lo largo del trabajo experimental, se logró mostrar la diferencia al tomar muestras de *casting* y *tundish*; indistintamente del tipo de aleación a ser producida es preferible tomar muestras de *tundish* cuando se precisa equiparar los niveles de aleantes principales.
- A mayor temperatura de moldeo la velocidad de avance de mesa es menor y a menor temperatura de moldeo la velocidad de avance de mesa es mayor, lo que permite determinar la existencia de una relación directa entre temperatura en *tundish* y velocidad de avance de mesa.
- La distribución longitudinal de los niveles de magnesio y silicio en *billets* de AA6063 después del proceso de homogenizado, demostró la variación de estos a lo largo del proceso de moldeo, revelando zonas de fluctuación en los valores de la aleación; otras zonas donde la aleación comienza a estabilizar sus niveles y luego nuevamente muestra zonas donde la aleación presenta puntos de variación permitiendo inferir que su fluctuación a lo largo del *billet* son propios del proceso de colada continua horizontal
- La obtención de la respectiva curva de calentamiento y enfriamiento muestra a lo largo del *billet* una diferencia de temperatura, existiendo puntos que alcanzan una temperatura promedio de 541°C y otros que logran una temperatura de hasta 600°C o superior; por otra parte una zona del *billet* no logra alcanzar la temperatura mínima de homogenizado que es de 510°C, registrando un valor de

458.5 °C correspondiente a la zona dos del horno de homogenizado; todo esto permite concluir que una parte del billet no posee la temperatura adecuada para que la aleación forme una solución homogénea por lo cual sus extremos registran mayor concentración de precipitados y su centro registra una menor concentración de  $Mg_2Si$ .

- Por medio de la cuantificación correspondiente al porcentaje en peso de precipitados de  $Mg_2Si$  en *billets* homogenizados para ambas aleaciones, permite concluir la existencia de una relación inversamente proporcional con respecto a los niveles de dureza Brinell ensayados, es decir, en puntos donde en promedio se registraron mayor porcentaje en peso de  $Mg_2Si$  demostró un menor nivel de dureza Brinell y en lugares con menor porcentaje en peso de  $Mg_2Si$  se registró un mayor nivel de dureza Brinell.
- La relación entre los niveles de precipitación de  $Mg_2Si$  y el límite de resistencia a la tracción en el *billet* de aleación normal con un porcentaje en peso promedio de 0,863 en  $Mg_2Si$ , registró un valor de 153 MPa; con respecto al *billet* con niveles de aleación experimental que mostró un valor promedio de 0,640 de porcentaje en peso de  $Mg_2Si$  alcanzó un valor de 134 MPa como límite de resistencia a la tracción; ultimando que existe una relación directa entre los niveles de precipitados de  $Mg_2Si$  con respecto al límite de fluencia y resistencia a la tracción.
- La cuantificación de los elementos aleantes, permitieron mostrar la distribución longitudinal de estos a lo largo del *billet* de aluminio AA6063 homogenizado, mostrando una buena distribución a pesar de su naturaleza propia como proceso de colada continua horizontal y determina que este equipo a pesar de ser diseñado por HERTWICH para un proceso normal de *remelting*, es posible obtener *billets* de calidad bajo un control de producción estricto utilizando chatarra de aluminio reciclada.

