



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN
TECNOLÓGICA**

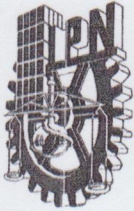
**“Análisis del sistema de colada
semicontinua para aleaciones de aluminio”**

**PARA OBTENER EL GRADO DE:
Doctor en Tecnología Avanzada**

**P R E S E N T A
JOSÉ CLAUDIO CENOBIO MÉNDEZ GARCÍA**

**DIRECTOR DE TESIS
DR. DAVID JARAMILLO VIGUERAS**

MÉXICO, D.F. NOVIEMBRE, 2011



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México siendo las 13:00 horas del día 13 del mes de Mayo del 2011 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CIITEC para examinar la tesis titulada: Análisis del sistema de colada semicontinua para aleaciones de aluminio

Presentada por el alumno:

Méndez García José Claudio Cenobio
Apellido paterno Apellido materno Nombre(s)

Con registro:

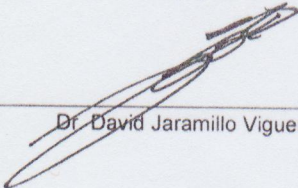
A	0	7	0	9	6	8
---	---	---	---	---	---	---

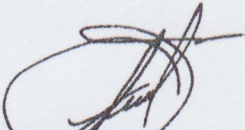
aspirante de: Doctorado en Tecnología Avanzada


Después de intercambiar opiniones, los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

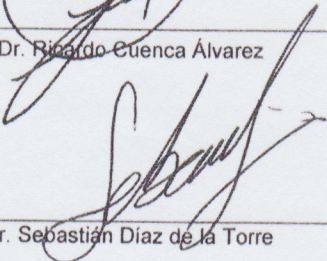
LA COMISIÓN REVISORA

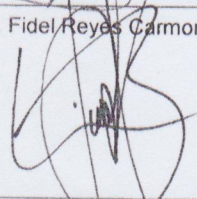
Director(a) de tesis


Dr. David Jaramillo Vigueras

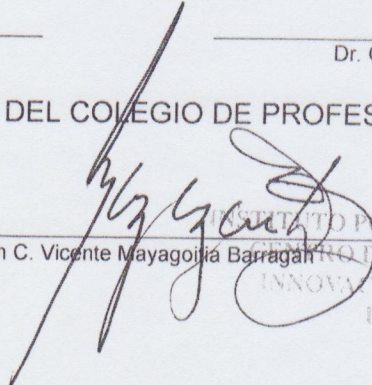

Dr. Ricardo Cuenca Álvarez


Dr. Fidel Reyes Carmona


Dr. Sebastián Díaz de la Torre

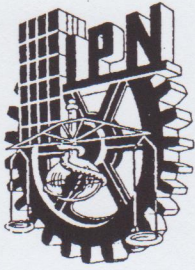

Dr. Gabriel Pascencia Barrera

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES


M. en C. Vicente Mayagoitia Barragán



SEP
INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
CENTRO DE INVESTIGACIÓN E
INNOVACIÓN TECNOLÓGICA
DIRECCIÓN



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México el día 13 del mes de Mayo del año 2011, el (la) que suscribe José Claudio Cenobio Méndez García alumno (a) del Programa de Doctorado en Tecnología Avanzada con número de registro A070968, adscrito a Centro de Investigación e Innovación Tecnológica, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del Dr. David Jaramillo Vigueras y cede los derechos del trabajo intitulado “**Análisis del sistema de colada semicontinua para aleaciones de aluminio**”, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección jcmendez53@yahoo.com.mx. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

José Claudio Cenobio Méndez García

Nombre y firma

ÍNDICE.

Índice general.	i
Lista de figuras.	vi
Lista de tablas.	x
Resumen.	xii
Abstract	xiii

Capítulo 1 La Industria del aluminio.

1.1 Introducción.	1-1
1.2 Tendencias de la producción de aluminio primario.....	1-1
1.2.1 Situación del mercado nacional del aluminio.	1-1
1.3 Antecedentes de la industria Ecko-IMASA.	1-5
1.4 Determinación y ubicación del problema.	1-5
1.5 Hipótesis.....	1-6
1.6 Objetivos.....	1-6
1.6.1 General.....	1-6
1.6.2 Particulares.....	1-6
1.7 Referencias.	1-6

Capítulo 2 Proceso de producción de IMASA.

2.1 Diagrama del proceso.	2-1
2.1.1 Materia prima.	2-2
2.1.2 Fusión y ajuste de aleaciones.....	2-2
2.1.3 Colada semicontinua.....	2-3
2.1.4 Homogenizado.	2-4
2.1.5 Laminado en caliente	2-5
2.1.6 Laminado en frío y corte de tiras.	2-5
2.1.7 Troquelado de discos.....	2-5
2.1.8 Recocido.	2-5
2.2 Problemas técnicos en las diferentes etapas del proceso.....	2-5
2.2.1 Materia prima.	2-6

2.2.2 Horno de fusión.....	2-6
2.2.3 Colada semicontinua.....	2-7
2.2.4 Proceso de homogenizado.....	2-7
2.2.5 Laminado en caliente.....	2-7
2.2.6 Laminado en frío.....	2-8
2.2.7 Corte del rollo en secciones.....	2-8
2.2.8 Troquelado de discos.....	2-8
2.2.9 Recocido de discos.....	2-8
2.3 Áreas de oportunidad.....	2-8
2.4 Referencias.....	2-9

Capítulo 3 Revisión de la literatura.

3.1 Fundición y colada de aluminio.....	3-1
3.1.1 Molde de arena.....	3-1
3.1.2 Molde permanente (por gravedad o a presión).....	3-1
3.1.3 Colada semicontinua.....	3-3
3.2 Características de las aleaciones de aluminio.....	3-3
3.3 Transferencia de calor.....	3-3
3.3.1 Transferencia de calor por convección.....	3-4
3.3.2 Los números adimensionales.....	3-6
3.3.2.1 El número de Nusselt (Nu).....	3-6
3.3.2.2 El número de Reynolds (Re).....	3-7
3.3.2.3 El numero de Prandtl (Pt).....	3-8
3.4. Estudios experimentales en la colada semicontinua de aleaciones de aluminio.....	3-8
3.4.1 Método de limpieza para eliminar defectos en la fundición de aluminio.....	3-8
3.4.2 tipos de agua en la transferencia de calor por colada semicontinua.....	3-9
3.4.3 Transferencia de calor entre el molde y el metal, durante la solidificación.....	3-9
3.4.4 Efectos del calentamiento y transferencia de calor del agua.....	3-10
3.4.5 Modelado de lingotes en colada semicontinua de aleaciones de aluminio.....	3-11
3.4.6 Nueva generación de equipos para colada semicontinua de aleaciones de aluminio.....	3-11
3.4.7 Aplicación de la simulación numérica en la colada semicontinua.....	3-14

3.5 Simulación numérica y el método del elemento finito.....	3-14
3.5.1 Simulación numérica.....	3-14
3.5.2 Método del elemento finito.....	3-15
3.6 Referencias.	3-17

Capítulo 4 Planeación de Experimentos.

4.1 Metodología general.....	4-1
4.2 Experimentos en planta.....	4-2
4.3 Experimentos en Laboratorio.	4-2
4.4 Metodología de simulación numérica.....	4-2

Capítulo 5 Experimentación en planta.

5.1 Estabilidad térmica en el molde de colada semicontinua.	5-1
5.2 Curvas de solidificación y sistema de enfriamiento.	5-4
5.3 Análisis y resultados de la prueba de estabilidad térmica.	5-5
5.4 Análisis y resultados de la determinación de las curvas de solidificación.	5-10
5.5 Resultados experimentales en otra máquina de colada semicontinua.....	5-12
5.6 Medición de temperatura del agua empleada durante el enfriamiento de los lingotes de aluminio.	5-17
5.7 Interpretación del análisis térmico.....	5-20
5.8 Calor removido por el agua de enfriamiento.	5-20
5.9 Balance de energía entre el calor removido por el agua de enfriamiento y el generado por el lingote.	5-21
5.10 Resumen de la experimentación en planta.....	5-22
5.11 Referencias.	5-22

Capítulo 6 Pruebas de laboratorio.

6.1 Construcción de una máquina de colada semicontinua.	6-1
6.2 Pruebas de colada continua en laboratorio.....	6-2
6.3 Medición de temperatura del agua de enfriamiento.....	6-7
6.4 Pruebas de perfil de solidificación del sistema de enfriamiento.	6-9
6.5 Valoración estructural.....	6-11
6.5.1 Macroataque.	6-11
6.5.2 Microataque.	6-12

6.6 Determinación de propiedades mecánicas.....	6-12
6.6.1 Perfiles de dureza.....	6-12
6.6.2 Pruebas de tensión.....	6-15
6.6.3 Resumen de las pruebas de laboratorio.....	6-20
6.7 Referencias.....	6-20

Capítulo 7 Simulación Numérica.

7.1 Generalidades.....	7-1
7.2 Aspectos matemáticos a considerar para la definición del sistema.....	7-2
7.3 Determinación de la geometría.....	7-3
7.4 Generación del mallado.....	7-4
7.5. Establecimiento de condiciones de frontera (ECF).....	7-7
7.6. Simulación numérica con condiciones de IMASA.....	7-13
7.7 Simulación numérica con condiciones impuestas.....	7-19
7.7.1. Efecto del cambio de coeficiente de transferencia de calor (h).....	7-19
7.7.2. Efecto del cambio de altura de los moldes.....	7-21
7.8. Análisis y comparación.....	7-25
7.9 Referencias.....	7-25

Capítulo 8 Discusión general.

8.1 Problemática del proceso en estudio.....	8-1
8.2 Experimentos en planta.....	8-1
8.3 Experimentos en laboratorio.....	8-2
8.4 Simulación numérica.....	8-2
8.5 Impacto en la industria del aluminio.....	8-3
8.6 Conclusión.....	8-3

Apéndices.

Apéndice 1.....	A-1
Apéndice 2.....	A-2
Apéndice 3.....	A-3

Apéndice 4.....	A-5
Apéndice 5.....	A-7
Apéndice 6.....	A-11
Apéndice 7.....	A-12
Apéndice 8.....	A-13
Apéndice 9.....	A-17
Apéndice 10.....	A-18
Apéndice 11.....	A-22
Apéndice 12.....	A-23

LISTA DE FIGURAS.

Capítulo 1.

Figura 1.1 Producción mundial de aluminio.....	1-2
Figura 1.2 Países productores de aluminio.....	1-3
Figura 1.3 Tendencia de la manufactura de productos de aluminio en México.	1-4
Figura 1.4 Producción total de envases de aluminio en millones de piezas.	1-4

Capítulo 2.

Figura 2.1 Diagrama de producción de discos de aluminio para fabricar utensilios de cocina.	2-1
Figura 2.2 Tratamiento de metal líquido.....	2-3

Capítulo 3.

Figura 3.1 Fundición de una pieza de aluminio en un molde de arena.	3-2
Figura 3.2 Transferencia de calor entre el molde y el material fundido.....	3-10
Figura 3.3 Esquema de uno de los primeros sistemas de colada semicontinua.....	3-11
Figura 3.4 Molde compacto para colada semicontinua.	3-12
Figura 3.5 Esquema de las cabeceras de la máquina de colada semicontinua.....	3-12
Figura 3.6 Parte inferior de la cara ajustable de la máquina de colada semicontinua.	3-13
Figura 3.7 Molde para lingotes de aluminio con seis entradas de agua y cuatro calibradores de presión.	3-13
Figura 3.8 Diagrama de pasos de la simulación numérica.....	3-15
Figura 3.9 Tipos de elementos para (a) una, (b) dos y (c) tres dimensiones (se incluyen líneas y planos nodales).	3-16

Capítulo 4.

Figura 4.1 Metodología utilizada para analizar el proceso de solidificación durante la colada semicontinua de aleaciones de aluminio.....	4-1
Figura 4.2 Metodología utilizada para realizar pruebas en planta.....	4-3
Figura 4.3 Metodología utilizada para realizar pruebas en laboratorio.....	4-3
Figura 4.4 Metodología utilizada para realizar las simulaciones de colada semicontinua.	4-4

Capítulo 5.

Figura 5.1 Distribución de los termopares en la superficie del molde.	5-2
Figura 5.2 Colocación de los termopares en la prueba # 1.	5-2

Figura 5.3 Esquema del arreglo experimental usado.	5-3
Figura 5.4. Instalación de los termopares, sistema de adquisición de datos y computadora.	5-3
Figura 5.5 Experimento número 2 (A) esquema de ubicación de los termopares en el lingote, (B) arreglo de la colocación de los termopares en planta.	5-5
Figura 5.6 Temperaturas en la superficie del lingote medidas durante la prueba #1	5-6
Figura 5-7 Amplificación de la lectura del experimento # 1 mostrando la variación de temperaturas en la superficie del lingote durante la colada semicontinua	5-7
Figura 5.8 Gráfico de lecturas generadas por los termopares I-C 3, I-C 2, I-C 1 y D-C 2.....	5-8
Figura 5.9 Gráfico de lecturas generadas por los termopares I-I 1, I-C 1 e I-S 1.	5-9
Figura 5.10 Gráfico de lecturas generadas por los termopares I - I 2, I-I 1 y I-S 1.	5-10
Figura 5.11 Curvas de enfriamiento a lo largo de un lingote de aluminio.....	5-11
Figura 5.12 Valores de enfriamiento por pares de termopares (A, B, C, D y E).....	5-13
Figura 5.13 Posición de los termopares en la superficie del molde de la planta Ecko (experimento # 1).....	5-14
Figura 5.14 Temperaturas de lingote medidas durante el experimento # 1 en la planta Ecko.	5-14
Figura 5.15 Colocación de los termopares en el lingote.....	5-15
Figura 5.16 Curvas de enfriamiento durante la solidificación de un lingote en el experimento # 2.	5-15
Figura 5.17 Condiciones de enfriamiento en el sistema de colada semicontinua de Ecko.	5-16
Figura 5.18 Acabado superficial de los lingotes procesados, generados en los experimentos llevados a cabo en IMASA y Ecko.	5-17
Figura 5.19 Temperatura del agua de enfriamiento al fondo de la fosa y a la altura del nivel del agua, para las pruebas # 1 y # 2 respectivamente.	5-18
Figura 5.20 Promedio de temperatura del agua de enfriamiento para las pruebas # 1 y # 2 respectivamente.	5-19

Capítulo 6.

Figura 6.1 Esquema de máquina de colada semicontinua en laboratorio.	6-1
Figura 6.2 Arreglo del equipo empleado en laboratorio.	6-2
Figura 6.3 Molde para la maquina de colada semicontinua: (A) Molde montado en la maquina; (B) Vista lateral del molde y (C) Vista superior del molde.....	6-3
Figura 6.4 Arreglo de la máquina de colada semicontinua que muestra el equipo de control del sistema de enfriamiento.	6-4
Figura 6.5 Vista superior del sistema de enfriamiento secundario de la máquina de colada semicontinua.	6-5

Figura 6.6 Vaciado de aluminio en la máquina de laboratorio.....	6-6
Figura 6.7 Asignación de muestras a partir del lingote para las diferentes pruebas	6-6
Figura 6.8 lingotes cortados longitudinalmente.....	6-7
Figura 6.9 Trayectoria del flujo de agua en el sistema primario.	6-8
Figura 6.10 (A) Movimiento del termopar por el flujo del agua; (B) Colocación del termopar en la salida del sistema de enfriamiento.	6-8
Figura 6.11 Gráfica de temperatura de agua de enfriamiento en la muestra 8.	6-9
Figura 6.12 Curva de enfriamiento durante la formación del lingote (muestra 1).....	6-10
Figura 6.13 Macroestructura del corte longitudinal de los nueve lingotes.	6-11
Figura 6.14 Fotografía del microataque del primer lingote.	6-13
Figura 6.15 Vista de la sección de las barras con las marcas en las zonas donde se realizaron las indentaciones.	6-13
Figura 6.16 Durómetro Vickers Mitutoyo, AVK C-2.....	6-14
Figura 6.17 Mapa de durezas en escala Vickers (HV), para la muestra 5.	6-15
Figura 6.18 Dimensiones de probeta conforme a norma ASTM.....	6-15
Figura 6.19 Foto de las secciones maquinadas para realizar ensayos de tracción.	6-16
Figura 6.20 Máquina de ensayos universales, marca SHIMATZU, modelo SLFL-100 kN.....	6-17
Figura 6.21 Curvas esfuerzo-deformación para la barra 3.	6-17
Figura 6.22 Grafica de esfuerzos máximos en Mpa y exponente de endurecimiento para cada una de las barras de ensayos de tensión.	6-18
Figura 6.23 Esfuerzos máximos de tensión contra flujos de agua.	6-19
Figura 6.24 Esfuerzos máximos de tensión contra velocidad de colada.....	6-19
 Capítulo 7.	
Figura 7.1 Proceso de colada semicontinua actual en IMASA.	7-2
Figura 7.2 Figura geométrica a escala en el programa.	7-4
Figura 7.3 Esquema y mallado de un lingote por simulación numérica a) geometría del lingote; b) lingote mallado.	7-6
Figura 7.4 Geometría de un lingote con condiciones de frontera.	7-10
Figura 7.5 Temperaturas generadas y vectores de flujo de calor durante la simulación.	7-15
Figura 7.6 Isotermas en la región del molde de colada, mostrando que la solidificación se presenta en el molde.....	7-16
Figura 7.7 Distribución de extracción de calor en las diferentes secciones del lingote.....	7-17

Figura 7.8 Efecto de simulación del incremento del coeficiente de transferencia de calor sobre el enfriamiento del lingote.	7-19
Figura 7.9 Efecto de la simulación del tamaño de molde de 10 cm en el sistema de enfriamiento.....	7-22
Figura 7.10 Efecto de la simulación del tamaño del molde de 30 cm en el sistema de enfriamiento	7-23
Figura 7.11 Efecto de la simulación del tamaño del molde de 40 cm en el sistema de enfriamiento	7-24

LISTA DE TABLAS.

Capítulo 1.

Capítulo 2.

Tabla 2.1 Porcentaje de carga a hornos de fundición.	2-2
Tabla 2.2 Parámetros de vaciado.	2-4

Capítulo 3.

Tabla 3.1 Principales elementos en la clasificación internacional de aleaciones del aluminio.	3-4
--	-----

Capítulo 4.

Capítulo 5.

Tabla 5.1 Rapidez de extracción de calor.	5-12
Tabla 5.2 Dimensiones de los lingotes producidos en el experimento.	5-18
Tabla 5.3 Propiedades termo físicas del agua y del aluminio empleados en el experimento.	5-19
Tabla 5.4 Flujos volumétricos.	5-20
Tabla 5.5 Dimensiones de los lingotes experimentados.	5-20
Tabla 5.6 Calor removido por el agua de enfriamiento.	5-21
Tabla 5.7 Calor liberado por el lingote durante la solidificación.	5-21
Tabla 5.8 Relación de energía.	5-22

Capítulo 6.

Tabla 6.1 Pruebas realizadas en la maquina de colada semicontinua de laboratorio.	6-5
Tabla 6.2 Resultados obtenidos durante la experimentación en laboratorio.	6-10
Tabla 6.3 Dimensiones de los especímenes maquinados según la norma ASTM E 8E / 8M - 08.	6-16
Tabla 6.4 Resultados de los ensayos de tensión de las barras de aluminio.	6-18

Capítulo 7.

Tabla 7.1 Mallado de la simetría del lingote.	7-7
Tabla 7.2 Valores necesarios para la estimación del coeficiente de transferencia de calor.	7-7
Tabla 7.3 Parámetros de operación y propiedades termo físicas utilizadas para la simulación numérica.	7-8
Tabla 7.4 Propiedades del aluminio.	7-9
Tabla 7.5 Condiciones de frontera de lingote por simulación.	7-11

Tabla 7.6 Condiciones de frontera para transferencia general de calor.....	7-12
Tabla 7.7 Configuración de los subdominios.	7-13
Tabla 7.8 Parámetros de operación y propiedades termo físicas utilizadas para la simulación numérica.....	7-14
Tabla 7.9 Condiciones de frontera, calor liberado y porcentaje representativo, en la simulación numérica.....	7-18
Tabla 7.10 Calor extraído a los lingotes, sometidos a diferentes regímenes de enfriamiento.....	7-20
Tabla 7.11 Simulación numérica con dimensiones de molde variadas.	7-21

Resumen

En las últimas décadas, la colada semicontinua ha mantenido una posición prominente en el procesamiento de aleaciones de aluminio comerciales especialmente en la producción de lingotes. Es por ello que la industria nacional requiere desarrollar investigaciones que propongan soluciones técnicas viables que mejoren la productividad y su competitividad, razón por la cual parte de este estudio se llevó a cabo en instalaciones de la compañía ECKO- IMASA.

Durante la investigación se realizó el análisis del sistema de colada semicontinua para aleaciones de aluminio y se efectuó a través de tres etapas. En la primera se realizaron pruebas en planta, en la segunda se reprodujo el sistema de colada semicontinua a escala de laboratorio y en la tercera se simuló el sistema mediante un modelo matemático.

En primera instancia, con base en las pruebas realizadas en planta se determinó la estabilidad térmica del aluminio al ser vaciado al molde, así como el perfil de solidificación durante el conformado del lingote. También se llevo un record de la temperatura del agua de enfriamiento y con la información generada se calculó la transferencia de calor del material solidificando al entrar en contacto con el sistema de enfriamiento.

Asimismo, en el análisis del sistema de colada semicontinua a escala de laboratorio se determinó la transferencia de calor de los lingotes al sistema de enfriamiento.

En la simulación del sistema, se confirmaron los resultados de las dos etapas anteriores. Además, se impusieron condiciones diferentes de operación con la finalidad de establecer mejoras en el proceso. Finalmente, se detectó que si se reducen las dimensiones de los moldes, se reduce el consumo de agua de enfriamiento sustancialmente, en el proceso de colada semicontinua del aluminio.

Abstract

In recent decades, the direct chill casting has remained semi-prominent position in the processing of commercial aluminum alloys, especially in the production of ingots. Therefore the research required to develop national industry to propose viable technical solutions that improve productivity and competitiveness, which is why part of this study was conducted at company facilities, IMASA ECKO.

During the investigation it carried out the analysis of direct chill casting system for aluminum alloys and is carried out through three stages. The first tests were conducted on the ground in the second reproduced the DC-casting system at laboratory scale and the third system was simulated using a mathematical model.

In the first instance, based on tests conducted on the ground determined the thermal stability of aluminum to be poured into the mold and solidification profile during forming of the ingot. It also took a record of the cooling water temperature and the information generated is calculated heat transfer from the solidifying material in contact with the cooling system.

Also in the DC-casting laboratory scale determined heat transfer of bullion to the cooling system.

In the simulation system, confirmed the results of the two previous stages. In addition, different operating conditions imposed in order to establish process improvements. Finally, it was found that reducing the dimensions of the mold reduces the cooling water consumption substantially in the semi-casting process of aluminum.

Capítulo 1 La Industria del Aluminio.

1.1 Introducción.

En las actividades industriales, la construcción es el principal mercado del aluminio mientras que el transporte representa el segundo; ya que en los automóviles, el aluminio aparece en interiores y exteriores como molduras, parrillas, rines, sistemas de aire acondicionado, transmisiones automáticas, radiadores, partes de motor y paneles de carrocería; para transporte pesado en ruedas para camiones, en contenedores de carga y señales de carretera, tales como división de carriles, de alumbrado y en algunas partes de la construcción de trenes. En la industria aeroespacial, el aluminio también se utiliza en motores, estructuras, cubiertas y trenes de aterrizaje e interiores, entre otras aplicaciones [1]. En el hogar, la combinación de baja densidad, resistencia mecánica y a la corrosión, aunado a una buena apariencia, ha permitido el uso del aluminio en estructuras decorativas, muebles y utensilios varios, muchos de ellos precisamente para la cocina.

1.2 Tendencias de la producción de aluminio primario.

Desde la década de los cincuentas hasta el año 2000 (figura 1.1), la producción mundial de aluminio primario tuvo un incremento sostenido [1-3]. Con el desarrollo de otros materiales y a la contracción de los mercados, en la primera década del 2000, ésta producción se vio estancada. En la Figura 1.2 se puede apreciar cómo fue distribuida dicha producción, conservando China la hegemonía.