## 5.2 RECOMENDACIONES

- Analizar la posibilidad de aplicar una reducción en la temperatura de aire en el horno de homogenizado e incrementar el tiempo de temperatura de empape para que la temperatura pueda ser mejor distribuida a lo largo de todo el *billet* y así lograr que la aleación pueda formar una solución homogénea a una temperatura promedio de 570 °C.
- Incluir dentro de los controles de aleación, el cuantificar los niveles de silicio de magnesio con el objetivo de alcanzar un promedio mínimo de 0.61 de porcentaje en peso.
- Proponer un estudio espectrométrico cualitativo para conocer la caracterización morfológica de la aleación y la diferencia microestructural en el *billet* de aluminio AA6063.
- Evaluar el costo beneficio a fin de incluir dentro del proceso de selección de chatarra un sistema automático o semiautomático que permita retirar materiales ferrosos que inciden negativamente en los niveles de aleación durante el proceso de producción.
- Se recomienda considerar para el proceso de control de calidad, medir desde cualquier borde del *billet* de 15 a 20 centímetros, y a partir de allí proceder a cortar las respectivas muestras (mortadelas), porque a lo largo de esa longitud se registraron picos de máximos y mínimos que pueden influenciar en una decisión errónea en criterios de aceptación o rechazo en cada lote de producción.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Barrand. P, Gadeau. R, Dumas. A, “Producción del Aluminio”, Enciclopedia del Aluminio, vol. 1. PECHINEY GROUP, España: Ediciones URMO, 2001, pp. 15-22, 29-34, 60-108, 222-229.
- [2] G. Totten, D.S. MacKenzie, Handbook of Aluminum: Physical Metallurgy and Processes, Ed. New York, USA: Marcel Dekker. Inc, 2003, pp. 82-84, 170-185, 881-968.
- [3] Barrand. P, Gadeau. R, Dumas. A, “Metalurgia Estructural del Aluminio”, Enciclopedia del Aluminio, vol. 2. PECHINEY GROUP, España: Ediciones URMO, 2001, pp. 13-30, 39-57, 61-87, 89-94, 95-123.
- [4] HERTWICH ENGINEERING SMS GROUP, “The Universal Caster”. Internet: [www.hertwich.com](http://www.hertwich.com), 2016 [Junio. 14, 2016].
- [5] Ch. Harry, Heat Treater's Guide: Practices and Procedures for Nonferrous Alloys, Ed. Ohio, United States of America: ASM International, 2007, pp. 490-498.
- [6] P. Saha, Aluminum Extrusion Technology, Ed. Ohio, United States of America: ASM International, 2000, pp. 120-147.
- [7] THERMO FISHER SCIENTIFIC, “Analysis of Aluminum Inclusions Using Optical Emission Spectrometry”. Internet: <http://www.azom.com>, 2016 [Junio. 28, 2016].
- [8] R. Sampieri, C. Collado, P. Lucio, Metodología de la Investigación, 5ta, Ed. México D.F, México: McGraw Hill, 2010.
- [9] K. Thanaporn, J.Pearce, M. Ponboon, U. Phongsophitanan, “Quantification of Precipitated Phases in 6063 Aluminium Billet by Image Analysis for Improvement of Homogenization Condition”. National Metal and Materials Technology Center, Bangkok, China. 2008.
- [10] X. Fang, M. Song, K. Li y Y. Du, “Precipitation Sequence of an Aged Al-Mg-Si Alloy”. State Key Laboratory of Powder Metallurgy, Central South University of Changsha, China 2011.

- [11] J. Arsenio Lozano y B. Suárez Peña. “Análisis cuantitativo y caracterización morfológica de la aleación 6063. Diferencias microestructurales y mecánicas entre la superficie y el núcleo de barras cilíndricas de colada semicontinua”. Departamento de Ciencias de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica, Universidad de Oviedo, España 2012.
- [12] F.C Campbell. (2008) Elements of Metallurgy and Engineering Alloy. [On-line]. Available. [www.asminternational.org](http://www.asminternational.org), pp. 487-506. [Feb 22, 2016]
- [13] G. Brady, H. Clauser, J. Vaccari, Materials Handbook, 15 th, Ed. New York, USA: McGraw Hill, 2002, pp. 49-61.
- [14] M.J.G, M.J.G's technical recommendation, private communication. Jan. 2007.
- [15] R. Peck, C. Olsen, J. Devore, Introduction to Statistics and Data Analysis, 4 th, Ed. Boston, USA: Brooks/Cole, 2002, pp. 588-609.

## **ANEXOS**

### **ANEXO A**

#### **GLOSARIO TÉCNICO**

**AA6063:** Las dos primeras letras significan “ALUMINUM ASOCIATION” Alloy 6063 que significa Aleación de Aluminio 6063 según Asociación del Aluminio.

**AS CAST:** Término en Inglés para referirse al producto moldeado tal cual salió de la mesa de moldeo.

**BILLET:** En la industria de aluminio, es un producto procedente del proceso de fundición sea de colada continua horizontal o vertical de forma cilíndrica de tipo redonda u ovalada con diámetros desde 80 mm hasta 230 mm y con una longitud mayor a un metro.

**CABLE TIPO K:** También conocido como “CABLE TERMO PAR”, está compuesto de dos alambres, cada uno posee metales diferentes con un conductor positivo de níquel y cromo; el otro conductor negativo de níquel y aluminio.

**cm:** Símbolo establecido por el Sistema Internacional asignado para referirse a la medida de longitud llamada centímetro.

**HB:** Acrónimo de “HARDNESS BRINELL” lo que significa “DUREZA BRINELL”.

**IN-SITU:** Expresión en Latín que significa “EN SITIO” o “EN EL SITIO” sirve para referirse al lugar donde se realizó o tuvo lugar un estudio, análisis, experimento, entre otros.

**KNOW-HOW:** Expresión en idioma Inglés usada a nivel mundial para referirse al conocimiento adquirido por empresas en lo referente a datos privados y exclusivos desarrollados con respecto a sus procesos, formulación, estándares, entre otros.

**Mg<sub>2</sub>Si:** Representación química del Siliciuro de Magnesio.

**mm:** Símbolo establecido por el Sistema Internacional asignado para referirse a la medida de longitud llamada milímetro.

**MORTADELA:** Expresión utilizada a nivel técnico para referirse a un corte transversal proveniente de billets con forma de disco.

**PCCH:** Acrónimo de Proceso de Colada Continua Horizontal.

**RELACIÓN ESTEQUIOMÉTRICA:** Es la relación molar entre elementos o moléculas para determinar la proporción de dichos elementos que al combinarse químicamente producen un compuesto bajo relaciones fijas.

**RTD:** Significa “Resistance Temperature Detector” lo cual se refiere a un equipo especializado para detección de temperatura por medio de termocuplas o termistores.

**REMELTING:** Expresión técnica de fundición en Inglés que se refiere a volver a fundir material proveniente de varios procesos propios de fábrica.





## ANEXO D

### FORMATO REPORTE ENSAYOS DE ESPECTROMETRÍA

CORPORACION ECUATORIANA DE ALUMINIO S.A  
 FO-FN-06 - Resultado de Análisis de Espectrómetro  
 NORMA TECNICA NTE INEN 2250:2013

#### Resultados Químicos

Número de Muestra:	68FE	Proveedor:	CEDAL
Cliente:	CEDAL	Hora de chispeo:	15H31
Turno:	TERCERO	Fecha de chispeo:	26/08/2016
Inspector de Turno:	J C GOMEZ	Fecha de colada:	26/08/2016
Aleación:	6063	Nombre Colada:	TUNDISH

#### Análisis espectrométrico Foundry-MASTER Grado:

	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr
1	98,6	0,516	0,247	0,0103	0,0139	0,423	0,0108	0,0025
2	98,6	0,522	0,255	0,0113	0,0136	0,430	0,0098	0,0045
Ave	98,6	0,519	0,251	0,0108	0,0137	0,426	0,0103	0,0035

	Ni	Ti	Be	Ca	Li	Pb	Sn	Sr
1	0,0042	0,0126	< 0,0001	0,0011	< 0,0001	< 0,0020	0,0178	< 0,0001
2	0,0091	0,0138	< 0,0001	0,0024	< 0,0001	< 0,0020	0,0232	< 0,0001
Ave	0,0066	0,0132	< 0,0001	0,0018	< 0,0001	< 0,0020	0,0205	< 0,0001

	V	Na	Bi	Zr	B	Ga	Cd	Co
1	0,0094	0,0025	0,0215	< 0,0030	< 0,0005	< 0,0010	0,0068	< 0,0030
2	0,0103	0,0017	0,0195	0,0038	< 0,0005	< 0,0010	0,0036	0,0062
Ave	0,0099	0,0021	0,0205	< 0,0030	< 0,0005	< 0,0010	0,0052	0,0043