1.2.1 Situación del mercado nacional del aluminio.

En el caso de México, en el periodo 2003 al 2006 (figura 1.3), la manufactura de productos de aluminio incrementó, y a partir del 2007 se mantuvo constante a causa de la contracción económica y a los altos costos de producción [4].

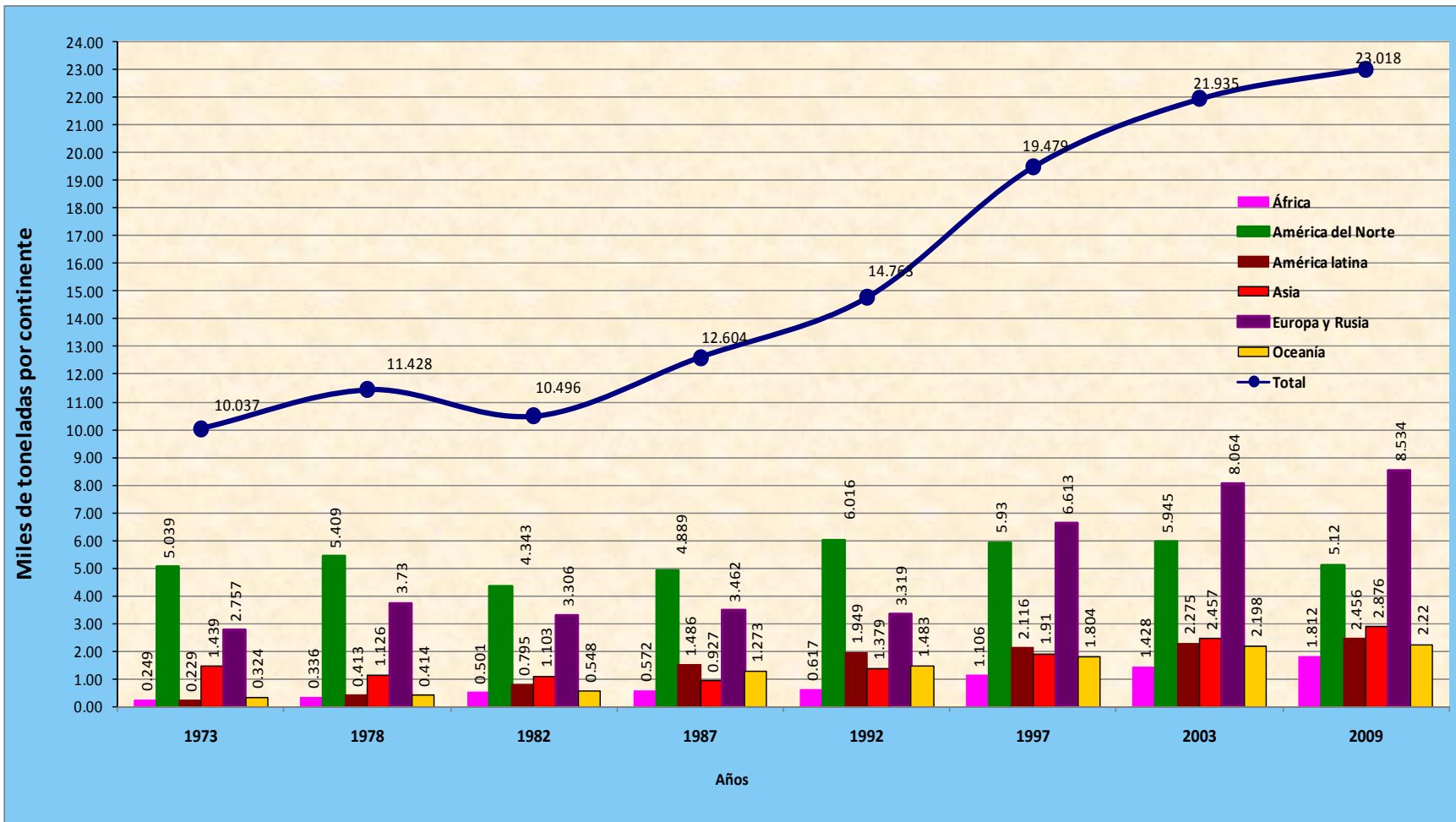


Figura 1.1 Producción mundial de aluminio [2].

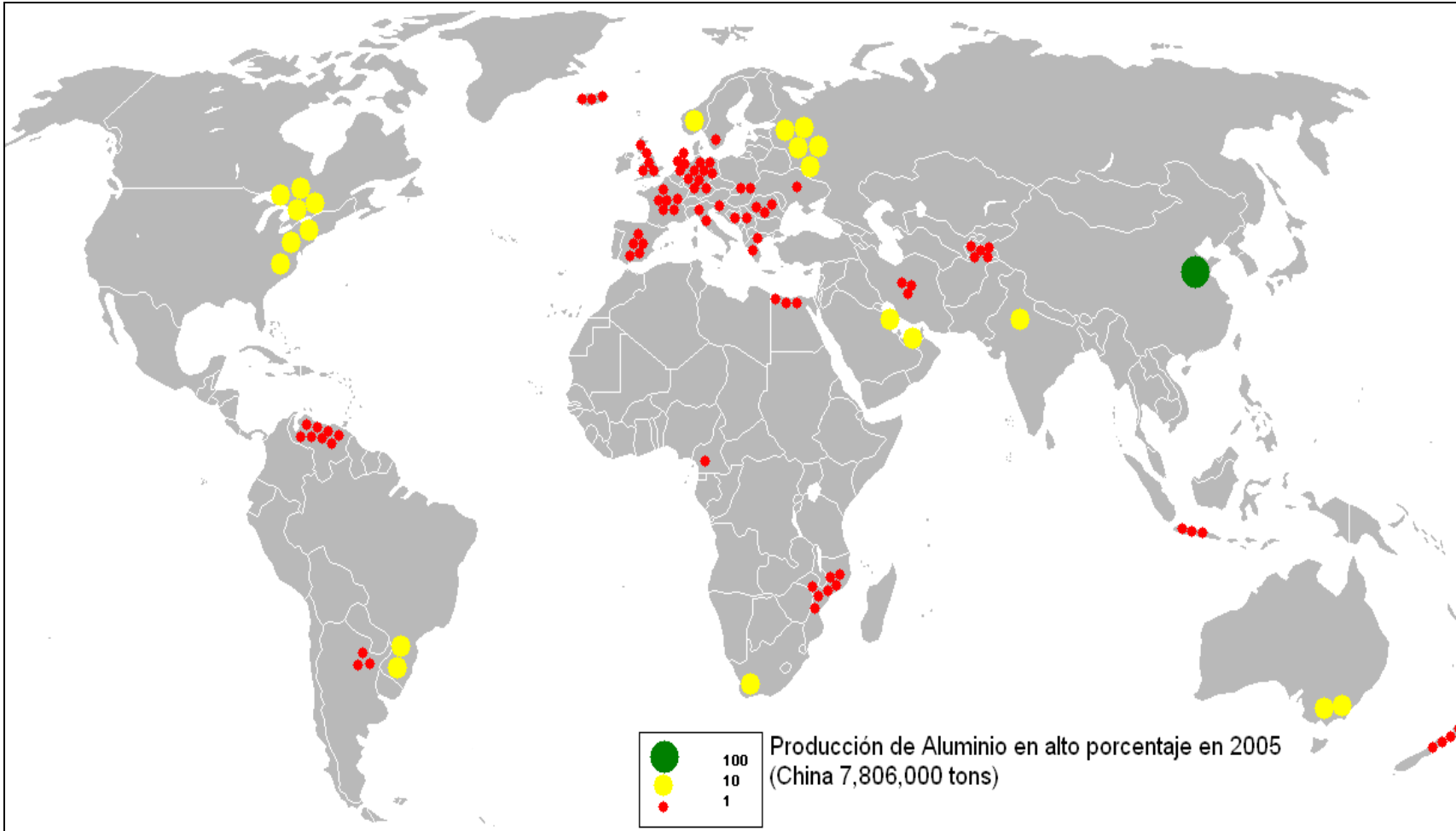


Figura 1.2 Países Productores de aluminio [3].

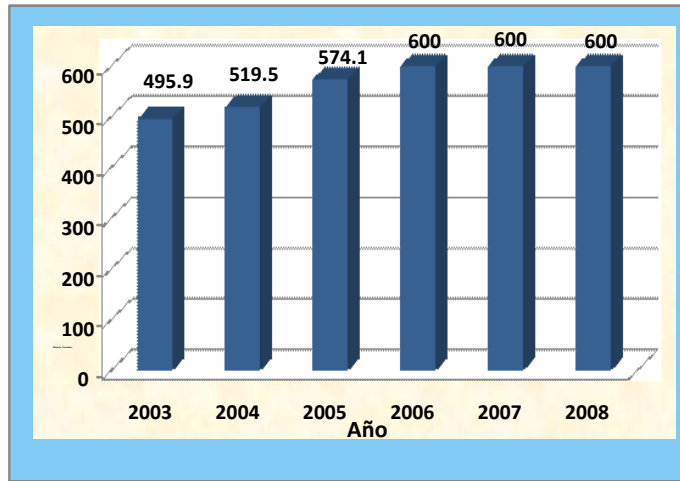


Figura 1.3 Tendencia de la manufactura de productos de aluminio en México [4].

Dentro de la industria del aluminio, la que más crecimiento ha mostrado es la de la fabricación de envases, teniendo un crecimiento ascendente durante el periodo 2003-2006 (figura 1.4) y en los años siguientes se mantuvo constante [4].

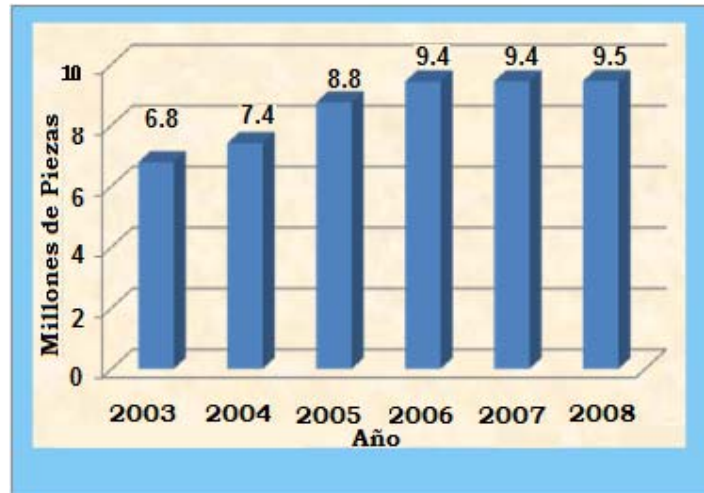


Figura 1.4 Producción total de envases de aluminio en millones de piezas [4].

En los años recientes, el desarrollo de la industria del aluminio se ha estancado, debido a la contracción de mercado, a la generación de nuevos materiales, al grado de madurez del proceso, que con el paso del tiempo han originado vicios tales como productos defectuosos y consumo de insumos en exceso, tal es el caso del agua del sistema de enfriamiento, que será tema de

estudio en la empresa ECKO-IMASA, de la cual a continuación se presenta una semblanza.

1.3 Antecedentes de la industria Ecko-IMASA.

Ecko, S.A. inició operaciones en 1934, bajo la razón social de Aluminio S.A. En 1949 se asocia a Aluminio Ecko, S.A. [5]. En 1950 amplía su línea de productos a casi 1,000 artículos. En 1990 se convierte en Ecko S.A [6] y participa abiertamente en la competencia nacional e internacional de manera exitosa. En 1992, Ecko S.A. realiza alianza con Vasconia, consolidando la industria de artículos para cocina.

En 2001 Ecko México y otras empresas, forman un consorcio con la empresa Industria Mexicana del Aluminio (IMASA); [5] y a partir de esta fecha, IMASA se ha dedicado a unificar los procesos operativos, administrativos, contables y financieros.

1.4 Determinación y ubicación del problema.

Derivado de un diagnóstico preliminar se observa que los problemas se pueden clasificar en:

- Operación del proceso y su control
- Metalúrgicos.

Los primeros se refieren a los procedimientos de control, tales como el no existir una adecuada planeación de actividades, la correcta clasificación de las materias primas en el almacén, el surtimiento de éstas a la fundición, la supervisión correcta de los cálculos de los balances de carga; el cuidado y mantenimiento de los equipos que controlan la temperatura en los puntos establecidos y de los sistemas de enfriamiento de la colada semicontinua.

Los problemas de tipo metalúrgico, son asociados a una mala práctica y suceden en el momento de la solidificación de los lingotes debido a la mala distribución de los sistemas de enfriamiento, a la velocidad de la colada y a la temperatura del metal fundido. Para la solución de estos será necesario hacer

estudios más detallados y precisos soportados con conocimientos de transferencia de calor, entre otras.

1.5 Hipótesis.

En el presente estudio se parte de la premisa de que gran parte de los problemas de desperdicio del material originados en la compañía, se asocian a los procesos metalúrgicos y su control. De tal forma que si durante el desarrollo de la investigación se determinan mejores condiciones de la colada semicontinua; se podrán establecer nuevas condiciones de operación que permitan optimizar el proceso.

1.6 Objetivos

Los objetivos del presente estudio se definen en términos de las condiciones deseadas del proceso de colada semicontinua de la empresa IMASA

1.6.1 General.

Conocer y entender el proceso de colada semicontinua, para encontrar deficiencias que afecten significativamente al proceso, y que a su vez, permitan diseñar y proponer opciones de solución, para el mejoramiento y la optimización de recursos.

1.6.2 Particulares.

- Entender los mecanismos de transferencia de calor en el molde y como afectan estos a la solidificación del aluminio.
- Simular el proceso de colada semicontinua y comparar con los valores de planta.
- Entender el efecto de las variables de proceso sobre micro estructura y propiedades mecánicas.

1.7 Referencias.

[1] [http:// www.minerals.usgs.gov/minerals/Platts Metals Week, 2008b.](http://www.minerals.usgs.gov/minerals/Platts%20Metals%20Week,2008b)

- [2] Lee. E., Aluminum Mineral Yearbook 2006, Science for Changing World, November 2009.
- [3] Lee. E., Aluminum in February, Mineral Industry Surveys 2008, Science for Changing World, February 2008.
- [4] CANAFEM Cámara Nacional de Fabricantes de Envases Metálicos, Memoria Estadística, 2006-2007
- [5] <http://www.imasamexico.com.mx/>
- [6] www.vasconia.com/vas_company_history_esp.htm

Capítulo 2 Proceso de producción de IMASA.

2.1 Diagrama del proceso.

En el diagrama que se presenta en la Figura 2.1, se muestra el proceso de obtención de discos de aleaciones de aluminio para la fabricación de utensilios de cocina [1]. A continuación se hace una breve descripción de cada una de las etapas.

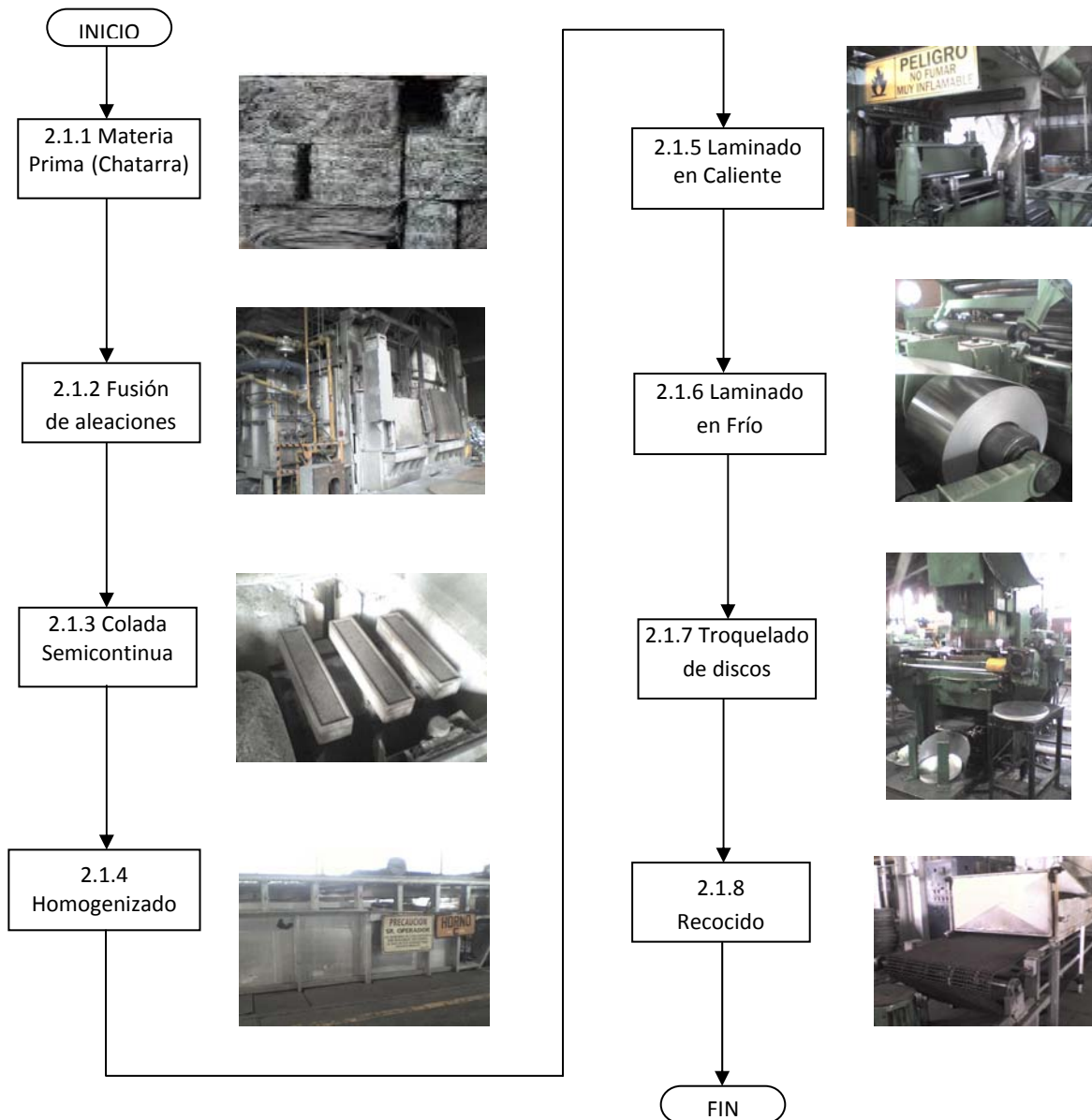


Figura 2.1 Diagrama de producción de discos de aluminio para fabricar utensilios de cocina.

2.1.1 Materia prima.

La materia prima, utilizada para fundición, consiste en material de reciclaje, reutilización de desperdicio generado durante las diferentes etapas o bien de devoluciones de discos o utensilios defectuosos, también aluminio primario en lingote con alto grado de pureza.

Las aleaciones de mayor uso pertenecen a las de la serie 1XXX y la 3XXX. La norma utilizada para identificar la composición química es la de Aluminium Association (AA) y las especificaciones de cada serie de aleaciones de aluminio se muestran en el Apéndice 1 [2].

2.1.2 Fusión y ajuste de aleaciones.

La fusión se lleva a cabo en tres hornos, dos con capacidad de 20 toneladas cada uno y otro con capacidad de 40 toneladas, éstos se alimentan, de acuerdo con la tabla 2.1, dependiendo del tipo de aleación a producir.

Tabla 2.1 Porcentaje de carga a hornos de fundición [2].

<i>Aleación</i>	<i>Aluminio Primario</i>	<i>Material de reciclaje</i>
1000 (1100 o 1200)	50%	50%
1050 o 1350	75%	25%
1070 o 1060	100%	0
3003	50%	25% (3003) 25% (1000)
3103	0	100%
3105	0	100%
3004	0	100%

Una vez que la aleación está en estado líquido, se toma una muestra para su análisis químico. Con el resultado de esta, se ajusta la carga del horno adicionándole los elementos aleantes necesarios. Con el apoyo de una pala

mecánica y por la parte posterior del horno se agita y retira la escoria. El procedimiento de fusión y control, es como se describe en la figura 2.2



Figura 2.2 Tratamiento de metal liquido.

2.1.3 Colada semicontinua.

Una vez que la aleación cumple con las especificaciones de análisis químico y de temperatura dentro de los hornos, es transportada hasta la mesa de vaciado

donde se realiza la colada semicontinua (CSC), alimentándose mediante un canal, el cual tiene un filtro refractario por donde pasa el metal líquido; la mesa tiene espacio para tres moldes y el enfriamiento primario de los lingotes se lleva a cabo en ésta y consiste en circular agua dentro de los moldes de colada. El enfriamiento secundario es manteniendo una fosa llena de agua, en donde entran en contacto los lingotes una vez que empieza la solidificación. Terminado el vaciado se retiran los lingotes de la mesa, se identifican y se llevan a un cepillo para desbastarlos y dejarlos sin rebabas así como eliminar la zona del material áspera y rugosa. Los parámetros que se consideran durante la formación de los lingotes, se expresan en la tabla 2.2.

Tabla 2.2 Parámetros de vaciado.

PARAMETRO	CONCEPTO
➤ Temperatura	<ul style="list-style-type: none"> • Salida del horno. • En el canal de alimentación. • Del agua de enfriamiento.
➤ Flujo de agua	<ul style="list-style-type: none"> • Al inicio. • Durante el vaciado.
➤ Presión de agua	<ul style="list-style-type: none"> • Durante el proceso.
➤ Velocidad de colada	<ul style="list-style-type: none"> • Al inicio y • Durante el vaciado.
➤ Velocidad de alimentación y agentes refinadores	<ul style="list-style-type: none"> • Titanio – Boro.

2.1.4 Homogenizado.

Esta operación se realiza en hornos de caja en los que se someten los lingotes a ciclos de temperatura y tiempo específicos para las aleaciones IXXX y 3XXX; enseguida, se transportan mediante grúa hacia la etapa de laminación en caliente.

2.1.5 Laminado en caliente.

En esta etapa, el lingote reduce su espesor de 33 hasta 3 mm y alcanza longitudes de más de 100 metros. La reducción se lleva a cabo en etapas de laminación y en cada una de éstas, la abertura entre los rodillos se va cerrando hasta llegar al espesor antes mencionado. En cada paso hay de un 15 a un 20% de reducción de espesor.

2.1.6 Laminado en frío y corte de tiras

Este se lleva a cabo a temperatura ambiente, reduciendo el espesor de las láminas hasta 0.6 mm. El objetivo del laminado en frío es obtener un buen acabado superficial y exactitud dimensional. En seguida, la lámina se escuadra, se corta en tiras al ancho requerido.

2.1.7 Troquelado de discos.

La lamina con el ancho solicitado, se pasa a la prensa de conformado con las dimensiones del producto a obtener, se cortan discos que van desde 90 hasta 500 milímetros de diámetro. El sobrante se recicla en la misma planta.

2.1.8 Recocido.

Consiste de un ciclo a la temperatura y tiempo de proceso para cada aleación, en donde los discos a través de una banda pasan por un horno y a la salida son enfriados con aire, de acuerdo a la especificación de la norma Aluminium Association (Apéndice 4) [2] y así cumplir con las características de alargamiento.

2.2 Problemas técnicos detectados en las diferentes etapas del proceso.

A continuación se mencionan las fallas técnicas que se presentan en las diferentes áreas.

2.2.1 Materia prima.

Debido a la falta de control de los materiales en el almacén, cuando estos ya están en el horno en estado líquido, los ajustes de los elementos de aleación son tardados, generando tiempos de fusión más largos y mayor oxidación de la carga.

La chatarra que se adquiere contiene grasa y suciedad, favoreciendo en el momento de la fusión, la formación de compuestos intermetálicos, quedando inmersas en el baño metálico como inclusiones. Por la naturaleza de la materia prima, durante el proceso, absorbe hidrógeno de la atmósfera generando mayor cantidad de escoria.