	Ag
1	0,0028
2	0,0039
Ave	0,0033

Fecha  
26.08.2016

Inspector de Turno  
J C GOMEZ

Jefe del SIG  
ING.H NAVAS

Corporación Ecuatoriana de Aluminio S.A.  
 Avda. Unidad Nacional  
 Latacunga  
 Tel. : +032 812610 Fax: +032 812620  
 Web: www.cedal.com.ec

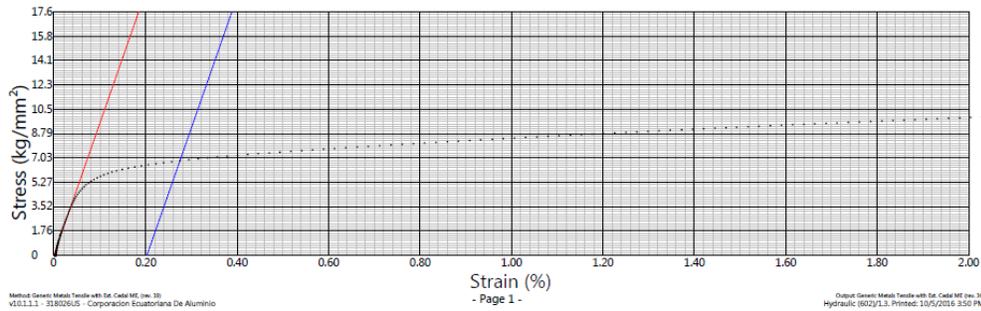
# ANEXO E

## FORMATO REPORTE ENSAYOS DE TRACCIÓN

Method Name: Generic Metals Tensile with Ext. Cedal ME  
 Fecha de ensayo: 10/5/2016 3:40 PM  
 Lote de ensayo: N1  
 Nombre Operador: ROBERTO GARCIA

Temperatura (°C): 25  
 Humedad Relativa (%): 45  
 Numero de Probetas ensayadas: 1  
 Aleación: 6063  
 Temple: NA

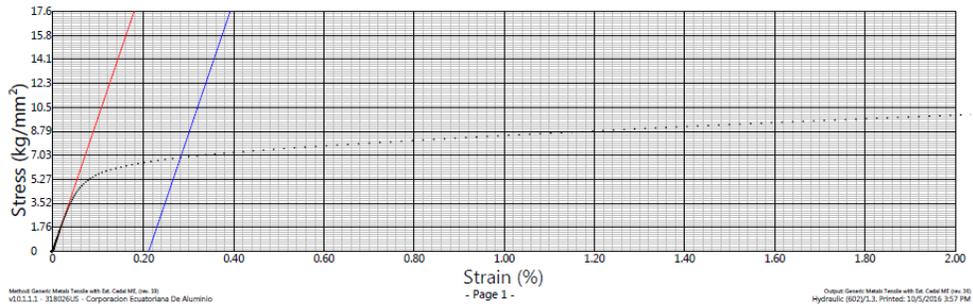
Identificación de la probeta o referencia	Ancho Promedio mm	Espesor Promedio mm	Área Calibrada mm <sup>2</sup>	Carga Máxima registrada kg	Resistencia a la Tracción MPa	Carga de Fluencia kg	Límite de Fluencia MPa	Elongación en 50 mm %
BILLET	12.5	12.5	156	2450	153	1070	67.0	39.3



Method Name: Generic Metals Tensile with Ext. Cedal ME  
 Fecha de ensayo: 10/5/2016 3:53 PM  
 Lote de ensayo: N2  
 Nombre Operador: ROBERTO GARCIA

Temperatura (°C): 25  
 Humedad Relativa (%): 45  
 Numero de Probetas ensayadas: 1  
 Aleación: 6063  
 Temple: T5