2.2.2 Horno de fusión.

En éste se lleva a cabo la transformación de la materia prima del estado sólido al líquido y el ajuste de la composición química de la aleación. La falla más común es la del control adecuado de la temperatura. Cuando la temperatura aumenta sin control, es factible que se absorba mayor cantidad del hidrógeno del medio ambiente, así como que se generen mayor cantidad de óxidos (titanatos, óxidos de hierro y otros); estos compuestos posteriormente serán más difíciles de eliminar, pues requerirá para ello más tiempo de desgasificado y por lo tanto un volumen mayor de mezcla Cloro–Nitrógeno ($Cl_2 - N_2$). Caso contrario, cuando las temperaturas son menores de lo establecido se forman segregaciones difíciles de eliminar y la acción de los agentes desgasificadores se reduce, dejando gases atrapados que durante la laminación aparecerán como picaduras de alfiler o como cascarillas que se desprenden de la lamina.

Otro de los problemas que se presenta se relaciona con el balance de carga, para obtener la aleación final. Para ello se lleva a cabo la mezcla de diferentes materias primas, unas con mayor grado de purezas y otras con un menor grado y que al no llevar un control en el abasto muchas veces se adicionan materias con cantidades superiores de Hierro (Fe), difícil de controlar provocando que el producto en las etapas posteriores no se pueda procesar.

2.2.3 Colada semicontinua.

La aleación de aluminio en estado líquido es transportada del horno a la máquina de colada semicontinua a través de un canal de colada. Al fluir este, el metal pasa por un filtro de cerámica para retener óxidos. Sin embargo a lo largo de éste trayecto, la aleación está en contacto directo con la atmósfera, aún siendo estos una distancia y un tiempo relativamente cortos, se absorbe hidrógeno de la misma. Dicha cantidad se manifiesta en el momento de la laminación en forma de picaduras de alfiler.

Durante la formación de los lingotes de aluminio, cuando no hay una correcta distribución de agua del sistema de enfriamiento, éste puede ocasionar que durante la solidificación se generen segregaciones dando origen a óxidos de hierro, de aluminio, titanio, entre otros, mismos que en las etapas posteriores ya no será posible eliminar.

2.2.4 Proceso de homogenizado.

En ésta etapa, la situación que se presenta es que por el diseño del horno, se genera un calentamiento desigual en los lingotes, provocando características estructurales, deformaciones y resistencias mecánicas diferentes, causando comportamientos heterogéneos en el material en los pasos subsecuentes del proceso.

2.2.5 Laminado en caliente.

Los problemas que se presentan, a medida que se va reduciendo el espesor del lingote, es que sobre la superficie de la lámina aparezcan los óxidos que se forman en la fusión, manifestándose como inclusiones y a medida que el espesor de la lámina se reduce se van expandiendo. Cuando los lingotes no han sido bien homogeneizados, la relación de reducción de espesor no se obtiene de acuerdo a lo especificado, provocando desperdicio de material y mayor tiempo de laminado.

2.2.6 Laminado en frío.

Durante esta etapa, las porosidades conocidas como picadura de alfiler, que no lograron aflorar en la laminación en caliente, aparecen ocasionando rechazo en el material. También cuando no alcanzaron la homogeneización especificada, hacen que la dureza y plasticidad de la lámina no sea la adecuada, generando con esto un reproceso en el material.

2.2.7 Corte del rollo en secciones.

En este departamento, se detectó que las fallas, son debido al uso incorrecto del herramental, ocasionando más desperdicios de material debido a los cortes excesivos.

2.2.8 Troquelado de discos.

La falta de mantenimiento ocasiona en esta operación, que al pasar la lámina para su corte y generar los discos con los que se va a obtener el producto final no cumpla con las especificaciones requeridas, ya que debido al desajuste, de los componentes de la maquina o de los troqueles, provoquen cortes fuera de rango, generando desperdicios irrecuperables.

2.2.9 Recocido de discos.

Esta es una de las etapas críticas del proceso, debido a que los discos después de haber pasado por las operaciones anteriores sean rechazados; debido a que salen a flote defectos que no se detectaron durante la inspección, manifestándose como porosidades en forma de picaduras de alfiler, así como cascarillas, lo cual sigue generando desperdicio.

2.3 Áreas de oportunidad.

Como se planteó en el apartado anterior, se observa que durante el proceso existe un gran número de deficiencias. En el presente estudio se postula que las

acciones de mejora que se implanten en el departamento de fusión y colada semicontinua, impactarán en la reducción de costos. Desde el punto de vista metalúrgico, se puede optimizar la etapa de solidificación en la colada semicontinua, realizando un estudio de transferencia de calor, que permita conocer la simetría e historia térmica de las aleaciones; con diferentes condiciones de operación. Desde el punto de vista metalográfico, hacer una valoración estructural y de propiedades mecánicas. Lo antes expuesto, buscando mejoras al proceso.

2.4 Referencias.

- [1] <http://www.imasamexico.com.mx>
- [2] [http://www.world-aluminum.org/International Aluminum Association](http://www.world-aluminum.org/International%20Aluminum%20Association) (Norma AA)

Capítulo 3 Revisión de la literatura.

En este capítulo, se resumen los antecedentes teóricos necesarios para el análisis y entendimiento del proceso de colada semicontinua del aluminio y sus aleaciones.

3.1 Fundición y colada de aluminio.

Los procesos convencionales para la fusión y colado de lingotes y piezas de aluminio son [1]:

- Molde de arena;
- Molde permanente (por gravedad o a presión);
- Colada semicontinua.

3.1.1 Molde de arena.

Como antecedentes históricos se sabe que la colada en moldes de arena fue una de las primeras prácticas utilizadas por el hombre para moldear metales [2]. El moldeo en arena inicia con el vertido del metal o aleaciones fundidas en moldes elaborados con arena aglutinada, dejando la pieza en estos hasta que solidifique. En la Figura 3.1 se puede observar un esquema del proceso de fabricación de una pieza de aluminio por medio del moldeo en arena. Los adelantos que ha experimentado este proceso son: el mejoramiento de la producción de moldes; el desarrollo de equipo para moldeo; vaciado automático y acondicionamiento automático de la arena.

3.1.2 Molde permanente (por gravedad o a presión).

Se utiliza para piezas de aluminio, zinc y otras aleaciones de bajo punto de fusión. Los moldes que se emplean son fabricados de acero y enfriados con agua. Estos moldes se utilizan en varios ciclos de colada [3]. Este proceso comparte similitudes con el de arena, con la diferencia de que es utilizado para la producción de un gran número de piezas con espesor uniforme [4]. Para llevar a cabo este proceso se realizan los siguientes pasos:

- Calentamiento del molde entre 150 y 260°C.
- Ensamblado del molde: el molde a utilizar debe componerse de por lo menos dos partes.
- Vaciado del metal fundido a través de una ranura en la cavidad del molde.
- Solidificación dentro del molde.
- Extracción de pieza por medio de la separación de los moldes.
- Corte de material excedente y rebabeado.

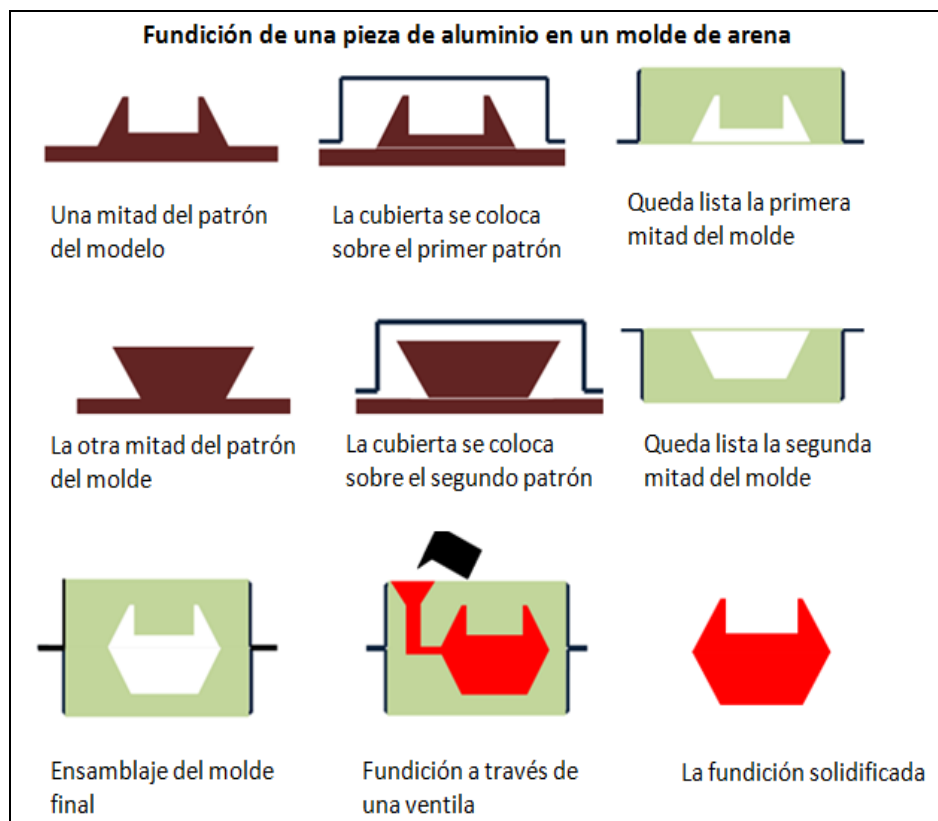


Figura 3.1 Fundición de una pieza de aluminio en un molde de arena [2].

Las piezas obtenidas en molde permanente, poseen una estructura de grano fino, incluyendo el espaciamiento dendrítico; ductilidad y mayor dureza que la que proporciona el moldeo en arena.

Un molde permanente puede producir hasta 25 000 piezas [5]. La diferencia entre gravedad y a presión, es que el primero, como su nombre lo indica, se aprovecha

de la gravedad y en el segundo se deberá provocar el llenado de las cavidades del molde mediante una fuerza externa, a través de un pistón u otro dispositivo mecánico, neumático o hidráulico.

3.1.3 Colada semicontinua.

Este proceso, en la industria del aluminio, es de los más importantes, ya que en él se obtiene más del 85% de la producción. Además, permite establecer condiciones propicias (estructuralmente hablando), para que la aleación de aluminio se pueda procesar posteriormente de forma mecánica. Sin embargo, durante el fenómeno de solidificación si no se tienen bien establecidos los parámetros de operación, tales como velocidad y/o temperatura de colada de la aleación, se presentaran problemas tales como segregaciones, formación de óxidos intermedios y absorción de hidrógeno y oxígeno, que son difíciles de eliminar en las operaciones siguientes. La colada semicontinua, de aluminio y sus aleaciones en los últimos 60 años ha tenido gran atención tecnológica, debido, principalmente al control estructural que se logra a través de enfriamiento adecuado.

3.2 Características de las aleaciones de aluminio.

La clasificación internacional de aleaciones de aluminio (tabla 3.1), es la que marca las directrices para los procesos de producción y las transacciones comerciales [6].

3.3 Transferencia de calor.

En la colada semicontinua, al igual que en la mayoría de los procesos en los que se involucra la transferencia de calor, esta se realiza mediante tres mecanismos básicos que son conducción, convección y radiación, describiendo brevemente a continuación lo que será de interés para este estudio.

Tabla 3.1 Principales elementos en la clasificación internacional de aleaciones del Aluminio. [6]

Aleación	Principal elemento de la aleación
1XXX	Primordialmente aluminio puro, sin ningún elemento adicional para aleaciones
2XXX	Cobre de 0.8 a 1.5%
3XXX	Manganeso de 0.7 a 1%
4XXX	Silicio de 3 a 5%
5XXX	Magnesio de 5 a 6%
6XXX	Magnesio y silicio de 0.4 a 0.8% Mg y 5.5 a 6% Si
7XXX	Zinc de 5 a 6%
8XXX	Otros elementos (por ejemplo hierro o estaño)
9XXX	Sin asignar

3.3.1 Transferencia de calor por convección.

Este es un proceso de transporte de energía que se puede presentar de dos formas; natural o forzado. El primero se presenta cuando las condiciones del elemento enfriador se mantienen sin movimiento, es decir, solo se da la transferencia de calor del cuerpo más caliente hacia el más frío sin la acción de un fenómeno externo que acelere; el segundo sucede por medio de bombas extractoras o por otros dispositivos, que provocan el movimiento de un fluido que fuerza el enfriamiento.

En el caso de la convección forzada, para llevar a cabo cálculos se debe conocer el coeficiente convectivo de transferencia de calor (h); el cual indica el grado de convección entre un objeto y su entorno. Para obtener dicho valor se deben considerar varios aspectos del sistema en el que se va a desarrollar la convección, tales como:

- La geometría del sistema.
- El fluido por el cual se encuentra rodeado el objeto.
- La temperatura del objeto que desprende calor.
- La velocidad del fluido.

Cada sistema posee un coeficiente de transferencia de calor particular, el cual deberá obtenerse de manera experimental o bien realizando operaciones con ecuaciones y experimentos ya existentes. Por ejemplo, la ley de enfriamiento de Newton (Ecuación 3.1), establece que la cantidad de calor que pierde un objeto “caliente”, con aire soplando a su alrededor, es proporcional a la diferencia de temperaturas entre el objeto y el medio enfriante; la cual puede ser utilizada para calcular la transferencia de calor, entre una pared y el fluido en movimiento que la rodea.

$$q = hA(T_w - T_\infty) \dots\dots\dots 3.1$$

Esta ecuación establece que la rapidez de transferencia de calor (q) está relacionada con el coeficiente de transferencia de calor *h* de cada material, la superficie “A” y con la diferencia de temperaturas entre la pared (*T_w*) y aquella del fluido en movimiento (*T_∞*), (*T_w - T_∞*), en donde se desarrolla [7].

Por otro lado, la cantidad de calor extraída por el flujo de agua en contacto con un cuerpo solido puede ser calculado mediante el flujo másico, por su capacidad calorífica y la diferencia de temperaturas del agua de enfriamiento a la entrada y salida, como se muestra en la ecuación 3.2.[7]

$$q = m \cdot Cp \cdot \Delta T \dots\dots\dots 3.2$$

Donde m es el flujo másico del agua de enfriamiento (kg/s); Cp es la capacidad calorífica (J/kg/°C) y ΔT es la diferencia de temperatura en el agua de enfriamiento (°C).

El valor de flujo másico del fluido de enfriamiento, m, se puede estimar del producto del flujo volumétrico (Q) y la densidad del mismo (ρ), por lo que la ecuación 3.2 resulta de la siguiente manera (ecuación 3.3) [7]

$$q = Q \cdot \rho \cdot C_p \cdot \Delta T \dots\dots\dots 3.3$$

La cantidad neta de energía que el fluido de enfriamiento puede ser capaz de remover, deberá ser obtenida por el producto del calor estimado y el tiempo de contacto entre el sólido y el fluido.

De igual forma la cantidad de energía liberada por una masa líquida al solidificarse, se puede obtener de la ecuación 3.4 [8]:

$$q = -m \cdot \Delta H \dots\dots\dots 3.4$$

Donde m es la masa del sólido formado y ΔH es el calor latente de transformación líquido a sólido. La masa puede ser sustituida por la densidad y el volumen del cuerpo solidificado, quedando la ecuación de la siguiente manera (ecuación 3.5):

$$q = -\rho \cdot V_{Tot} \cdot \Delta H \dots\dots\dots 3.5$$

3.3.2 Los números adimensionales.

Existen correlaciones para realizar cálculos de transferencia de calor, considerando otros parámetros del fluido como son la viscosidad, la densidad, la velocidad del flujo, la diferencia de temperaturas entre el fluido vaciado y el recipiente; así como de la geometría del sistema en que se lleve a cabo tal proceso. La resultante estequiométrica no tiene unidades, mencionando a estas situaciones adimensionales, tal es el caso de:

3.3.2.1 El número de Nusselt. (Nu)

Se emplea frecuentemente para resolver problemas de transferencia de calor por convección. Definiéndose mediante la relación 3.6 [9]:

$$Nu = \frac{h \cdot Lc}{k} \dots\dots\dots 3.6$$

Donde: **h** es el coeficiente de transferencia de calor; **Lc** la longitud del objeto que va a emitir calor, **k** representa la conductividad térmica del fluido.

Si se expresa en números adimensionales estará representada por la relación 3.7

$$Nu = A \cdot Re^b \cdot Pr^c \dots\dots\dots 3.7$$

En la cual **A** es el área, **Re** el número de Reynolds, **Pr** el número de prandtl, **b** y **c** constantes establecidas. La relación Nusselt, también se puede expresar (relación 3.8) en función del coeficiente de calor por convección y conducción

$$N_u = \frac{\text{Rapidez de extraccion de calor por convección}}{\text{rapidez de extracción de calor por conducción}} \dots\dots\dots 3.8$$

Si el numerador y el denominador tienen una magnitud similar (Relación cercana a 1), se trata de un caso característico de flujo laminar; por el contrario, si la relación resulta en un número grande, se va a tener un flujo turbulento.

3.3.2.2 El número de Reynolds. (Re)

Usado para establecer relaciones entre los datos de transferencia de calor por medio de convección, el número de Reynolds sirve para caracterizar el movimiento de un fluido, y se expresa como un cociente, en el que se relaciona la fuerza de inercia con la fuerza viscosa de un fluido (relación 3.9.).

$$R_e = \frac{\text{fuerza inercia}}{\text{fuerza viscosa}} = \frac{L \cdot u \cdot \rho}{\mu} \dots\dots\dots 3.9$$

Donde ρ es la densidad del fluido (kg/m^3); u es la velocidad del fluido (m/s); L indica una longitud característica (m) y μ indica la viscosidad del fluido ($\text{Pa}\cdot\text{s}$).

Si se considera en lugar de largo de la tubería el diámetro de esta (D), se obtiene la relación 3.10.

$$R_e = \frac{D \cdot u \cdot \rho}{\mu} \dots\dots\dots 3.10$$

3.3.2.3 El número de Prandtl. (Pt)

Este está representado por la resistencia hidrodinámica y la térmica que ofrece el fluido (relación 3.11), [11], en donde a diferencia de otros números adimensionales el de Prandtl, no contiene variables de longitud, ya que sólo depende del fluido con el que se trabaja [13].

$$Pr = \frac{\text{Resistencia hidrodinámica}}{\text{Resistencia térmica}} \dots\dots\dots 3.11$$

3.4. Estudios experimentales en la colada semicontinua de aleaciones de aluminio.

Durante la colada semicontinua, el metal líquido se transforma en sólido siendo el medio más eficiente para solidificar grandes volúmenes de metal en formas geométricas simples para su utilización en procesos subsecuentes.

3.4.1 Método de limpieza para eliminar defectos en la fundición de aluminio.

El aluminio reacciona fácilmente con gases de la atmosfera como el hidrógeno y oxígeno, así como con algunos elementos de aleación, originando porosidades e inclusiones en forma de óxido de magnesio-aluminio y otros como titanatos y carburos, provocando que los productos con este tipo de defectos sean rechazados. Por lo tanto, el proceso de limpieza es importante en la preparación,

haciendo que las propiedades sean mejores [14, 15]. Los compuestos más utilizados para retirar impurezas son los fluoruros, cloruros, y carbonatos, los cuales son agregados al final de la fusión del metal [16-19]. La eficiencia en la eliminación de inclusiones resulta ser buena si se hace una mezcla y aplicación adecuada de los materiales fundentes con el aluminio fundido [20-22].

Experimentos realizados [23], utilizando una mezcla de Cloruro de sodio y Cloruro de Potasio al 50%, en hornos de crisol y un sistema de filtrado, demostró que a medida que se realizan varias limpiezas y filtrados del aluminio fundido, este aumenta las propiedades de ductilidad y resistencia mecánica de forma exponencial. Por lo antes expuesto la limpieza del aluminio fundido es fundamental desde el inicio del proceso de fusión, ya que este ayuda a minimizar los defectos para los siguientes procesos.

3.4.2 Tipos de agua en la transferencia de calor por colada semicontinua.

El agua es el insumo principal para la transferencia de calor, por lo que con respecto a su utilización para el enfriamiento, se han publicado diversos trabajos [24-27, 32] y el común del enfoque de las investigaciones están dirigidas al estudio de la cantidad de sales en suspensión [28-31], por ser éstas las que desvirtúan la capacidad de enfriamiento del agua.

3.4.3 Transferencia de calor entre el molde y el metal, durante la solidificación.

La transferencia de calor y la solidificación de los metales o aleaciones, depende de la temperatura del metal fundido, de la velocidad de la colada, del flujo de agua, de la cantidad de metal, del tamaño del molde, entre otros [34-37]; considerando que en el primer contacto del metal fundido con el molde (figura 3.2), la resistencia térmica en la interface molde-metal decrece debido a la solidificación instantánea por la aparición de una película de vapor entre el molde y el lingote y a la contracción del material que para cada aleación es diferente.

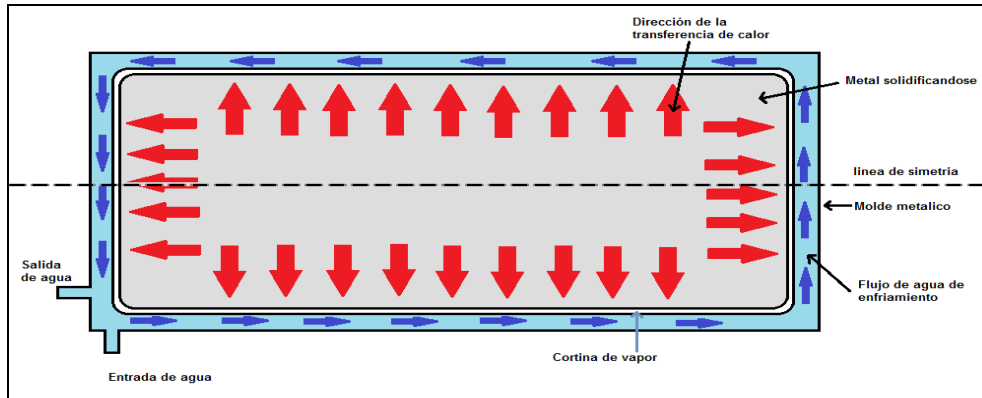


Figura 3.2 Transferencia de calor entre el molde y el material fundido

3.4.4 Efectos del calentamiento y transferencia de calor del agua.

Desde el punto de vista del control del proceso y de los defectos, la parte más crítica de la colada semicontinua es la puesta en marcha, ya que es el punto de contacto del agua con el molde, lo que influye en la transferencia de calor y además es el momento en el que el aluminio al solidificarse absorbe aire o se le forman grietas.

Al inicio del proceso de colada, se tiene un molde hueco que se llena con aluminio fundido y cuando alcanza una altura determinada la superficie del lingote se va enfriando a partir las paredes del molde, extrayéndose aproximadamente el 75% del calor del material [38-51], y al recorrerse a la zona de enfriamiento secundario, se expone el lingote al contacto directo del agua. Esta agua entra en la zona de enfriamiento secundario por medio de una serie de orificios que se encuentran en la base del molde, orientados para producir un flujo de agua con un ángulo vertical que golpea la superficie del lingote a una distancia de 60 a 90 mm por debajo del fondo del molde.

Para el proceso de colada semicontinua, la transferencia de calor al agua de enfriamiento, en el punto inicial de contacto causa una película de vapor que envuelve todo el lingote haciendo que éste inicie su enfriamiento cambiando la temperatura constantemente. Estos momentos de la formación del lingote son decisivos para la forma superficial, ya que si no tiene el enfriamiento adecuado,

esta se tornara áspera, provocando que antes de laminarse se le realice una operación de fresado.

3.4.5 Modelado de lingotes en colada semicontinua con enfriamiento asimétrico.

El aluminio fundido alimentado a un molde, que es enfriado por agua, forma un lingote solido y a medida que se va recorriendo, el agua que sirve de enfriamiento incide sobre la superficie que se va generando, sirviendo tanto para solidificar como para enfriar. En esta etapa, se generan defectos característicos como las macro segregaciones, provocadas por un enfriamiento asimétrico, manifestándose en formación de óxidos [52-63], que en la laminación difícilmente se eliminarán.

3.4.6 Nueva generación de equipos de colada semicontinua de aleaciones de aluminio.

El proceso de colada semicontinua se desarrolló en la década de 1940 [64-66], con un simple sistema de doble esprea de enfriamiento; la primera dirigía un flujo el agua sobre una placa de aluminio que actuaba como parte del molde, para así proporcionar la solidificación primaria; la segunda esprea se ubicaba por debajo del molde, para proporcionar el enfriamiento secundario (Figura 3.3).

La utilización de moldes compactos en la periferia, permitió un mayor control del flujo y presión del agua de enfriamiento (figura 3.4), mejorando las características de los lingotes

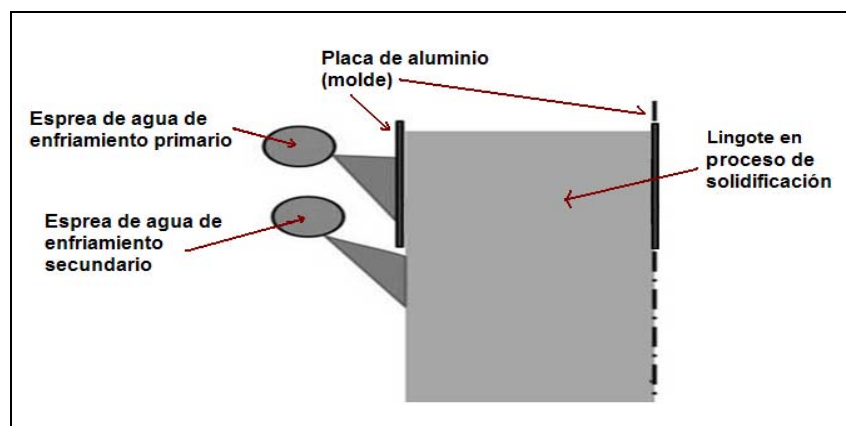


Figura 3.3 Esquema de uno de los primeros sistemas de colada semicontinua.



Figura 3.4 Molde compacto para colada semicontinua.

El diseño mas reciente de moldes se ha centrado en la optimización de los insumos, tales como el agua de enfriamiento, así como mejorar las características de los lingotes y en la flexibilidad de adaptarse con rapidez a diferentes dimensiones y aleaciones que se requieren; las figuras 3.5, 3.6. y 3.7 [67,68], muestran los diseños innovados de la máquina de colada semicontinua; observando que su sistema es más sencillo de operar, reduciendo hasta un 50% el consumo de agua y su mantenimiento es menor.

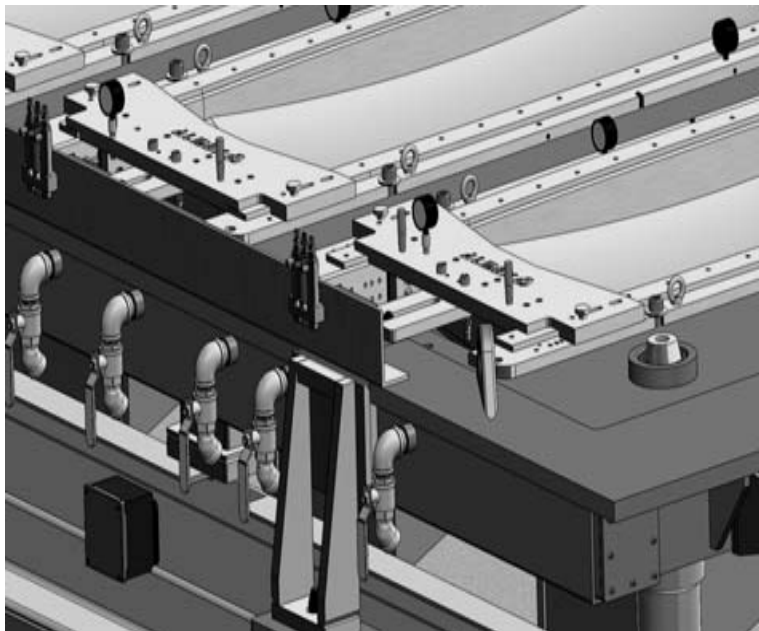


Figura 3.5. Esquema de las cabeceras de la máquina de colada semicontinua.



Figura 3.6 Parte inferior de la cara ajustable de la máquina de colada semicontinua.

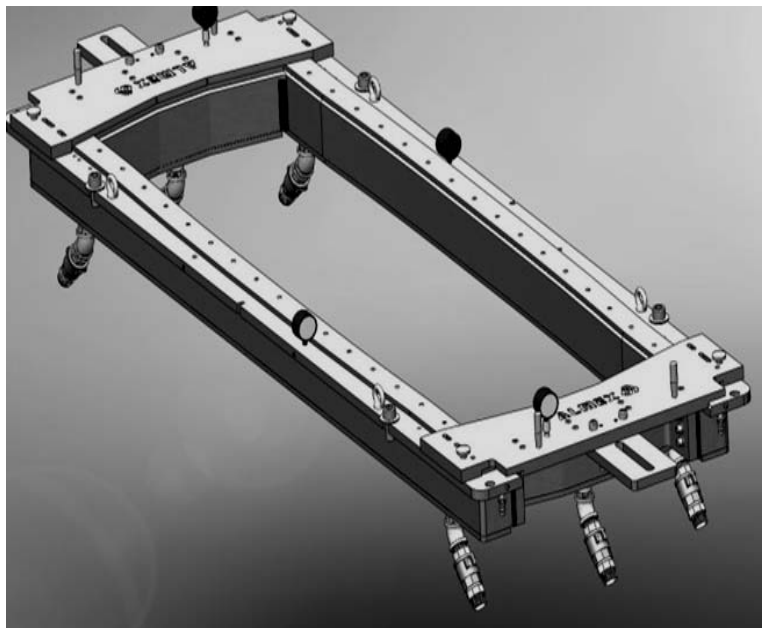


Figura 3.7 Molde para lingotes de aluminio seis entradas de agua y cuatro calibradores de presión.

3.4.7 Aplicación de la simulación numérica en la colada semicontinua.

El mecanismo de transferencia de calor y el flujo de fluidos, que involucran problemas de cambio de fase son complejos debido a la naturaleza no lineal de las ecuaciones que los gobiernan; para el análisis de estos fenómenos, se han desarrollado diferentes técnicas una de ellas es la simulación numérica.

Muchos métodos numéricos, como diferencias [69,70], volúmenes [71], o de elementos finitos [72,73] parecen ser más prácticos en la solución de cambios de fase. Se aprecia también que las técnicas numéricas aplicadas para dar solución al transporte térmico, durante el proceso de solidificación de los materiales, se pueden clasificar en dos categorías distintas: un enfoque de un solo dominio o uno de multidominio.

En el método de multidominio las ecuaciones gobiernan por separado cada fase y especifica las condiciones de acoplamiento del límite adecuado entre éstas; La posición de interfaz es desconocida y debe ser determinada en forma explícita como parte de la solución. Así la interfaz de cambio de fase es continuamente trazada de tal manera que es coincidente con el límite de cambio de la fase móvil. Estos métodos a menudo tienen buena exactitud por el alto costo en términos de esfuerzo de cálculo y de almacenamiento limitado a los problemas más simples [74,75].

3.5 Simulación Numérica y el Método del elemento finito

3.5.1 Simulación Numérica

Las herramientas computacionales han facilitado el análisis y solución de problemas de ingeniería, permitiendo obtener resultados confiables en menos tiempo y con una interpretación más precisa. Además, de hacerlos totalmente reproducibles con las mismas características las veces que sean necesarias.

Así mismo el proceso de simulación numérica consta de varios pasos para contrastar o predecir resultados, tal como se esquematizan en la figura 3.8, en

donde se mencionan las actividades previas, durante y posteriores a la simulación numérica hasta la obtención de resultados. Es importante mencionar que la simulación es una técnica, para corroborar y predecir resultados.

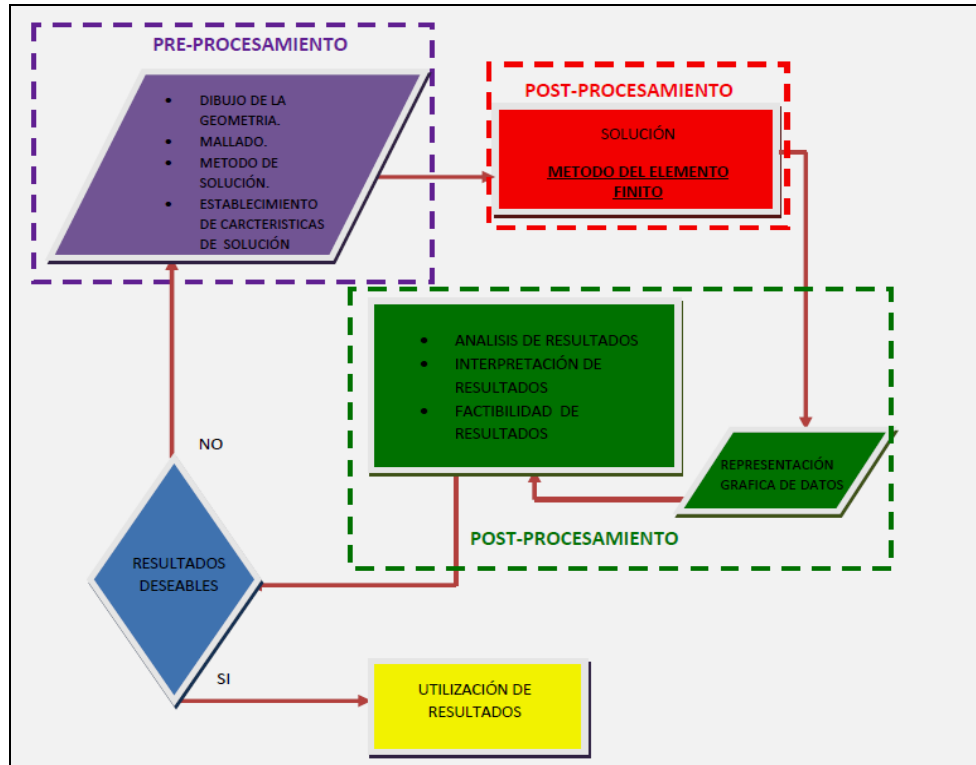


Figura 3.8 Diagrama de pasos de la simulación numérica.

3.5.2 Método del Elemento Finito

Se utiliza para resolver problemas de ingeniería, tales como análisis estructural, transferencia de calor, flujo de fluidos, transporte de masa, potencial, eléctrico, y en general aquellos que se pueden representar por problemas asociados a la

$$\text{ecuación } \nabla X^2 = \frac{K \partial \cdot}{\ell \mathcal{L}}$$

El método del elemento finito ofrece una ventaja para aplicarse en sistemas con geometrías irregulares, ya que permite dividir el dominio de la solución en regiones con formas sencillas, también llamadas elementos. La solución total se genera

uniendo, o “ensamblando”, las soluciones individuales, teniendo cuidado de asegurar la continuidad en las fronteras entre los nodos.

Selección de tipo de elementos

El número total de elementos y su variación en tamaño y tipo proporcionados junto con el dominio son cuestiones primarias de criterio de ingeniería. Los elementos pueden ser empleados en una, dos o tres dimensiones (figura 3.9). Los puntos de intersección de las líneas que forman los lados de los elementos se conocen como nodos, y los mismos lados se denominan líneas o planos nodales.

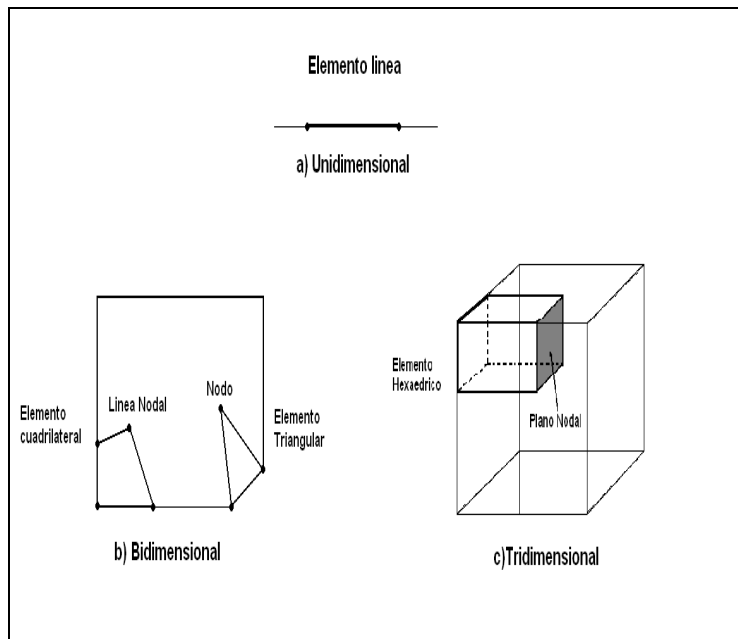


Figura 3.9 Tipos de elementos para (a) una, (b) dos y (c) tres dimensiones (se incluyen líneas y planos nodales).

Los elementos deben ser lo suficientemente pequeños para proporcionar resultados útiles y a su vez lo suficientemente grandes para reducir la utilización de los recursos de cómputo [76, 77, 78]. Los elementos pequeños son deseables en fenómenos donde los resultados cambian rápidamente (Estado transitorio) y cuando ocurren cambios en la geometría; los elementos más grandes pueden ser utilizados en fenómenos donde los resultados son relativamente constantes (Estado estable).

3.6 Referencias

- [1] Hufnagel W., Manual del aluminio, Editorial Reverte, Barcelona, España. 1992.
- [2] Ammen. W., The Complete Handbook of Sand Casting Tab books; no.1043, Editorial McGraw-Hill Professional, 1979.
- [3] Ammen. W., Metalcasting Craft master, Editorial McGraw-Hill Professional, 2000.
- [4] <http://www.custompartnet.com/wu/SandCasting>
- [5] Kaiser Aluminum and Chemical Sales, Inc., Casting Kaiser aluminum: pig and ingot product data, casting practices, and characteristics of molten aluminum, Publicado por Cornell University.
- [6] Kaufman G., Introduction to aluminum alloys and tempers, Editorial ASM International.
- [7] Rodríguez J., Castro L., Del Real C., Procesos industriales para materiales metálicos, Editorial Visión Net. 2006.
- [8] Poirier. R. & Geiger. H., Transport Phenomena in Materials Processing, Ed. TMS, USA, 1994.
- [9] Bird. B., Stewart. E., Lightfoot. N., Fenómenos de Transporte, Editorial Reverte, S.A., Barcelona, España 1992.
- [10] Plncropa. F. & PDrwit. .D., Fundamentals of Heat &_Mass Transfer 4th Ed., Wiley, New York, USA, 1996.
- [11] Geankoplis. J., Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias, Compañía Editorial Continental, S.A. DE C.V, México 3ra edición, 1998.

- [12] Holman. P., Transferencia de Calor, Compañía Editorial Continental., 10a reimpresión México 1999.
- [13] Esplugas. S., Chamarro. M., Fundamentos de transmisión de calor, Edicions Universitat Barcelona, 2005.
- [14] Cengel. A., Heat transfer: a practical approach, McGraw Hill Professional, 2003 2a Edición.
- [15] Li. X., Sun. D., Xu M., Su. D. and Wang. J, Material Science and Technology 7(3), 1999
- [16] Qiu. X. “Aluminum Electrolyzation” (Metallurgical Industry Publishing Company. 1986.
- [17] Fu. S. and Kang. X., Special Casting and Nonferrous Alloy 84(3). 1996.
- [18] Fu. S., Kang. X., Chen. Z., Qian. W., Chinese Journal of Nonferrous Metals 11(3). 2000.
- [19] Fu. S., and Kang. X., Journal of Fuzhou University (Natural Science) 26(1). 1998.
- [20] Sahai. Y., Australian, Asian, Pacific Course and Conference on Aluminum Cast House Technology: Theory and Practice July 4–8 1993 (Minerals, Metals and Materials Soc., TMS)
- [21] Sorrel. G. and Groetsch. R. Journal Amer. Ceram. Soc. 69 (4). 1986.
- [22] Sully. H., Hard. K. and Heal. J. Journal of the Institute of Metals 82(1953–1954)
- [23] Crepeau P. N., Metal Modern Casting (7). 1992.

- [24] Grandfield J., Hadley A., Instone A., "Water Cooling in Direct Chilli Casting: Part 1, Boiling Theory and Control, Light Metals, TMS. 1997.
- [25] Maenner L., Magini B., Caratini Y., "A comprehensive approach to water coaching in DC casting", Light Metals, TMS. 1997.
- [26] Bamberger M., Prinz B., "Determination of heat transfer coefficients during water cooling of metals", Materials Science and Technology, April 1986, V.2.
- [27] Li D., Wells M., Lockhart G., "Effect of surface morphology on boiling water heat transfer during secondary cooling of the DC casting process", Light Metals, TMS. 2001.
- [28] Yu H., "The effect of cooling water quality on aluminum ingot casting", Light Metals, TMS. 1985.
- [29] Yu H., Leon D., Giron A., "A sensor for monitoring the heat transfer characteristics of ingot coaching water containing dissolved gases", Light Metals, TMS. 1994.
- [30] Langlais J., Bourgeois T., Caron Y., Beland G., Bernard D., "Measuring the heat extraction capacity of DC casting coaching water", Light Metals, TMS, 1995.
- [31] Larouche A., Langlais J., Bourgeois T., Gendron A., "An integrated approach to measuring de casting water quenching ability", Light Metals, d M, 1999.
- [32] Sorheim E., Mortensen O., Benum S., Stette C., "Inverse analysis of space and time variations in the boundary heat flux during water film coaching", Light Metals, TMS. 2002.
- [33] Ho K., Pehlke R.D., AFS Trans., v91. 1983.
- [34] Krishnan M. and Sharma D., Commun. Heat Mass Transfer, v.23. 1996.

- [35] Lee Z., Kim T., Choi Y., Metal Mat. Trans. B, v29B. 1998.
- [36] Santos C., Quaresma J. and Garcia A., 1 of Alloys and Comp., v.319. 2001.
- [37] Souza E., Cheung N., Santos C., Garcia A., In inverse Problems: Design and Optimization Symposium PDO, Rio de Janeiro Brasil, 2004
- [38] Jensen E., et al. "Heat Transfer Measurements During DC Casting of Aluminum Part II: Results and Verification for Extrusion Ingots", Light Metals 1986, ed. R. Miller (Warrendale, PA: The Minerals. Metals & Materials Society, 1986).
- [39] Weckman D. and Niessen P., "A Numerical Simulation of the DC Continuous Casting Process including Nucleate Boiling Heat Transfer", Met. Trans. B, 138. 1982.
- [40]. Bakken J. and Bergstrom T., "Heat transfer Measurements During DC Casting of Aluminum Part 1: Measurement Technique", Light Metals 1986, ed. R. Miller (Warren dale, PA: The Minerals. Metals & Materials Society, 1986).
- [41] Jense E. "Heat Transfer Measurements During DC Casting of Aluminum Part II: Results and Verification for Extrusion Ingots", Light Metals 1986, ed. R. Miller (Warren dale, PA: The Minerals. Metals & Materials Society, 1986).
- [42] Watanabe Y., Hayashi N., '3-D solidification analysis of the initial state of the DC casting process", Light Metals 1996, ed. W. Hale (Warren dale, PA: The Minerals, Metals & Materials Society, 1996).
- [43] Tara pore E., "Thermal Modeling of DC Continuous Billet Casting", Light Metals 1989, Ed. P.G. Campbell (Warren dale, PA: The Minerals. Metals & Materials Society, 1989).
- [44] Wiskel J. and Cockcroft S., "Heat-Flow-Based Analysis of Surface Crack Formation during the Start-Up of the Direct Chill Casting Process: Part II.

Experimental Study of an AA5 182 Rolling Ingot”, Metallurgical and Materials Transactions 8, Vol. 27B. 1996.

- [45] Maenner L., Magini B. and Caratini Y., “A Comprehensive Approach to Water Cooling in DC Casting”, Light Metals 1997, Ed. R. Huglen (Warren dale, PA: The Minerals. Metals & Materials Society, 1997).
- [46] Kraushaar H., Jeschar R., Heidi V., Jensen E. and Schneider W., “Correlation of Surface Temperatures and Heat Transfer by D.C. Casting of Aluminum Ingots”, Light Metals 1995, Ed. J. Evans (Warren dale, PA: The Minerals. Metals & Materials Society, 1995).
- [47] Grandfield J., Hadley A., and Instone S., “Water Cooling in Direct Chilli Casting: Part 1, Boiling Theory and Control”, Light Metals 1997. Ed. R. Huglen (Warren dale, PA: The Minerals. Metals & Materials Society, 1997).
- [48] Jeschar R., Reiners Ti. and Schulz R., “Heat Transfer During Water and Water-Air Spray Cooling in the Secondary Cooling Zone of Continuous Casting Plants”, Steelmaking Proceedings (Warren dale, PA: Iron and Steel Society, 1986), Vol. 69.
- [49] Langlais J., “Measuring the Heat Extraction Capacity of DC Casting Cooling Water”, Light Metals 1995, Ed. J. Evans (Warren dale, PA: The Minerals. Metals & Materials Society, 1995).
- [50] Hamilton S., “Heat transfer and water quality in DC casting”, for chemical engineering project, Oct. 1995, Chemical & Materials Engineering, The University of Auckland.
- [51] Yu H., “The Effect of Cooling Water Quality on Aluminum ingot Casting”, Light Metals. 1985, (Warren dale, PA: The Minerals. Metals & Materials Society, 1985).

- [52] Ramilison J. and Lenhar J., "Transition Boiling Heat Transfer and the Film Transition Regime", J. Heat Transfer, Vol. 109. 1987.
- [53] Finn T., , Chu M., and, Benton W., "The Influence of Mushy Region Microstructure on Macro segregation in Direct Chill Cast Aluminum-Copper Round Ingots," in Micro/Macro Scale Phenomena in Solidification, ASME HTD-Vol. 218, C. Beckerman, et al., eds., ASME, New York, USA 1992.
- [54] Yu H., and, Granger D., "Macro segregation in Aluminum Alloy Ingot Cast by the Semi continuous Direct Chill DC Method," in Aluminum Alloys-Their Physical and Mechanical Properties, EMAS, United Kingdom 1986.
- [55] Chu M., and, Jacoby J., "Macro segregation Characteristics of Commercial Size Aluminum Alloy Ingot Cast by the Direct Chill Method," in Light Metals, ed., TMS, 1990.
- [56] Dorward R., and, Beerntsen D., "Effects of Casting Practice on Macro segregation and Microstructure of 2024 Alloy Billet," in Light Metals. USA 1990.
- [57] Garipey B., and, Caron Y., "Investigation in the Effects of Casting Parameters on the Extent of Centerline Macrosegregation in DC Cast Sheet Ingots," in Light Metals. USA 1991, Ed E. L. Rooy, TMS.
- [58] Flood S., Katgerman L., and, Voller V., "The Calculation of Macrosegregation and Heat and Fluid Flows in the D.C. Casting of Aluminum Alloys," in Modeling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes V, M. Rappaz, et al., eds., TMS.
- [59] Reddy A., and, Beckerman C., "Simulation of the Effects of Thermosolutal Convection, Shrinkage Induced Flow, and Solid Transport on Macrosegregation and Equiaxed Grain Size Distribution in a DC Continuous Cast Al-Cu Round Ingot," in Materials Processing in the Computer Age II, V. R. Voller, USA.

- [60] Ni J., and, Beckerman C., "A Volume-Averaged Two-Phase Model for Transport Phenomena during Solidification," Metall. Mater. Trans. B, 22B, USA.
- [61] Reddy A., and, Beckerman C., "Modeling of Macrosegregation Due to Thermosolutal Convection and Contraction-Driven Flow in Direct Chill Continuous Casting of an Al Round Ingot," Metall. Mater. Trans. B, 28B, USA.
- [62] Vreeman C., Krane M., and, Pincropa F., "The Effect of Free-Floating Dendrites and Convection on Macrosegregation in Direct Chill Cast Aluminum Alloys I: Model Development," Int. J. Heat Mass Transf., 43, USA.
- [63] Vreeman C., and, Pincropa. F., "The Effect of Free-Floating Dendrites and Convection on Macrosegregation in Direct Chill Cast Aluminum Alloys II: Predictions for alloys," Int. J. Heat Mass Transf., 43, USA.
- [64] Bolduc S., Yu H., Kiss L., Effects of water temperature on ingot casting, Light Metals USA. 2009.
- [65] Lefebvre Y., Sui C., White kettle W., "Cooling water effects on DC Ingot Casting", Light Metals USA 2009.
- [66] Jacoby J., "*Functions of Molds and Starting Blocks in Vertical Casting Processes*", *4th Australasian Asian Pacific Conference on Aluminum Cast House Technology Theory and Practice 1995*.
- [67] Matsuzaki H., Yoshikawa K., Morishta M., Effects of casting speed on inverse segregation behavior in DC Casting of Aluminum Slabs, Light Metals. USA 1995.
- [68] Jacoby J., Functions of Molds and Starting Blocks in Vertical Casting Processes, 4th Australasian Asian Pacific Conference on Aluminum Cast House Technology Theory and Practice. USA, 1995.