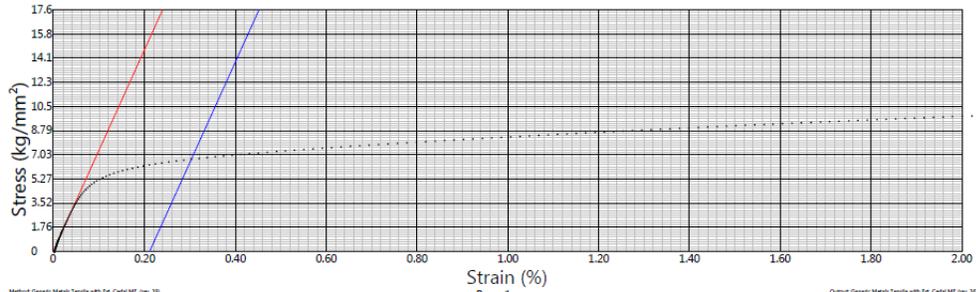
Identificación de la probeta o referencia	Ancho Promedio mm	Espesor Promedio mm	Área Calibrada mm <sup>2</sup>	Carga Máxima registrada kg	Resistencia a la Tracción MPa	Carga de Fluencia kg	Límite de Fluencia MPa	Elongación en 50 mm %
BILLET	12.5	12.5	156	2470	155	1070	67.4	36.5



Method Name: Generic Metals Tensile with Ext. Cedal ME  
 Fecha de ensayo: 10/5/2016 3:34 PM  
 Lote de ensayo: N3  
 Nombre Operador: ROBERTO GARCIA

Temperatura (°C): 25  
 Humedad Relativa (%): 45  
 Numero de Probetas ensayadas: 1  
 Aleación: 6063  
 Temple: NA

Identificación de la probeta o referencia	Ancho Promedio mm	Espesor Promedio mm	Area Calibrada mm <sup>2</sup>	Carga Maxima registrada kg	Resistencia a la Tracción MPa	Carga de Fluencia kg	Limite de Fluencia MPa	Elongación en 50 mm %
BILLET	12.5	12.5	156	2400	151	1050	65.8	34.9



Method: Generic Metals Tensile with Ext. Cedal ME (rev. 30)  
 v1011.1 - 31802605 - Corporacion Ecuatoriana De Aluminio

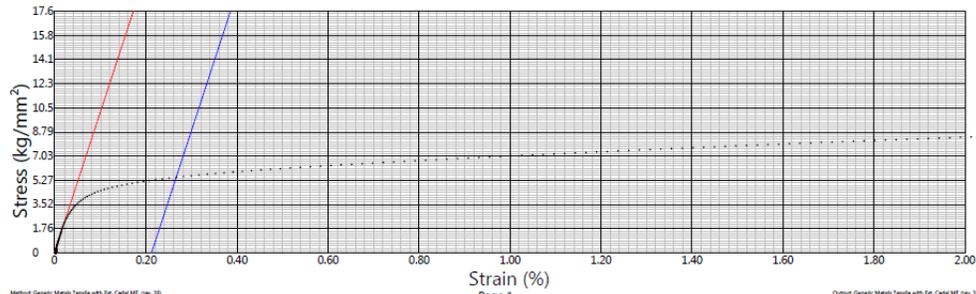
- Page 1 -

Output: Generic Metals Tensile with Ext. Cedal ME (rev. 30)  
 Hydraulic (602)/1.3, Printed: 10/5/2016 3:38 PM

Method Name: Generic Metals Tensile with Ext. Cedal ME  
 Fecha de ensayo: 10/5/2016 4:02 PM  
 Lote de ensayo: EXP1  
 Nombre Operador: ROBERTO GARCIA

Temperatura (°C): 25  
 Humedad Relativa (%): 45  
 Numero de Probetas ensayadas: 1  
 Aleación: 6063  
 Temple: NA

Identificación de la probeta o referencia	Ancho Promedio mm	Espesor Promedio mm	Area Calibrada mm <sup>2</sup>	Carga Maxima registrada kg	Resistencia a la Tracción MPa	Carga de Fluencia kg	Limite de Fluencia MPa	Elongación en 50 mm %
BILLET EXP	12.5	12.5	156	2160	136	869	53.9	38.5



Method: Generic Metals Tensile with Ext. Cedal ME (rev. 30)  
 v1011.1 - 31802605 - Corporacion Ecuatoriana De Aluminio