- [69] Lazaridis A., Int Heat Mass Transfer, 1970: 13.
- [70] Khadraoui Y., Korti A., J Maghrébin Phys, 2000.
- [71] Patankar S., Numerical heat transfer and fluid flow, Hemispher, Washington, DC, USA, 1980.
- [72] Comini G., Del Guidice S., Lewis R, Zienkiewicz O., Int J Numer Meth. England 1974. 8.
- [73] Korti A., Khadraoui Y, Saim R. 16`eme Congres François de Mecanique CFM, Nice, France 2003..
- [74] Das S., Scand J., Metall, 1993.
- [75] Mahmoudi J., Vynnycky M. Scand J., Metall, 2001.
- [76] Ferziger, J., Perc, M., Computational Methods for fluid Dynamics 3rd Edition. Springer – Verlag Berlin Heidelberg. 2002.
- [77] Daryl. L., A First Course in the Finite Element Method 4th Edition. Thomson 2007.
- [78] Steven C., Chapra-Raymond, P., Métodos Numéricos para Ingenieros., 4^a Edicion. Mc Graw Hill, 2003.

Capítulo 4 Planeación de Experimentos

4.1 Metodología general.

La figura 4.1 describe las actividades experimentales que se llevaron a cabo durante el análisis de la colada semicontinua, tanto en planta como en laboratorio, otra etapa experimental consistió en la simulación numérica de la misma.



Figura 4.1 Metodología utilizada para analizar el proceso de solidificación durante la colada semicontinua de aleaciones de aluminio.

4.2 Experimentos en planta

En esta etapa se llevaron a cabo pruebas en el proceso de colada semicontinua de IMASA y ECKO, como se aprecia en la figura 4.2, el propósito de éstos fue el de medir los parámetros involucrados en la solidificación de los lingotes de aluminio (series 1XXX y 3XXX). Un primer experimento se utilizó para tratar de establecer la simetría térmica del sistema; la información obtenida en un segundo experimento fue para la determinación de la curva de enfriamiento (rapidez de enfriamiento) en diversas zonas del lingote, cuando este se va formando.

Se espera que al término de estas pruebas, se tenga identificado si el sistema de colada semicontinua es térmicamente simétrico, el comportamiento térmico respecto al aluminio; así como conocer la relación de energía derivada de cálculos de transferencia de calor, de la información obtenida.

4.3 Experimentos en Laboratorio

La metodología para la realización de estas pruebas se soporta en la figura 4.3, iniciando con la construcción de la máquina de colada semicontinua; con esta y variando las condiciones de operación, se vaciaron barras y a cada una de ellas se les determinó su historial térmico, valoración estructural y propiedades mecánicas. Algunos de los datos obtenidos de este estudio se relacionaron con los de la planta para reforzar la hipótesis del establecimiento de nuevas condiciones de operación, y otros para enriquecer el estudio.

4.4 Metodología de simulación numérica

La figura 4.4 muestra las etapas de la simulación numérica, donde se buscó demostrar que los resultados llevados a cabo en planta y en laboratorio, tuvieran similitud. Se supusieron condiciones diferentes de coeficientes de transferencia de calor y dimensiones de los moldes, ambos para observar su comportamiento.

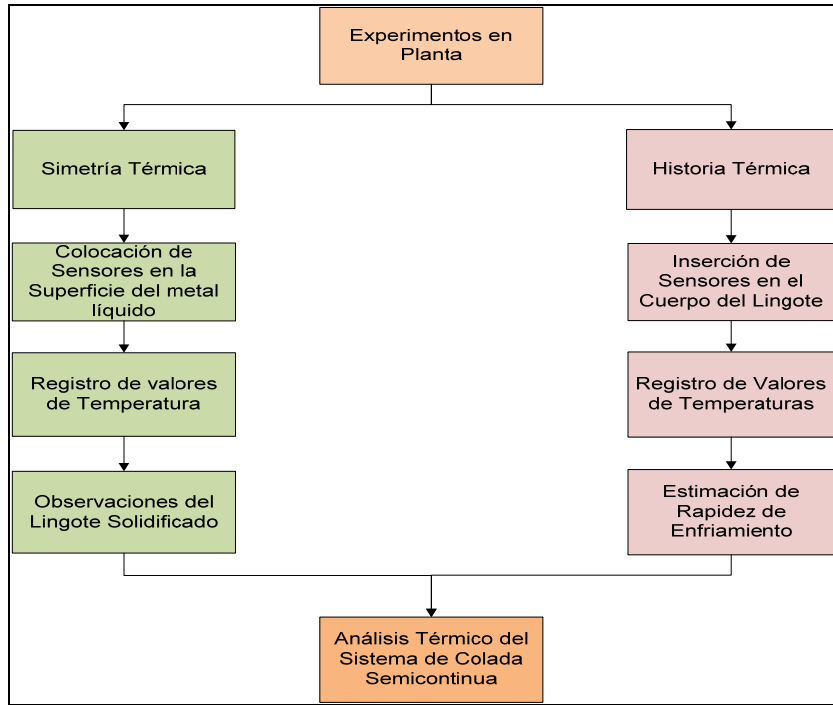


Figura 4.2 Metodología utilizada para realizar pruebas en planta

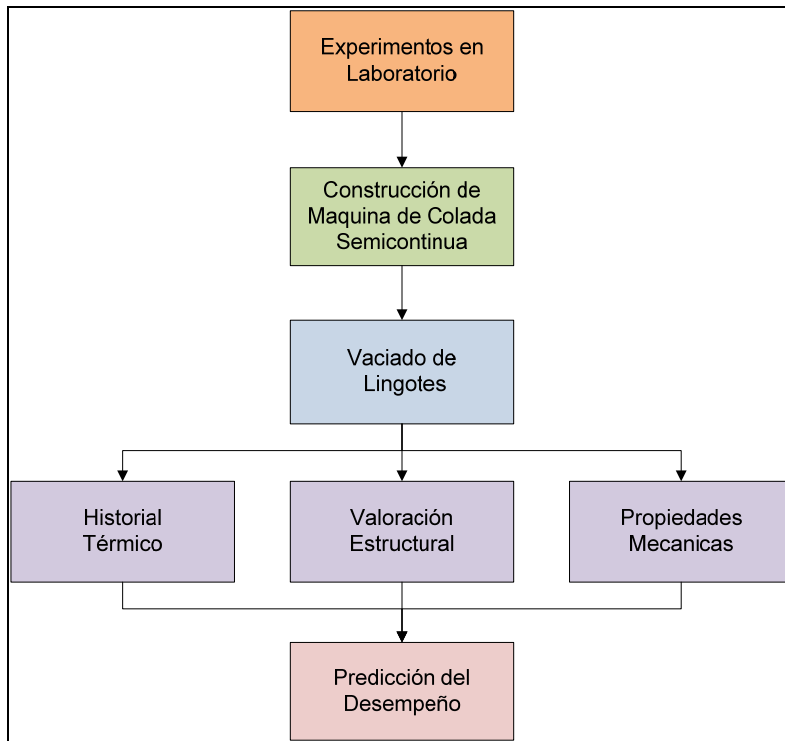


Figura 4.3 Metodología utilizada para realizar pruebas en el laboratorio.

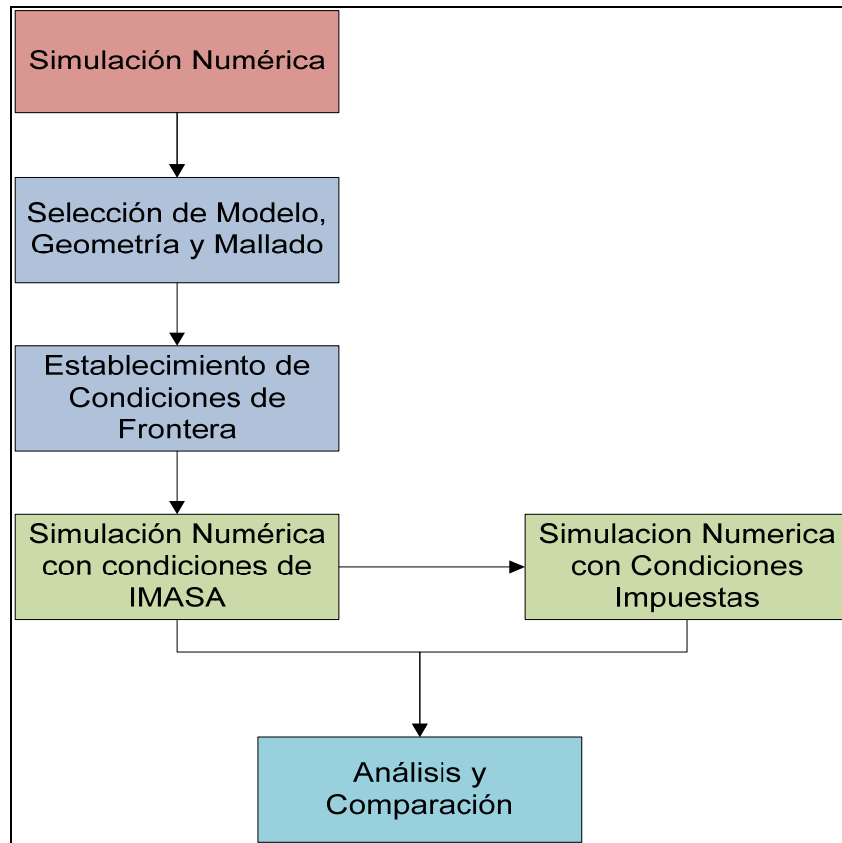


Figura 4.4 Metodología utilizada para realizar las simulaciones de colada semicontinua

Para un mejor entendimiento de las actividades realizadas en la experimentación en planta, de lo realizado en laboratorio y de la simulación numérica, en los siguientes capítulos, se desarrolla cada una de éstas con sus respectivos resultados.

Capítulo 5 Experimentación en planta.

En este capítulo se describe como se diseñaron y llevaron a cabo los experimentos en la planta de IMASA y ECKO, se presentan además los resultados obtenidos y su discusión.

5.1 Estabilidad térmica en el molde de colada semicontinua.

Con la finalidad de verificar la estabilidad térmica y la simetría de la distribución de temperatura del líquido en la entrada del molde, se colocaron distribuidos en su superficie 10 termopares tipo k, (figura 5.1). El registro de la temperatura se llevó a cabo durante el vaciado del aluminio. En la vista superior de la figura se aprecia el ancho y espesor del lingote de aluminio [1].

El área se dividió en dos partes, derecha e izquierda, y estas a su vez en parte superior e inferior, con respecto a la ubicación del alimentador de metal que esta al centro. Los termopares se distribuyeron de la siguiente forma: en la parte media se colocaron los termopares que se identificaron como Izquierda - Centro I-C 3, I-C 2, e I-C 1, Derecha - Centro D-C 1, D-C 2 y D-C 3, Izquierda - Superior I-S 1 e I-S 2 y finalmente los termopares considerados como Izquierda-Inferior I-I 1 e I-I 2 respectivamente, observando que los números menores se encuentran más cercanos al eje del alimentador.

En la figura 5.2 se presenta el arreglo de los termopares y el mecanismo de sujeción empleado en planta. La principal dificultad observada en este experimento, fue la fijación de los termopares a una altura tal, que no fueran lanzados fuera del líquido por la turbulencia del metal, o bien, que estos fueran arrastrados a la zona de solidificación y con ello incrustados en el lingote sólido. La sujeción se logró por medio de placas de material refractario perforadas y ancladas al molde.

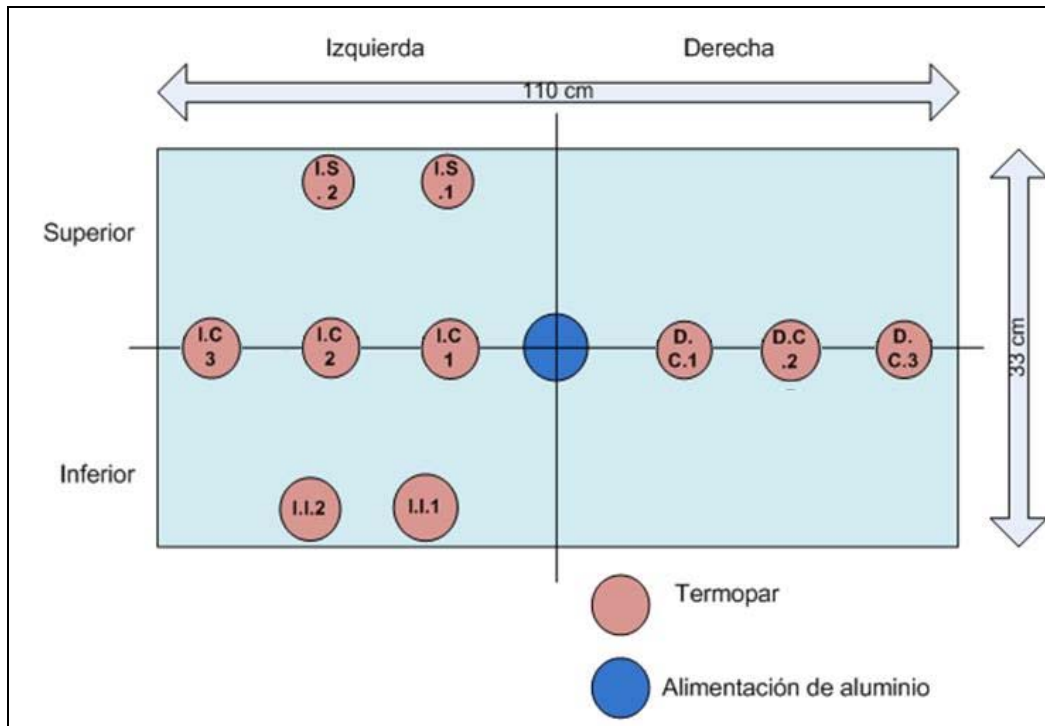


Figura 5.1 Distribución de los termopares en la superficie del molde.



Figura 5.2 Colocación de los termopares en la prueba # 1.

La figura 5.3 muestra el esquema del arreglo experimental usado. Los datos obtenidos por los termopares tipo k , alimentaron a un sistema de adquisición (SAD) de datos Hydra Fluke, a través de una computadora portátil y registrados a intervalos de tiempo de 2 segundos. La figura 5.4, muestra el arreglo experimental en planta.

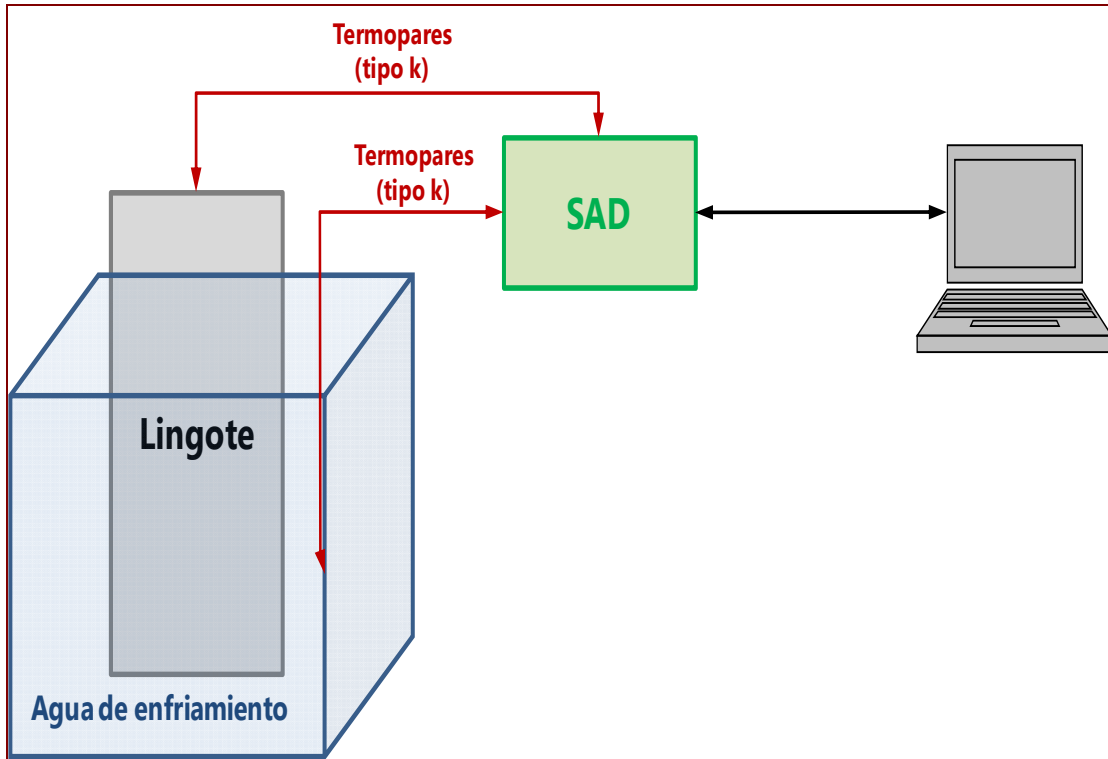


Figura 5.3 Esquema del arreglo experimental usado.

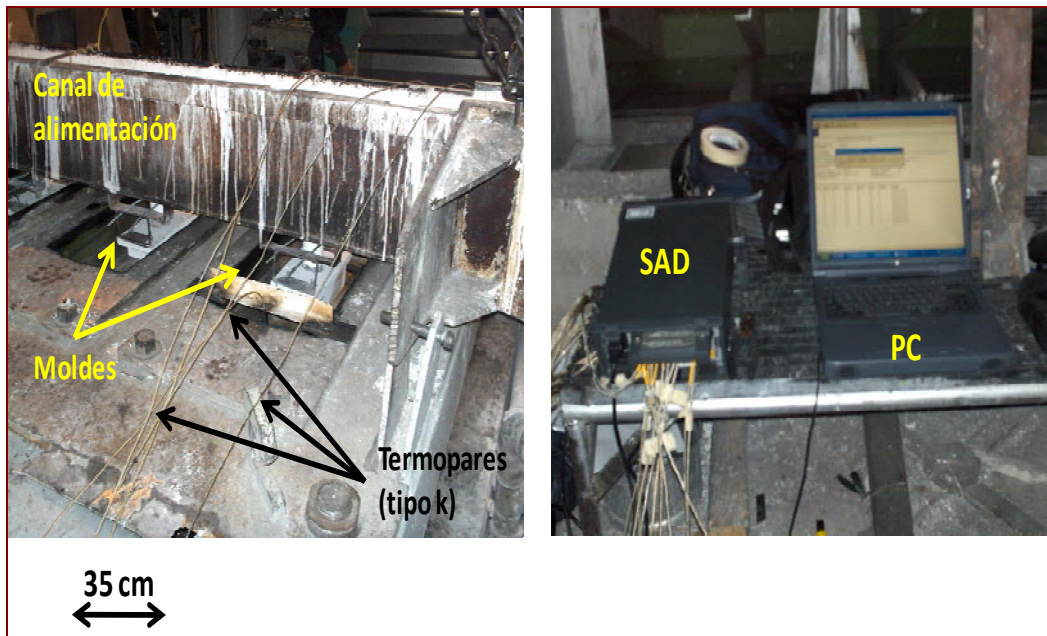


Figura 5.4 Instalación de los termopares, sistema de adquisición de datos y computadora.

5.2 Curvas de solidificación y sistema de enfriamiento.

Para verificar la rapidez de enfriamiento a lo largo del lingote y en los extremos del ancho, se diseñó el siguiente procedimiento. Se insertaron cinco pares de termopares tipo *k* a diferentes distancias del lingote. La figura 5.5 muestra el arreglo en el cual quedaron los termopares dentro del lingote una vez concluido el experimento; así mismo se observa el detalle experimental en planta, del mecanismo de inserción de los termopares. En este experimento, la dificultad principal se presentó al introducir simultáneamente los termopares y colocarlos a cada extremo del ancho del lingote.

Como se aprecia en la figura 5.5: (A) el lingote se dividió en dos áreas, lado Izquierdo y Derecho, en ambas partes se ubicaron termopares desde la base hasta cierta altura, ubicados a cinco centímetros de lo que se considera las paredes del lingote, quedando la distribución de la siguiente manera:

Al fondo del molde se ubicaron 2 termopares, I-1, D-1; posteriormente otro par en el final de la sección trapezoidal de la base, I-2, D-2; el tercer par estuvo a 50 cm de distancia del par anterior, I-3, D-3; el cuarto par a 1m de distancia del tercero, I-4, D-4; y el quinto y último par a 1.2 m de distancia del par anterior, I-5, D-5. En la parte (B) se aprecia el arreglo de la colocación de los termopares.

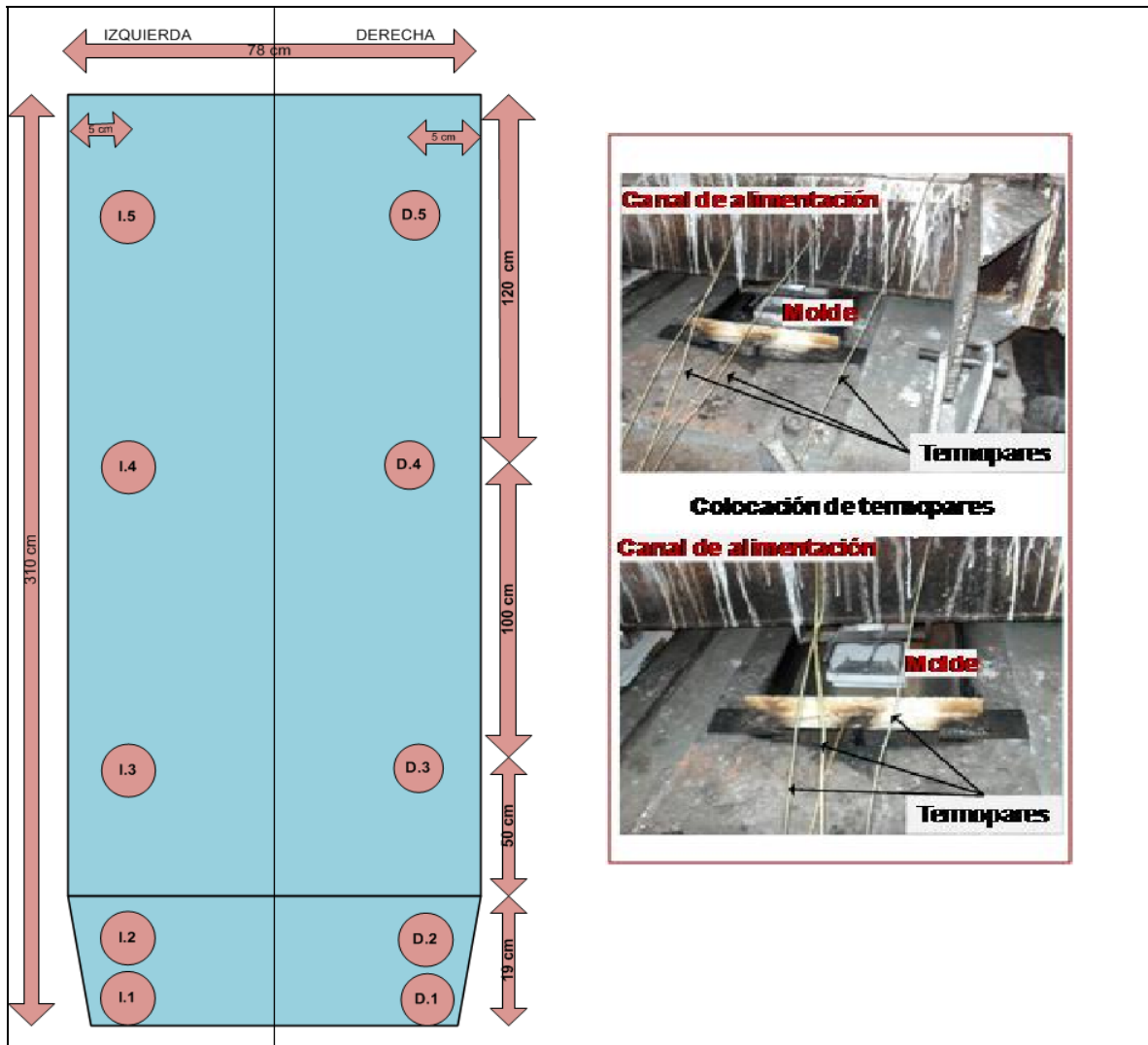


Figura 5.5 Experimento número 2(A) esquema de ubicación de los termopares en el lingote, (B) arreglo de la colocación de los termopares en planta.

5.3 Análisis y resultados de la prueba de estabilidad térmica.

La figura 5.6 muestra las mediciones de temperatura registradas para esta prueba. Como se puede observar, en principio, no existe una variación considerable para las lecturas obtenidas desde los diferentes puntos sobre la superficie líquida del lingote. En el caso de las lecturas que registraron variación, éstas se estimaron que fueron debido a la turbulencia por el movimiento del aluminio líquido al llenar el molde. Se observa, además, que las lecturas registradas por los termopares D-C 1 y D-C 3 se encuentran muy por debajo de la temperatura de solidificación

de la aleación procesada. Este resultado puede significar dos cosas: que la lectura de temperaturas podría venir de una zona baja del lingote, en donde la solidificación ya tuvo lugar, o bien, que el termopar quedó “flotando” por arriba del líquido, detectando una menor temperatura. Debido a que el termopar se pudo recuperar y no se incrustó en el lingote, la interpretación que se dio a los resultados es el de la segunda opción. Por otro lado, no hubo lectura de los datos generados por el termopar I-S-2, debido a que durante el desarrollo de la prueba, éste dejó de funcionar.

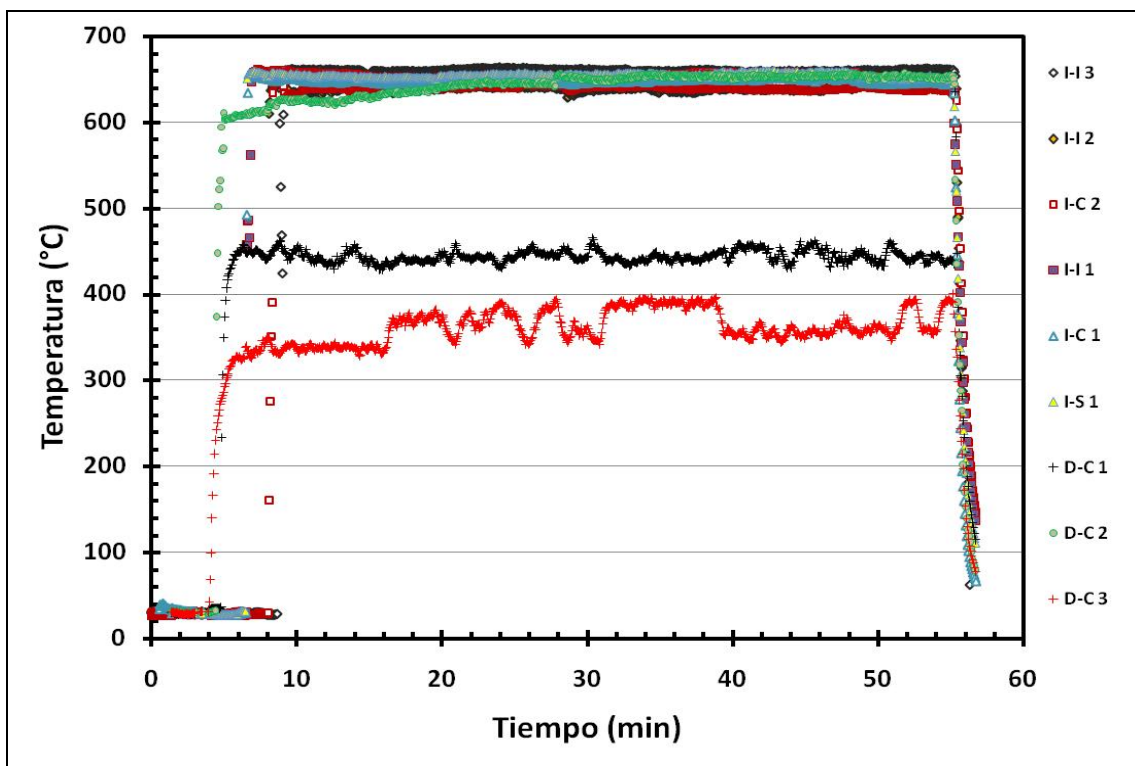


Figura 5.6 Temperaturas en la superficie del lingote medidas durante la prueba # 1.

La figura 5.7 es una ampliación de los resultados mostrados en la figura 5.6. Esta figura permite observar con mayor precisión las variaciones de temperatura medidas en las cuales se presenta una dispersión de hasta 20° C. Por ejemplo, el termopar I-C 3 registró una temperatura promedio de 660° C, la cual es la temperatura de solidificación del aluminio puro, mientras que las temperaturas registradas por los termopares I-I 2, I-C 2, I-I 1, I-C 1, y I-S 1, están por debajo

del punto de solidificación. Finalmente el termopar D-C 2 muestra un incremento continuo de temperatura, el cual se supone fue debido al movimiento del metal líquido al llenar el molde.

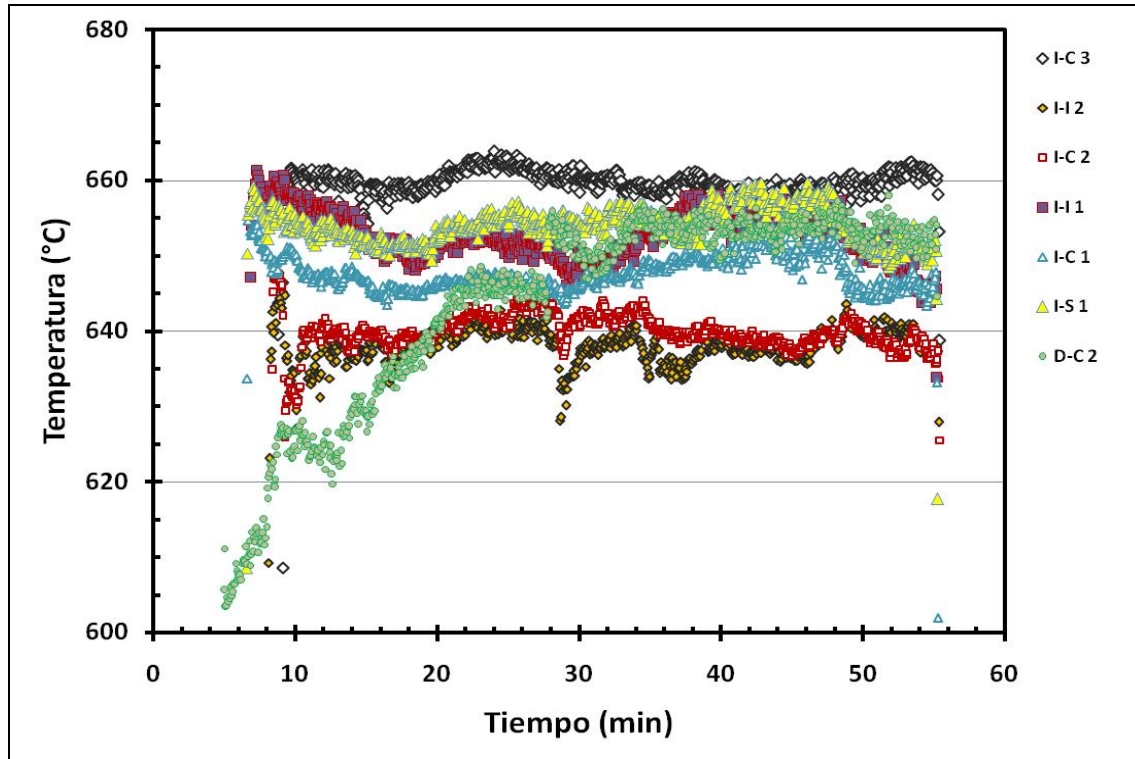


Figura 5.7 Amplificación de la lectura del experimento # 1 mostrando la variación de temperaturas en la superficie del lingote durante la colada semicontinua.

El esquema de la figura 5.8, hace posible la comparación entre las temperaturas detectadas en las diferentes regiones de la superficie del lingote. De acuerdo con esta figura, los resultados esperados, si el enfriamiento es simétrico y homogéneo, serían similares para los siguientes pares de sensores: I-C 3, D-C 3; I-C 2, D-C 2, I-C 1, D-C 1; I-S 2, I-I 2; y I-S 1, I-I 1. Además, se esperaría que la temperatura ascendiera de la periferia del molde hacia su interior, debido al contacto del molde con el agua de enfriamiento. Así, la secuencia de temperatura, de manera ascendente, debería ser: I-C-3, I-C 2, I-C 1 y D-C 3, D-C 2, D-C 1 a lo ancho del lingote. Mientras que para el espesor se tendría I-S 2, I-C 2; I-S 1, I-C 1, I-I 2, I-C 2; I-I 1, I-C 1. Sin embargo no se encontró esta secuencia.

Las figuras 5.9, 5.10 y 5.11 muestran las lecturas de temperatura detectadas por los termopares distribuidos de la siguiente manera:

- Los termopares I-C3, I-C 2, I-C 1 y D-C 2, fueron colocados a lo ancho, justo en la línea simétrica, de lo que será al final el lingote.
- Los termopares I-I 1 y I-S 1 se colocaron a una distancia de 12 cms del termopar I -C 1, a 180° uno del otro sobre el espesor del lingote.
- Los termopares I-I 2, I-I 1 y I-S 1, quedaron cerca de la línea de interface molde-metal

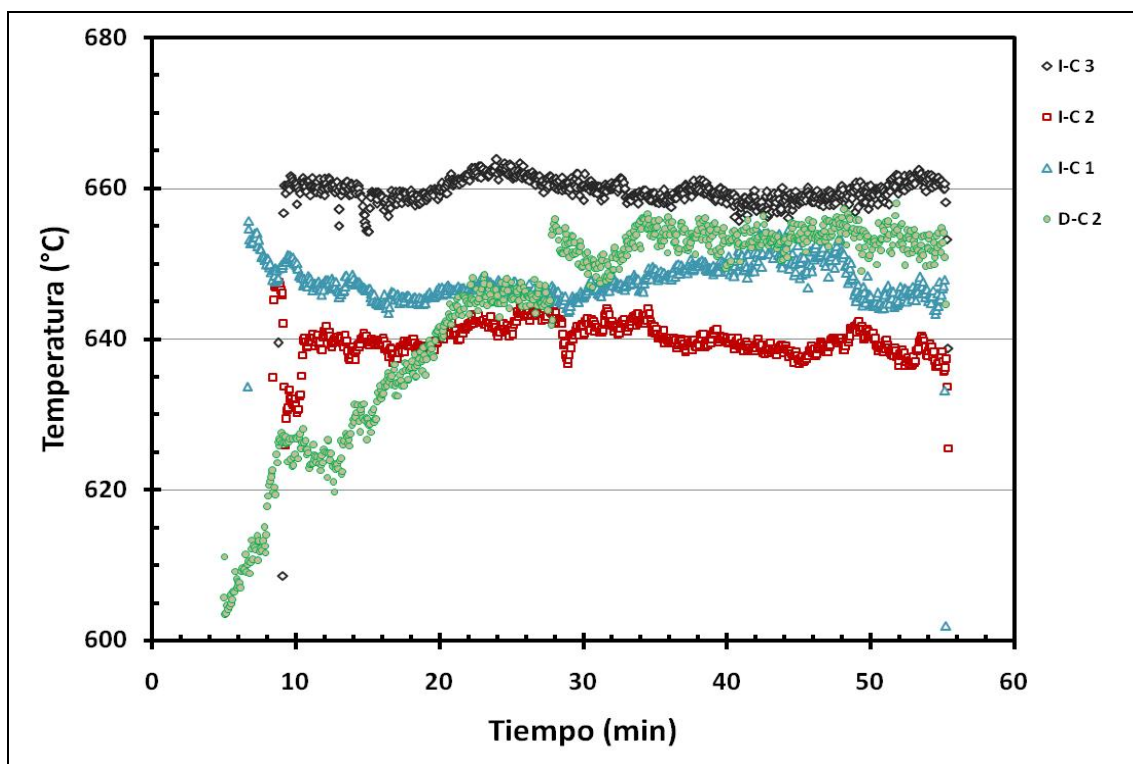


Figura 5.8 Gráfico de lecturas generadas por los termopares I-C 3, I-C 2, I-C 1 y D-C 2.

Como se muestra en la figura 5.8, sobre la línea de simetría del molde, hubo una diferencia de temperatura de hasta 20° C, esta diferencia se observó en los termopares I-C3 e I-C 2, los cuales se colocaron a una distancia de 17 cm entre sí. Como se mencionó anteriormente, se esperaba que la temperatura disminuyera desde el centro del vaciado hacia los extremos del molde, sin embargo el registro de lecturas en ambos termopares fue más alta en el extremo del molde y baja

hacia el centro. La temperatura registrada por el termopar I -C 1, ubicado más cercano al centro, fue intermedia entre los dos anteriores. Por otro lado la lectura registrada por los termopares D-C 2, I -C 3 fue similar hacia el final de las lecturas.

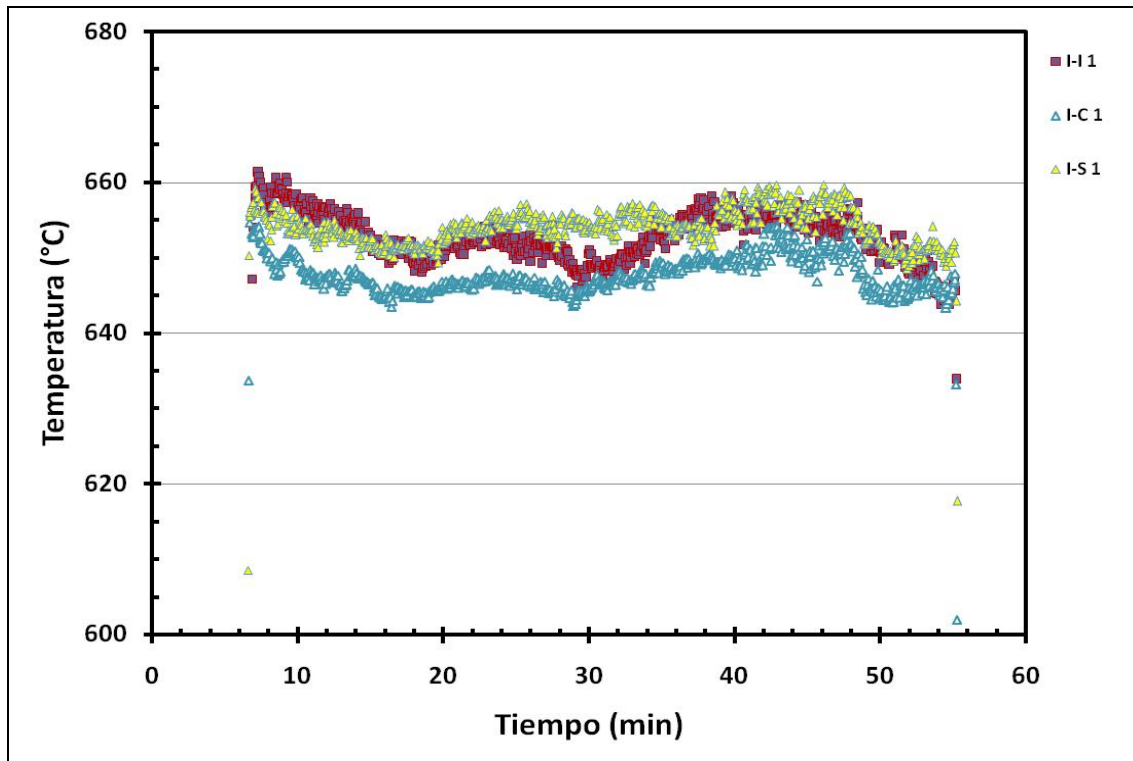


Figura 5.9 Gráfico de lecturas generadas por los termopares I-I 1, I-C 1 e I-S 1.

La figura 5.9 muestra las lecturas de los termopares que fueron colocados cercanos al centro del vaciado, el I-I 1 e I-S 1 estuvieron a una distancia de 12 cm del I-C 1 y a 180° uno del otro. Como se puede apreciar, el registro de lectura generado por éstos, es más homogéneo a diferencia de las lecturas de los termopares I-C 3, I-C 2 y D-C 2. Sin embargo, las lecturas quedaron por debajo del punto de solidificación, pudiendo apreciar variaciones. Comprobando una vez más que la extracción de calor fue asimétrica ya que los termopares I-I 1 e I-S 1, que se encontraban en los extremos del lingote, tuvieron una temperatura mayor que el termopar I -C 1.

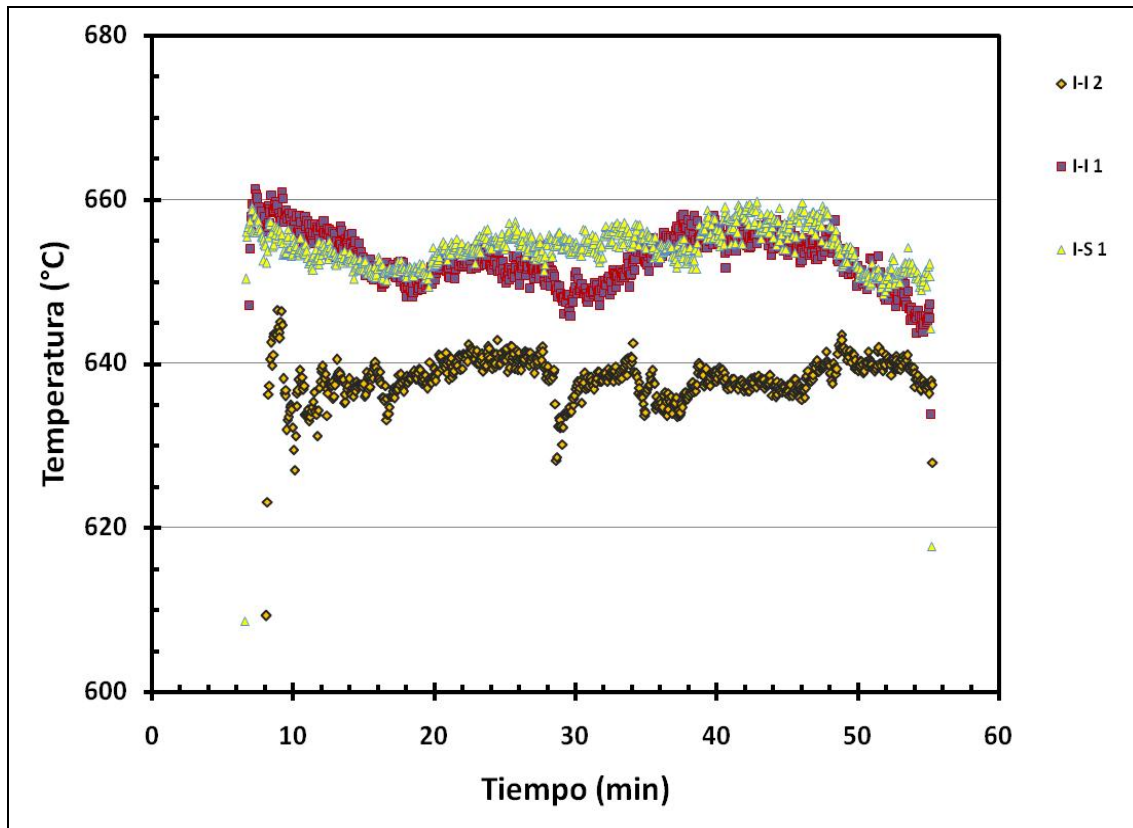


Figura 5.10 Gráfico de lecturas generadas por los termopares I-I 2, I-I 1 y I-S 1.

La figura 5.10 presenta el registro de las lecturas generadas por los termopares I-I 2, I-I 1 e I-S 1 respectivamente, en éste caso era de esperarse que los valores de temperatura fueran decrecientes del centro hacia los extremos, lo cual se cumplió, es decir que los termopares I-I 1 e I-S 1 registrarán temperaturas mayores que el termopar I-I 2.

5.4 Análisis y resultados de la determinación de las curvas de solidificación.

En la figura 5.11 se observan las curvas de enfriamiento para diferentes regiones del lingote. Cada una de éstas, muestra el registro de temperatura de los termopares que fueron inmersos a tiempos de 0.0, 4.0, 12.0, 27.5 y 44.0 minutos en el lingote, y que corresponden con las distancias señaladas en la figura 5.5. Estas curvas representan la variación de la temperatura con respecto al tiempo

(dT/dt). La velocidad de enfriamiento determinada para estas curvas se presenta en la tabla 5.1.

La rapidez de enfriamiento calculada al inicio de la colada, fue del orden de $1100^{\circ}\text{C}/\text{min}$, de los termopares I-1, D-1, este valor parecería demasiado elevado, sin embargo, el aluminio al inicio de la colada, se vierte directamente sobre la sección trapezoidal del molde hasta que se solidifica; una vez llena esta sección del molde, el bloque comienza a bajar a una velocidad constante, reduciendo con ello el tiempo de residencia del aluminio en el molde durante el enfriamiento primario.

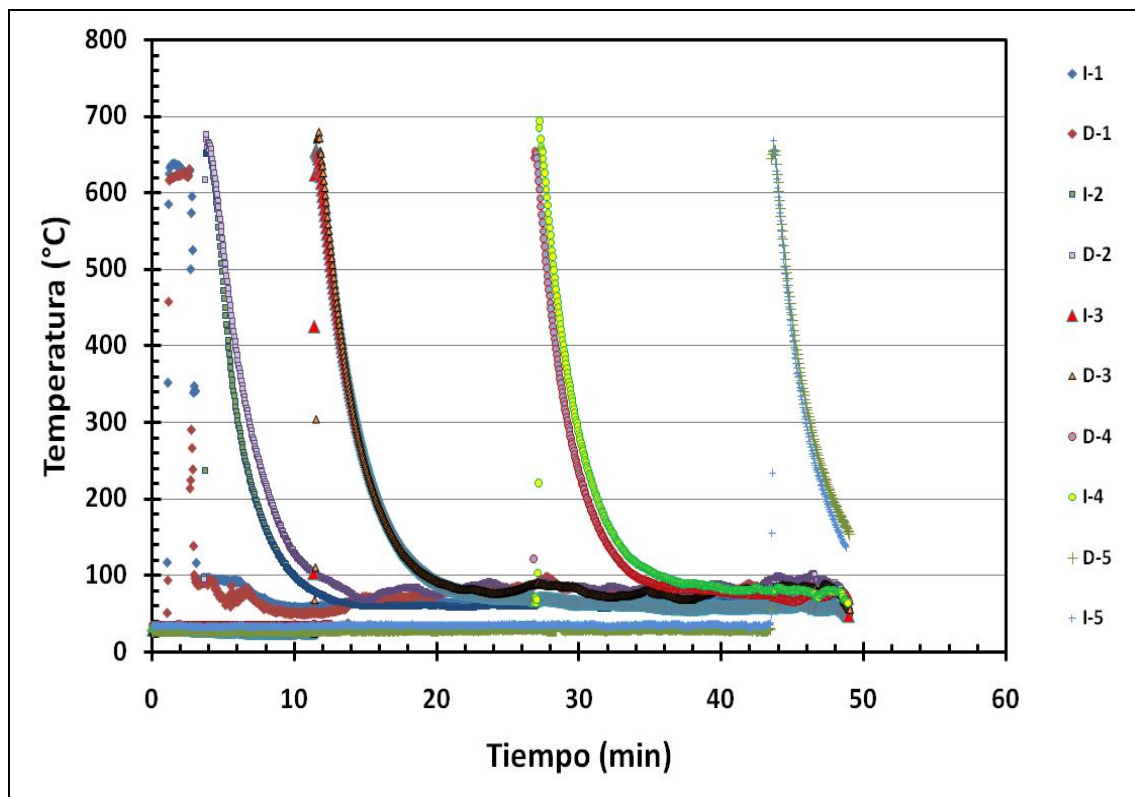


Figura 5.11 Curvas de enfriamiento a lo largo de un lingote de aluminio.