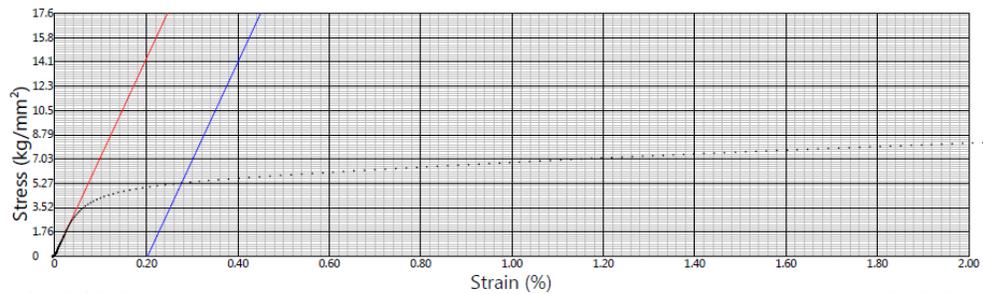
- Page 1 -

Output: Generic Metals Tensile with Ext. Cedal ME (rev. 30)  
 Hydraulic (602)/1.3, Printed: 10/5/2016 4:05 PM

Method Name: Generic Metals Tensile with Ext. Cedral ME  
 Fecha de ensayo: 10/5/2016 4:08 PM  
 Lote de ensayo: EXP2  
 Nombre Operador: ROBERTO GARCIA

Temperatura (°C): 25  
 Humedad Relativa (%): 45  
 Numero de Probetas ensayadas: 1  
 Aleación: 6063  
 Temple: NA

Identificación de la probeta o referencia	Ancho Promedio mm	Espesor Promedio mm	Área Calibrada mm <sup>2</sup>	Carga Máxima registrada kg	Resistencia a la Tracción MPa	Carga de Fluencia kg	Límite de Fluencia MPa	Elongación en 50 mm %
BILLET	12.5	12.5	156	2080	131	829	52.0	39.5



Method Generic Metals Tensile with Ext. Cedral ME (Rev. 30)  
 V01.1.1.1 - 318026US - Corporación Ecuatoriana De Aluminio

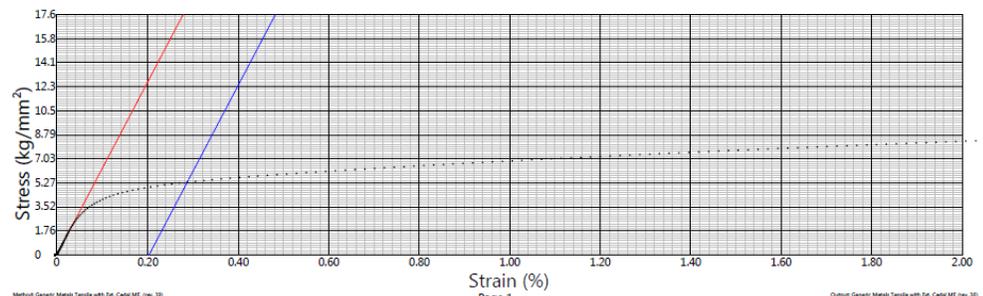
- Page 1 -

Output Generic Metals Tensile with Ext. Cedral ME (Rev. 30)  
 Hydraulic (602)/1.1. Printed: 10/5/2016 4:13 PM

Method Name: Generic Metals Tensile with Ext. Cedral ME  
 Fecha de ensayo: 10/5/2016 4:15 PM  
 Lote de ensayo: EXP 3  
 Nombre Operador: ROBERTO GARCIA

Temperatura (°C): 25  
 Humedad Relativa (%): 45  
 Numero de Probetas ensayadas: 1  
 Aleación: 6063  
 Temple: NA

Identificación de la probeta o referencia	Ancho Promedio mm	Espesor Promedio mm	Área Calibrada mm <sup>2</sup>	Carga Máxima registrada kg	Resistencia a la Tracción MPa	Carga de Fluencia kg	Límite de Fluencia MPa	Elongación en 50 mm %
BILLET	12.5	12.5	156	2150	135	832	52.2	37.9



Method Generic Metals Tensile with Ext. Cedral ME (Rev. 30)  
 V01.1.1.1 - 318026US - Corporación Ecuatoriana De Aluminio