Como consecuencia, la rapidez de enfriamiento disminuye considerablemente, estabilizándose para los termopares que se insertaron posteriormente (termopares I-2, I-3, I-4, I-5, D-2, D-3, D-4, D-5). Se puede apreciar que a partir del termopar I-2 la extracción de calor es igual a lo largo de todo el lingote, equivalente a un promedio de $162^{\circ}\text{C}/\text{min}$.

Tabla 5.1 Rapidez de extracción de calor.

Termopar	ΔT (°C)	Δt (min)	dT/dt (°C/min)
I-1	512.70	0.45	-1139.33
D-1	539.20	0.45	-1198.22
I-2	382.07	2.3	-166.12
D-2	381.56	2.34	-163.06
I-3	401.16	2.45	-163.74
D-3	404.36	2.5	-161.74
D-4	366.48	2.25	-162.88
I-4	337.78	2.1	-160.85
D-5	265.30	1.6	-165.81
I-5	266.79	1.6	-166.74

La figura 5.12, presenta los resultados por pares de termopares a lo ancho del lingote. Se puede observar que las curvas obtenidas a cada uno de los extremos, a lo ancho del lingote, son similares, demostrando con ello que el enfriamiento ocurre a velocidad constante, es decir, en la máquina de colada semicontinua de IMASA se puede considerar que dT/dt es constante.

5.5 Resultados experimentales en otra máquina de colada semicontinua.

Con la finalidad de comparar los resultados llevados a cabo en IMASA, se realizaron dos experimentos semejantes en la máquina de colada semicontinua de ECKO, cuyo sistema de enfriamiento secundario tiene algunas variantes, el comportamiento fue similar como se observa en las figuras 5.13 y 5.14 del experimento # 1 y las figuras 5.15 y 5.16 del experimento # 2. Mostrando en las

graficas de temperaturas de la superficie superior de un lingote y la curva de enfriamiento durante la solidificación; que las tendencias son parecidas.

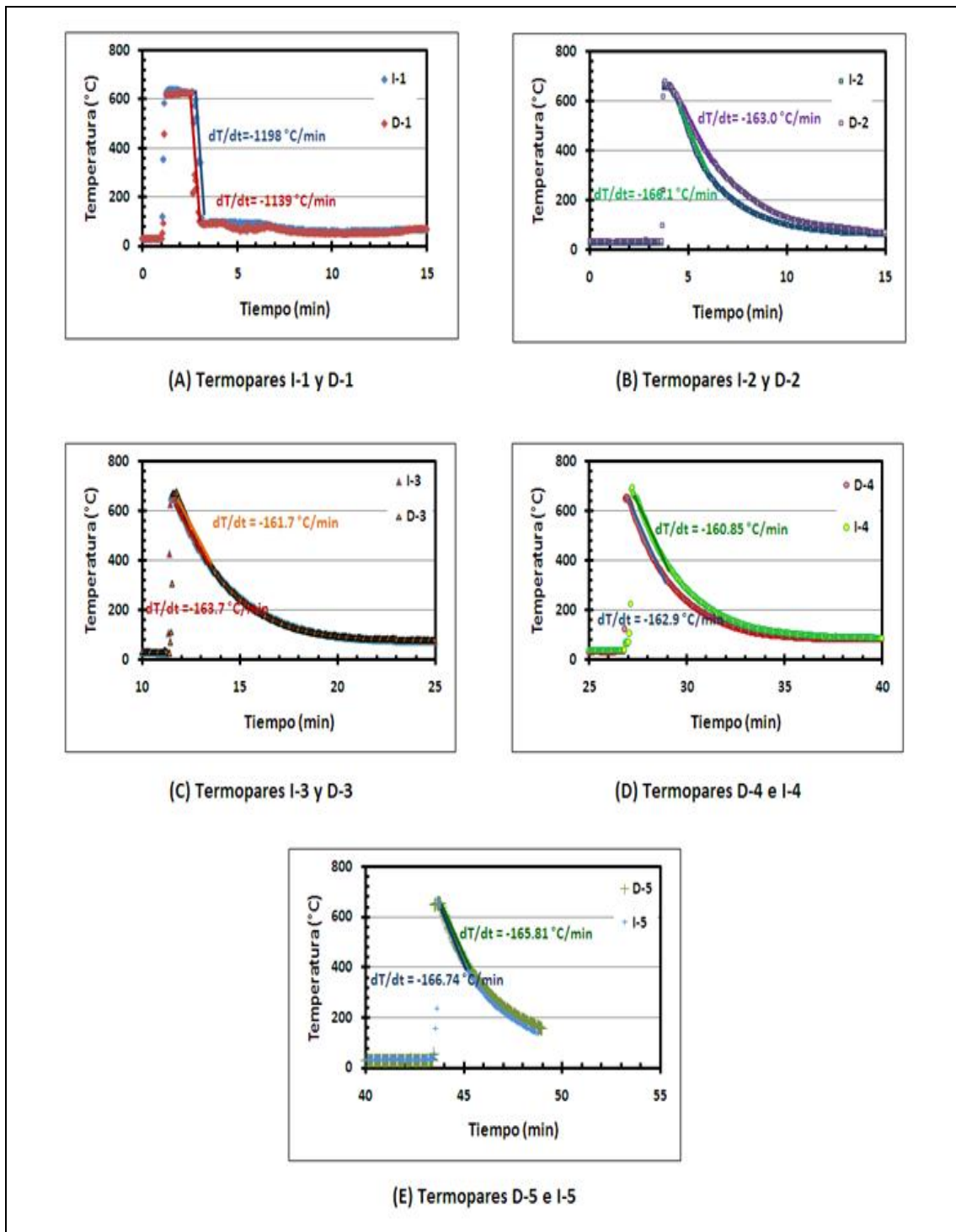


Figura 5.12 Valores de enfriamiento por pares de termopares(A, B, C, D, y E).

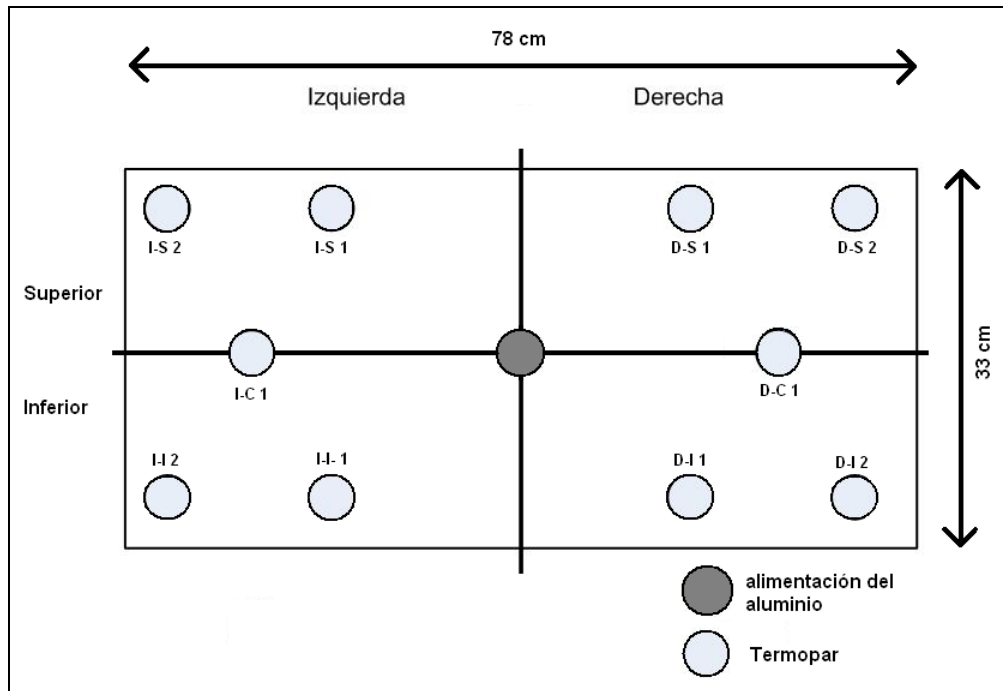


Figura 5.13 Posición de los termopares en la superficie del molde de la planta Ecko (experimento # 1).

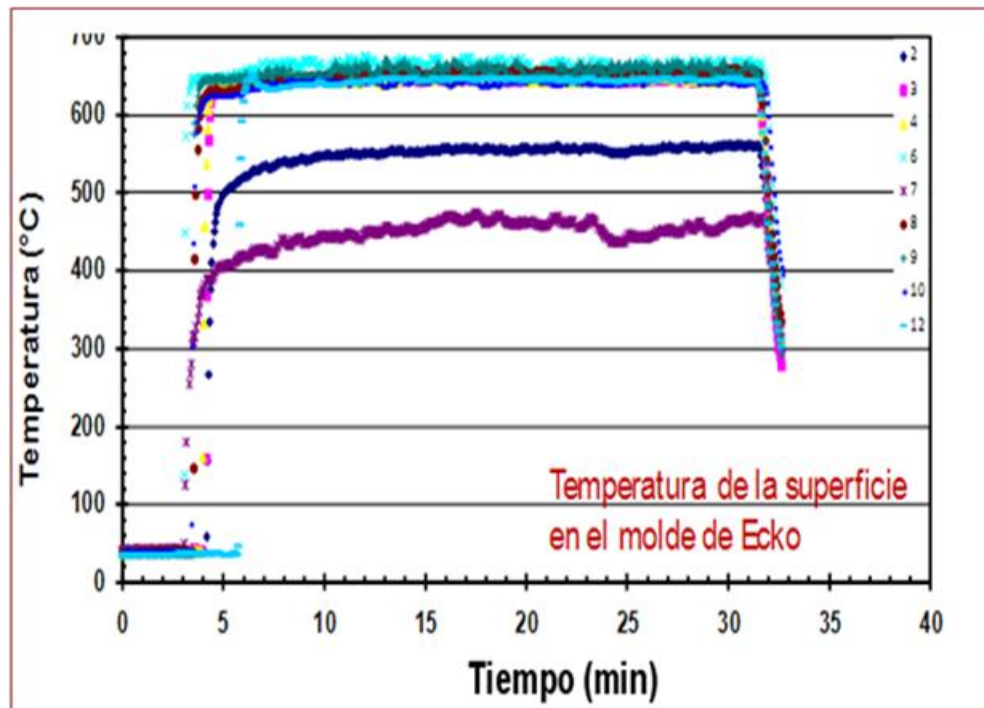


Figura 5.14 Temperaturas en la superficie del lingote medidas durante el experimento # 1 en la planta Ecko.

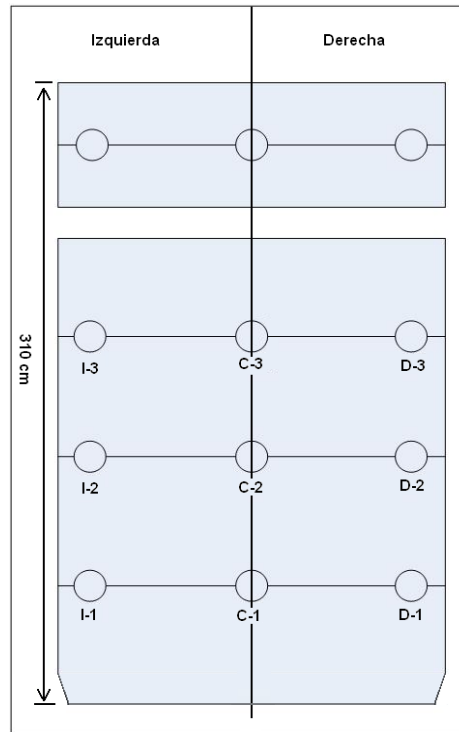


Figura 5.15 Colocación de los termopares en el lingote.

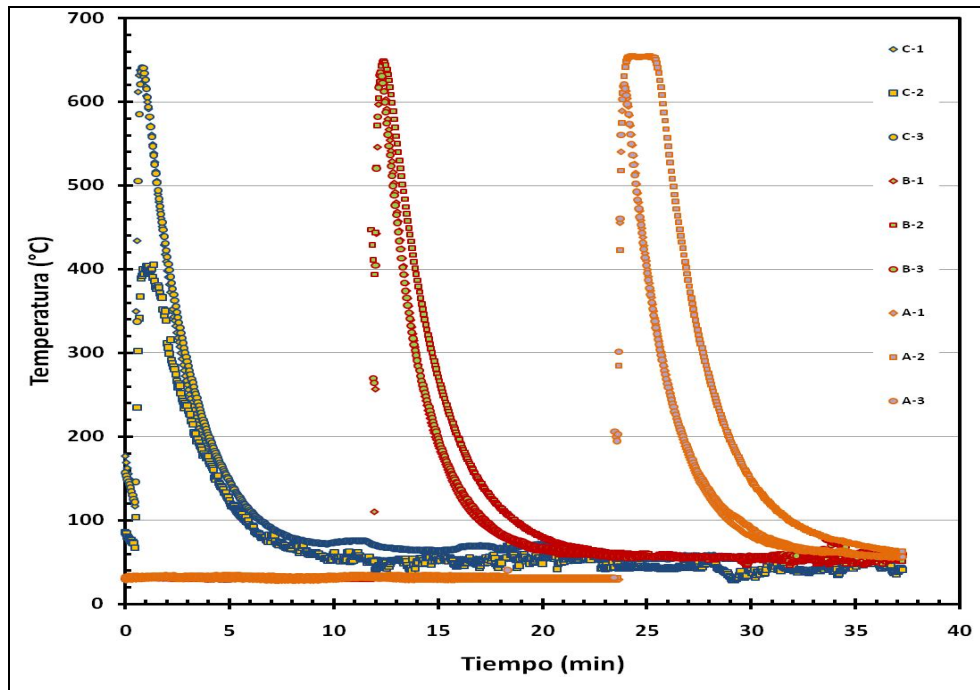


Figura 5.16 Curvas de enfriamiento durante la solidificación de un lingote en el experimento # 2.

En relación al segundo experimento, se determinó que la velocidad de solidificación es similar al proceso de IMASA, encontrando un valor promedio de $150^{\circ}\text{C}/\text{min}$, comparado con el de IMASA que fue alrededor de $162^{\circ}\text{C}/\text{min}$. La diferencia en la rapidez de enfriamiento, radicó en la forma de cómo se realizó el enfriamiento. En el caso de Ecko, éste se llevó a cabo solamente por el agua que alimentaba al molde y que posteriormente salía por el fondo del mismo, por medio de una serie de orificios que formaban un efecto de cortina, el cual generó el enfriamiento secundario tal como se ilustra en la figura 5.17 al ser estas condiciones más extremas, el acabado de la superficie presento una mayor rugosidad.

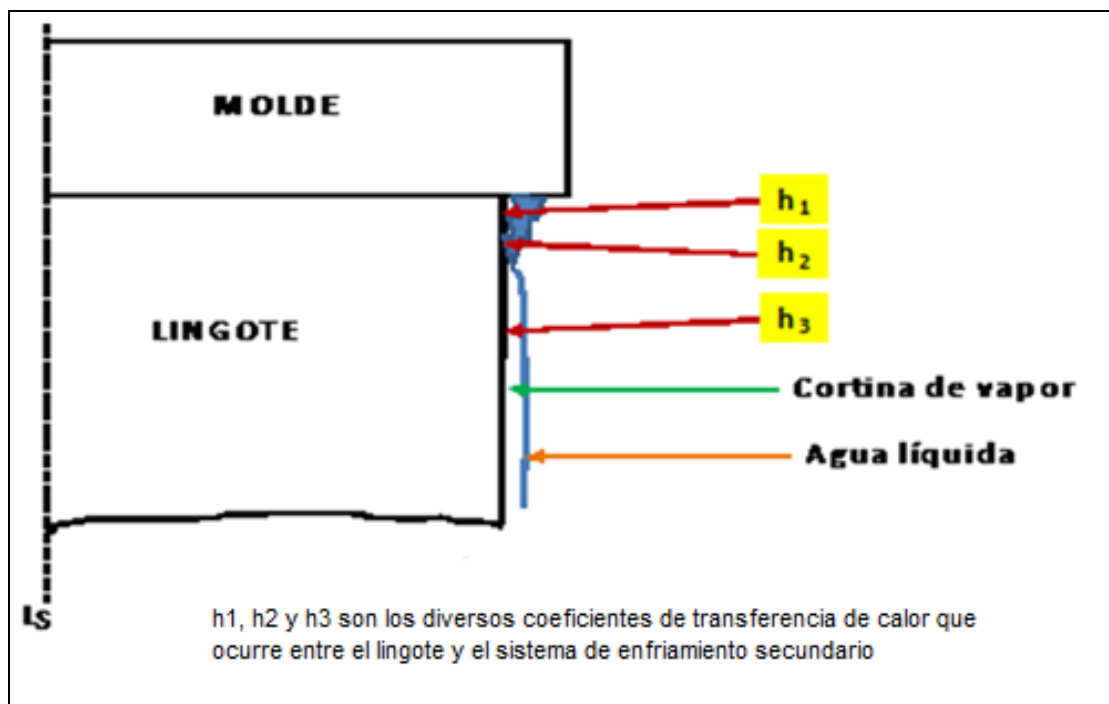


Figura 5.17 Condiciones de enfriamiento en el sistema de colada semicontinua de Ecko.

Para el caso de IMÁSA, el sistema de enfriamiento se realizó en dos etapas; la primera consistió en la distribución del agua de enfriamiento a través de la cavidad del molde, y en la segunda, la fosa se mantuvo llena de agua y al tener en ella el lingote, el enfriado fue más severo y continuo, generando una superficie más tersa. Tales características se muestran en la figura 5.18.



Figura 5.18 Acabado superficial de los lingotes procesados, generados en los experimentos llevados a cabo en IMÁSA y Ecko.

5.6 Medición de temperatura del agua empleada durante el enfriamiento de los lingotes de aluminio.

Otro parámetro de proceso importante es el cambio de temperatura del agua utilizada para el enfriamiento. Para estimar el calor extraído por el agua de la fosa, se colocaron 2 termopares tipo k , uno al fondo de la fosa y otro en la superficie a la altura del nivel del agua. Los resultados de estas mediciones se muestran en la figura 5.19. Para los dos tipos de experimentos realizados en la presente investigación, fue evidente el marcado incremento de la temperatura conforme el lingote se iba formando.

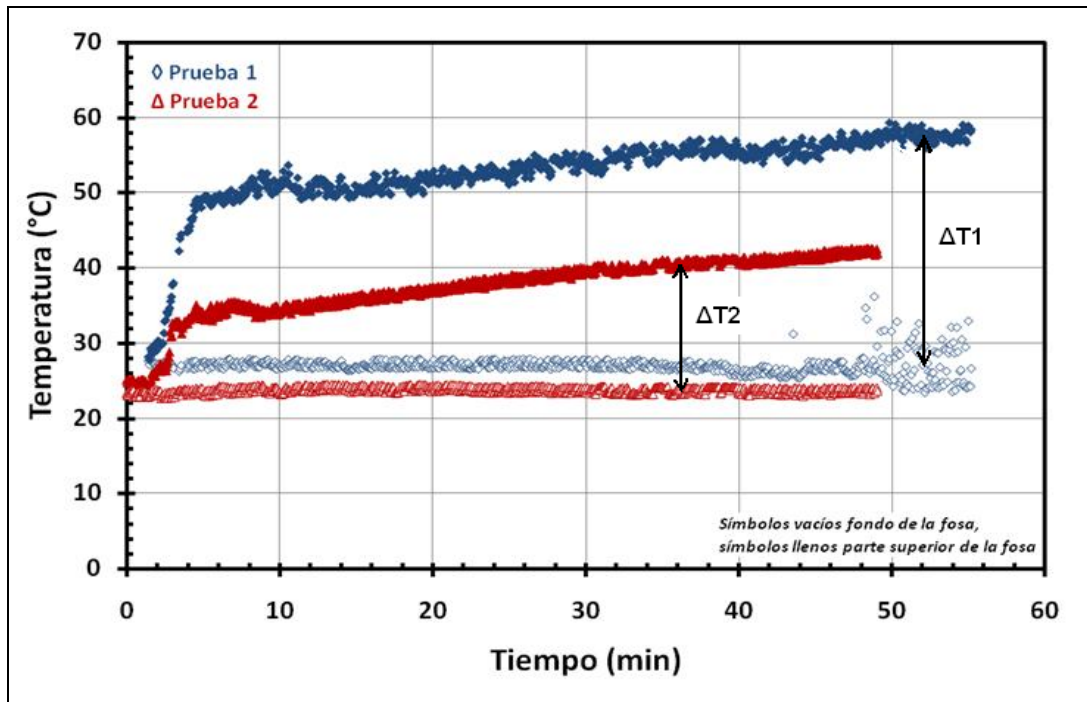


Figura 5.19 Temperatura del agua de enfriamiento al fondo de la fosa y a la altura del nivel del agua, para las pruebas # 1 y # 2 respectivamente.

Se observa un menor incremento de temperatura para la prueba de rapidez de enfriamiento, debido al menor tamaño del lingote que el procesado en la prueba de simetría térmica. En la tabla 5.2 se proporcionan las dimensiones de los lingotes producidos durante los experimentos. La tabla 5.3 presenta algunas de las propiedades termo físicas del agua y el aluminio utilizados [2,3].

Tabla 5.2 Dimensiones de los lingotes producidos en el experimento.

Experimento	Dimensión (m)			*Volumen de lingote (m ³)
	Largo	Ancho	Espesor	
1	3.10	1.25	0.33	1.278
2	3.10	0.78	0.33	0.795

*Considera el volumen total del lingote, es decir incluye la sección trapezoidal de la base del lingote.

Tabla 5.3 Propiedades termo físicas del agua y del aluminio empleados en el experimento.

Variable o Propiedad	Valor	Unidades
Agua		
Densidad (ρ)	1000	Kg/m ³
Capacidad calorífica (C_p)	4180	J/kg °K
Aluminio		
Densidad (ρ)	2700	Kg /m ³
Calor latente de solidificación ΔH_{sol}	-391 000	J/ kg

La figura 5.20 muestra la lectura obtenida del agua de enfriamiento en cada uno de los experimentos llevados a cabo, el valor promedio de la temperatura del agua de enfriamiento fue de: 24.9° C para la prueba # 1 y para la prueba # 2 fue de 13.6° C. Con estos datos, además de conocer la cantidad de agua empleada en el sistema, fue posible establecer un balance térmico durante la etapa de solidificación de la aleación empleada.

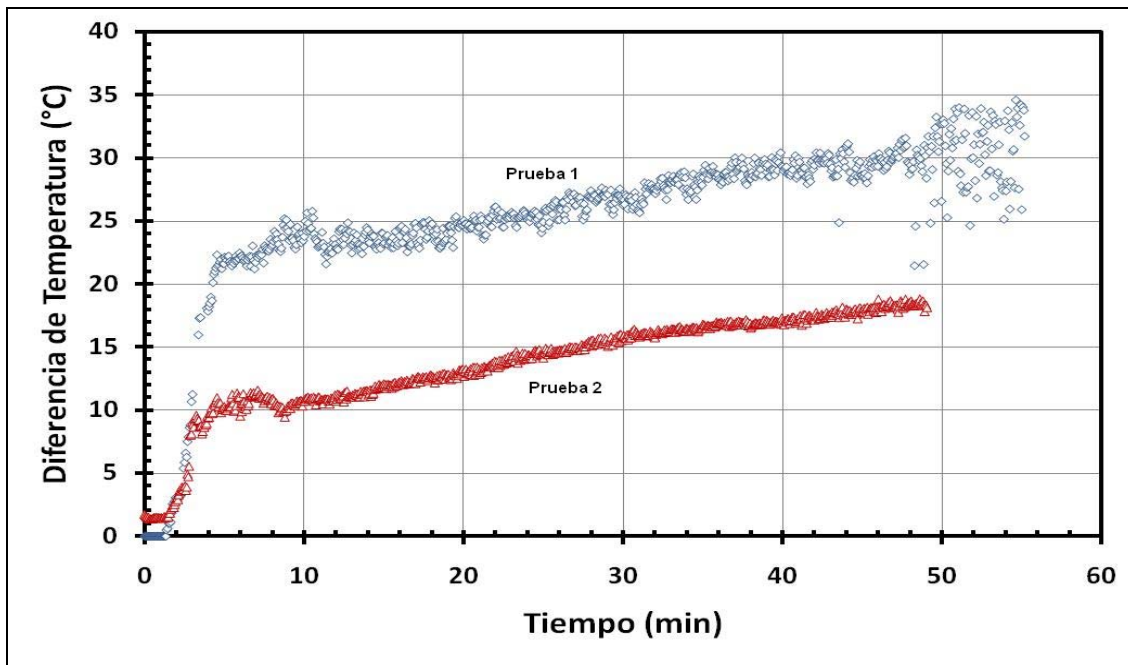


Figura 5.20 Promedio de temperatura del agua de enfriamiento para las pruebas # 1 y # 2 respectivamente.