- Page 1 -

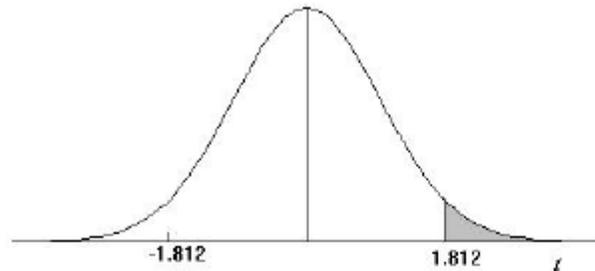
Output Generic Metals Tensile with Ext. Cedral ME (Rev. 30)  
 Hydraulic (602)/1.1. Printed: 10/5/2016 4:18 PM

ANEXO F

TABLA PRUEBA T DE STUDENT

TABLA 2: DISTRIBUCIÓN t DE STUDENT

Puntos de porcentaje de la distribución t



Ejemplo

Para  $\phi = 10$  grados de libertad:

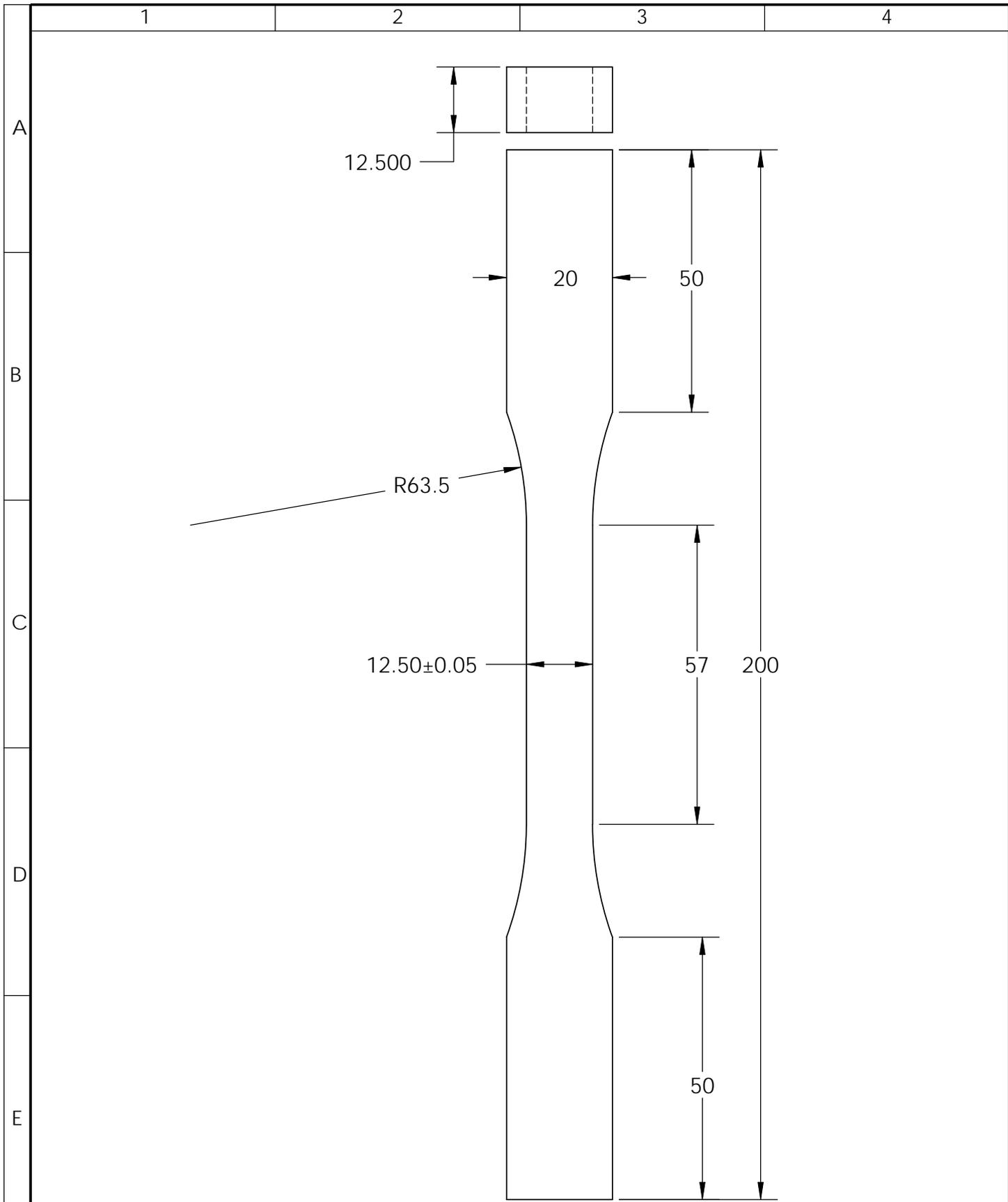
$$P[t > 1.812] = 0.05$$

$$P[t < -1.812] = 0.05$$

$\alpha$ $\Gamma$	0,25	0,2	0,15	0,1	0,05	0,025	0,01	0,005	0,0005
1	1,000	1,376	1,963	3,078	6,314	12,706	31,821	63,656	636,578
2	0,816	1,061	1,386	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925	31,600
3	0,765	0,978	1,250	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841	12,924
4	0,741	0,941	1,190	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	8,610
5	0,727	0,920	1,156	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	6,869
6	0,718	0,906	1,134	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707	5,959
7	0,711	0,896	1,119	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499	5,408
8	0,706	0,889	1,108	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355	5,041
9	0,703	0,883	1,100	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250	4,781
10	0,700	0,879	1,093	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169	4,587
11	0,697	0,876	1,088	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106	4,437
12	0,695	0,873	1,083	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055	4,318
13	0,694	0,870	1,079	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012	4,221
14	0,692	0,868	1,076	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977	4,140
15	0,691	0,866	1,074	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947	4,073
16	0,690	0,865	1,071	1,337	1,746	2,120	2,583	2,921	4,015
17	0,689	0,863	1,069	1,333	1,740	2,110	2,567	2,898	3,965
18	0,688	0,862	1,067	1,330	1,734	2,101	2,552	2,878	3,922
19	0,688	0,861	1,066	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861	3,883
20	0,687	0,860	1,064	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845	3,850
21	0,686	0,859	1,063	1,323	1,721	2,080	2,518	2,831	3,819
22	0,686	0,858	1,061	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819	3,792
23	0,685	0,858	1,060	1,319	1,714	2,069	2,500	2,807	3,768
24	0,685	0,857	1,059	1,318	1,711	2,064	2,492	2,797	3,745
25	0,684	0,856	1,058	1,316	1,708	2,060	2,485	2,787	3,725
26	0,684	0,856	1,058	1,315	1,706	2,056	2,479	2,779	3,707
27	0,684	0,855	1,057	1,314	1,703	2,052	2,473	2,771	3,689
28	0,683	0,855	1,056	1,313	1,701	2,048	2,467	2,763	3,674
29	0,683	0,854	1,055	1,311	1,699	2,045	2,462	2,756	3,660
30	0,683	0,854	1,055	1,310	1,697	2,042	2,457	2,750	3,646
40	0,681	0,851	1,050	1,303	1,684	2,021	2,423	2,704	3,551
60	0,679	0,848	1,045	1,296	1,671	2,000	2,390	2,660	3,460
120	0,677	0,845	1,041	1,289	1,658	1,980	2,358	2,617	3,373
$\infty$	0,674	0,842	1,036	1,282	1,645	1,960	2,326	2,576	3,290

**ANEXO G**

**PLANOS PROBETA BAJO NORMA ASTM-B557M**



NOTA: Todas las dimensiones están en mm.

				TOLERANCIA: ±1	PESO: 113.27 gr	MATERIAL: AA6063	
						TÍTULO: ASTM-B557M-02	ESCALA: 1:1
				DIBUJO: 7/25/2016	H.Navas		
				REVISO: 7/26/2016	Ing. Henry Vaca		
				APROBO: 7/26/2016	Ing. Henry Vaca		
				U.T.A Ing. Mecánica		N.º DE LAMINA HOJA 1 DE 1	REGISTRO:
EDICIÓN:	MODIFICACIÓN:	FECHA:	NOMBRE:			SUSTITUCIÓN:	