La tabla 5.4 muestra la información de los flujos volumétricos del sistema de enfriamiento de los moldes, para llegar a un promedio

Tabla 5.4 Flujos volumétricos

No de prueba	Aleación	Variación de flujo volumétrico en m ³ /min		Promedio de flujo volumetrico
		Max	Min	
1	1XXX	1.6	1.8	1.7
2	3XXX	1.6	2.0	1.8

5.7 Interpretación del análisis térmico.

La tabla 5.5 presenta las dimensiones de los lingotes obtenidos durante los experimentos.

Tabla 5.5 Dimensiones de los lingotes experimentados.

Dimensión	Lingote experimento	
	# 1	# 2
Largo (m)	3.1	3.1
Ancho (m)	1.25	0.78
Espesor (m)	0.33	0.33
Base trapecio (m)	0.2	0.2
Largo trapecio (m)	1.13	0.705
$V_{\text{trapecio}} \text{ (m}^3\text{)}$	0.079	0.049
$V_p \text{ (m}^3\text{)}$	1.196	0.746
$V_{\text{lingote}} \text{ (} V_{\text{trapecio}} + V_p \text{) (m}^3\text{)}$	1.275	0.795
$V_t = V_{\text{lingote}} * 3 \text{ (m}^3\text{)}$	3.825	2.385

5.8 Calor removido por el agua de enfriamiento.

El balance térmico del sistema de la colada semicontinua se llevó a cabo en dos etapas que consistieron en determinar el calor removido por el agua de enfriamiento y el calor liberado por los lingotes.

La tabla 5.6 presenta los valores del calor removido con la cantidad de agua de enfriamiento utilizada. Para el cálculo se utilizaron los parámetros de la tabla 5.3 y la ecuación 3.3.

Tabla 5.6 Calor removido por el agua de enfriamiento.

Variable ó Propiedad	Experimento # 1	Experimento # 2
Q (m ³ /min)	1.7	1.8
ρ (kg/ m ³)	1000	1000
C _p (J/kg/°C)	4180	4180
ΔT (°C)	24.9	13.6
q (W)	1.77 x 10 ⁸	1.02 x 10 ⁸
t _{exp} (min)	52	46
q (J)	9.20 x 10 ⁹	4.71 x 10 ⁹

La tabla 5.7 presenta los valores del calor liberado por el lingote durante la solidificación, obtenidos utilizando los datos de la tabla 5.3 y la ecuación 3.5.

Tabla 5.7 Calor liberado por el lingote durante la solidificación.

Variable ó Propiedad	Experimento # 1	Experimento # 2
ρ Al(kg/m ³)	2700	2700
vol (m ³)	3.825	2.385
ΔH _s (J/kg)	-391000	-391000
q (J)	4.04 x 10 ⁹	2.52 x 10 ⁹

5.9 Balance de energía entre el calor removido por el agua de enfriamiento y el generado por el lingote.

La tabla 5.8 resume los resultados de las energías generadas por el lingote y la absorbida por el agua de enfriamiento.

Tabla 5.8 Relación de energía.

Experimento	Calor absorbido por el agua (J)	Calor liberado por los lingotes (J)	Relación energética
1	9.20 X 10⁹	4.04 X 10⁹	2.28
2	4.71 X 10⁹	2.52 X 10⁹	1.87

Como se puede observar, la cantidad de energía que removió el agua en la fosa de enfriamiento fue mayor que la requerida en el enfriamiento primario del proceso de solidificación de los lingotes.

5.10 Resumen de la experimentación en planta.

De los experimentos realizados en planta, se puede mencionar lo siguiente:

- El sistema de colada semicontinua no es térmicamente simétrico.
- El aluminio no presenta ninguna resistencia térmica durante el proceso de solidificación, y
- Derivado del cálculo de relación de energía, se observa que se emplea más agua de la necesaria, para llevar a cabo el enfriamiento y solidificación de los lingotes producidos,

5.11 Referencias.

- [1] Méndez. C., Sánchez C., Plascencia G., Rubio M., Jaramillo D., "Thermal Assessment of the casting operation at IMASA Shop"., 139 light Metals J.A Johnson, Ed., TMS, USA, 2010, pp 715-719.
- [2] Bejan A., Heat Transfer, Wiley, New York, USA, 1993.
- [3] P Incropa. F. & P Drwit. D., Fundamentals of Heat & Mass Transfer 4th Ed., Wiley, New York, USA, 1996.

Capítulo 6 Pruebas de laboratorio.

Los experimentos que durante esta etapa se realizaron, soportan los resultados de la experimentación en planta y con los estudios adicionales, el proyecto se enriquecerá

6.1 Construcción de una máquina de colada semicontinua.

Para auxiliar el entendimiento del proceso de colada del aluminio, se construyó una maquina de colada semicontinua. La figura 6.1 y 6.2 muestran un esquema de la maquina y equipo. Con estos fue posible determinar el efecto del flujo volumétrico del agua sobre la microestructura de solidificación de dos tipos de aleaciones de aluminio (1100 y 3004) [1].

Este proceso consistió en que el metal fundido se vaciara a un molde, el cual extrae calor de la aleación a solidificar en forma controlada, a medida que esto sucede se va removiendo del molde, a la vez que se alimenta más metal, controlando en todo momento la temperatura, velocidad de colada y el flujo volumétrico del agua de enfriamiento [2-4].

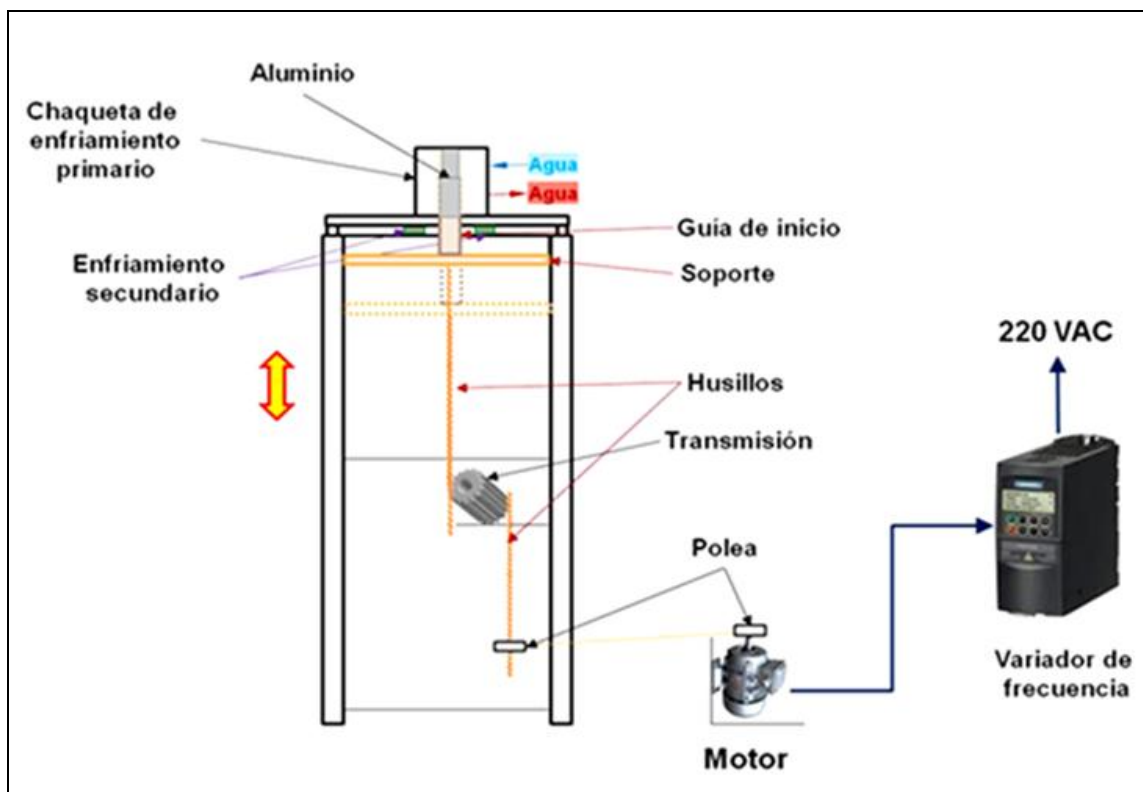


Figura 6.1 Esquema de máquina de colada continua en laboratorio.

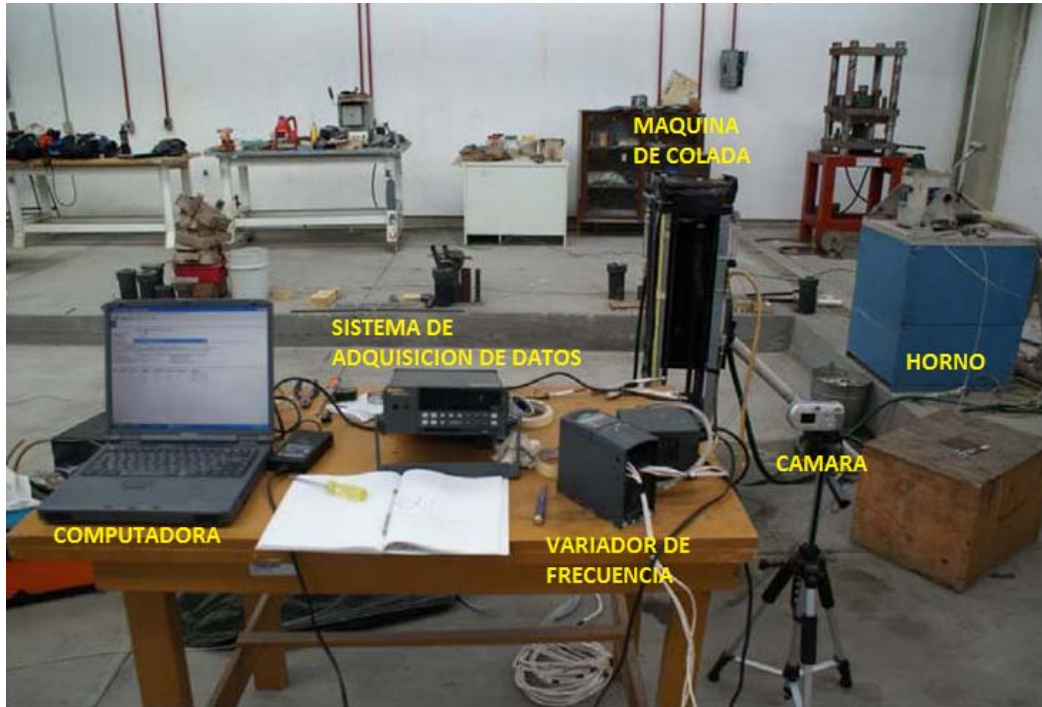


Figura 6.2 Arreglo del equipo empleado en laboratorio.

En la figura 6.3 se aprecia el molde utilizado en la experimentación, y se resaltan las partes clave que conforman el sistema de enfriamiento.

Para controlar la cantidad de agua utilizada en el enfriamiento de la aleación, se instalaron 2 flujómetros, que ayudaron a determinar la cantidad de agua de entrada y salida del sistema, además se adaptaron termopares para medir la temperatura generada durante dicho proceso. Esto se puede apreciar en la figura 6.4 y la figura 6.5 que presentan el sistema de enfriamiento secundario.

6.2 Pruebas de colada continua en laboratorio.

Se realizaron nueve coladas, ocho de ellas con aleación 1100 y una con 3004. El peso de las primeras fue de 1 kg, mientras que para la 3004 fue de 0.5 kg. El diámetro interno del molde es de 4.35 cm. La longitud de los lingotes obtenidos fue de aproximadamente 25 cm, como se muestra en el Apéndice 2

El flujo primario fue regulado por una válvula de control, entre 2.0 y 9.5 litros por minuto. El flujo de enfriamiento secundario se mantuvo constante en 7.5 litros por minuto. La evolución térmica de los lingotes, considerando la temperatura del metal en el horno que fue de $690^{\circ} \pm 10^{\circ} \text{C}$, se registró por la inmersión de un termopar tipo *k*, el cual quedó inmerso en el lingote (figura 6.6).

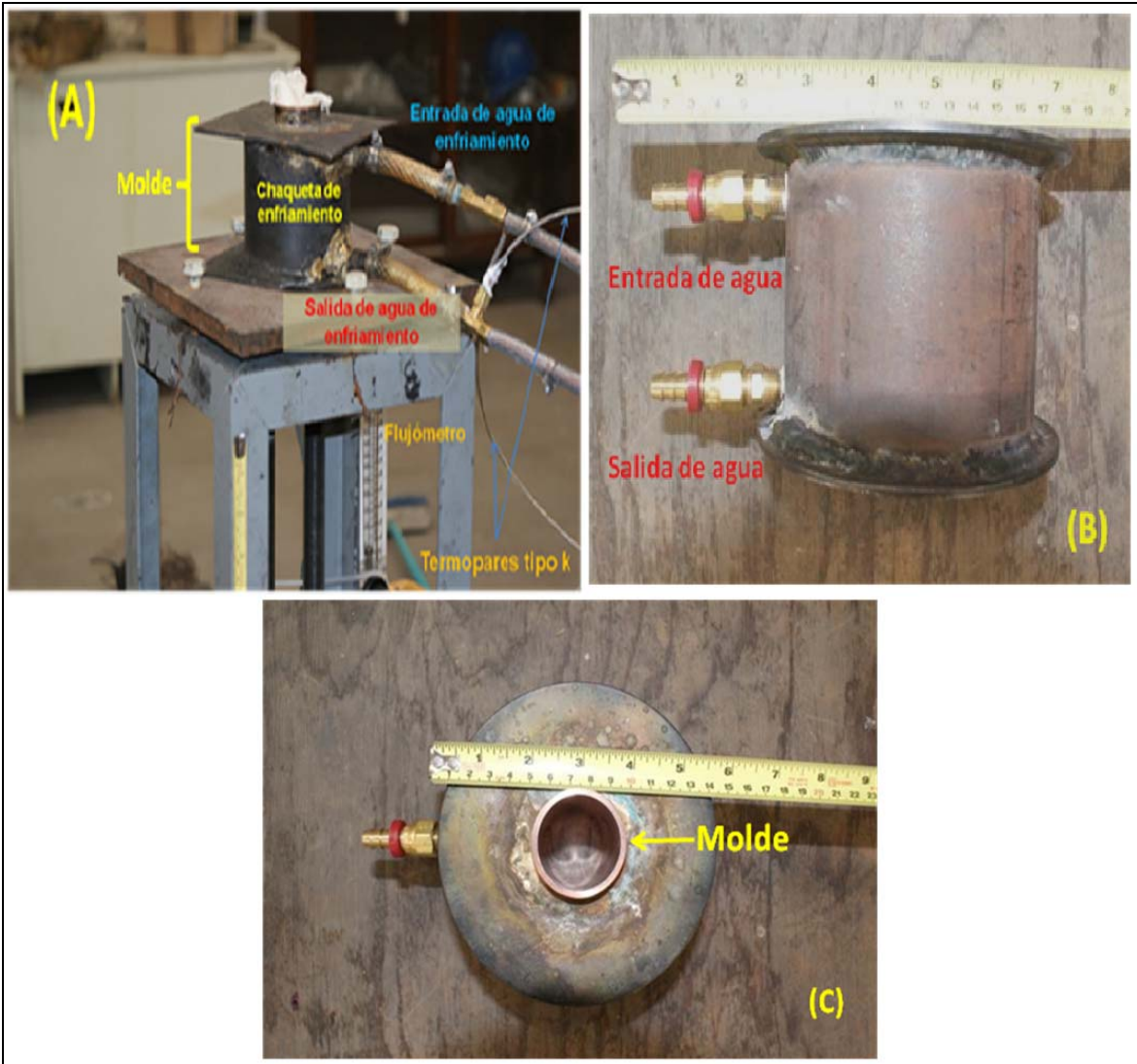


Figura 6.3 Molde para la máquina de colada semicontinua:
(A) Molde montado en la máquina; (B) Vista lateral del molde
y (C) Vista superior del molde

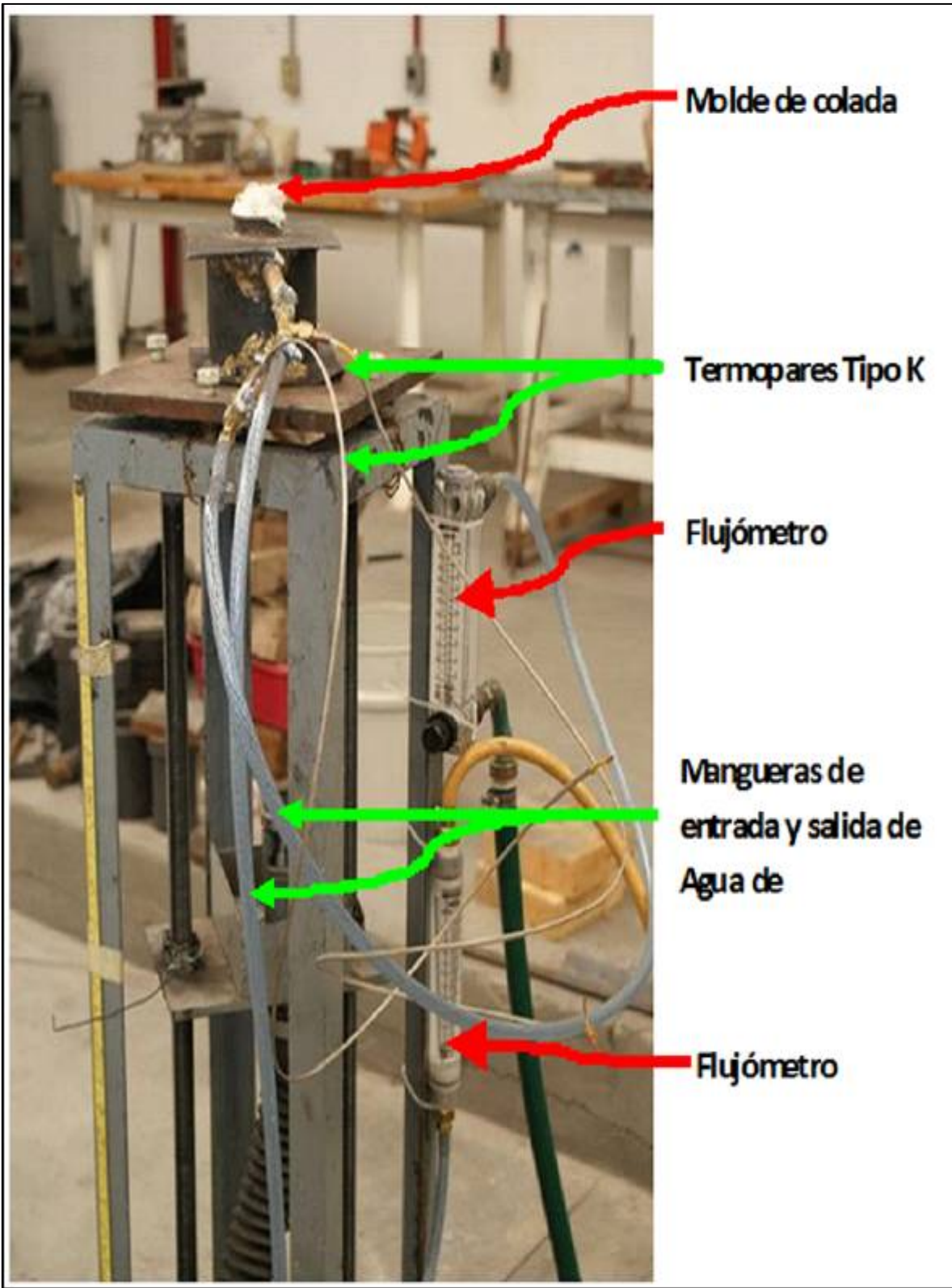


Figura 6.4 Arreglo de la máquina de colada semicontinua que muestra el equipo de control del sistema de enfriamiento

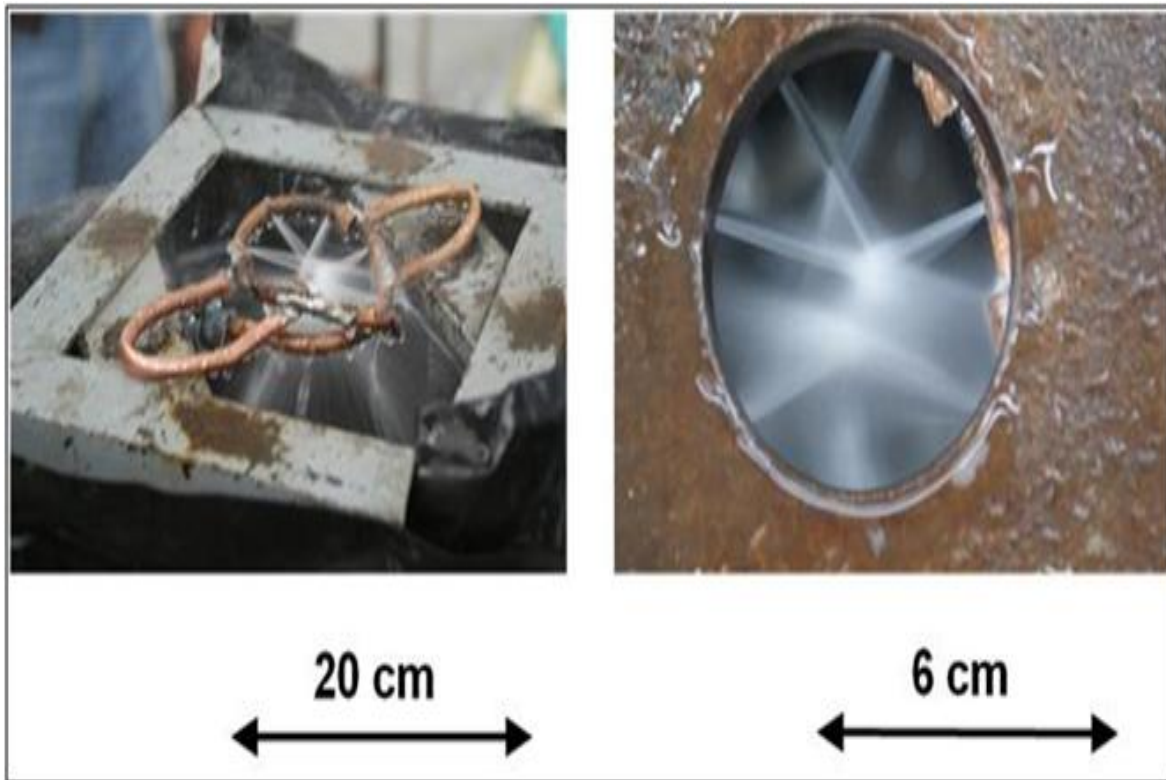


Figura 6.5 Vista superior del sistema de enfriamiento secundario de la máquina de colada semicontinua

Las variables utilizadas en los experimentos mencionados se detallan en la tabla 6.1.

Tabla 6.1 Pruebas realizadas en la máquina de colada semicontinua de laboratorio

Prueba	Flujo de agua en el sistema primario (L/min)	Velocidad de colada (cm/min)
1	9.5	8.1
2	9.5	12.5
3	9.5	17.0
4	9.5	24.0
5	9.5	42.0
6	5.0	24.0
7	2.0	24.0
8	2.0	42.0
9	2.0	42.0

El registro de temperatura del lingote se realizó cada dos segundos, a través de un sistema de adquisición de datos adaptado a una computadora (figura 6.2) [4].



Figura 6.6 Vaciado de aluminio en la máquina de laboratorio.

Una vez obtenidos los nueve lingotes, se llevó a cabo una inspección visual retirándoles las pequeñas virutas. Se les realizó al centro, un corte longitudinal obteniendo dos secciones, asignando una de ellas para las pruebas metalográficas y de dureza y la otra mitad para las pruebas de tensión (figura 6.7)

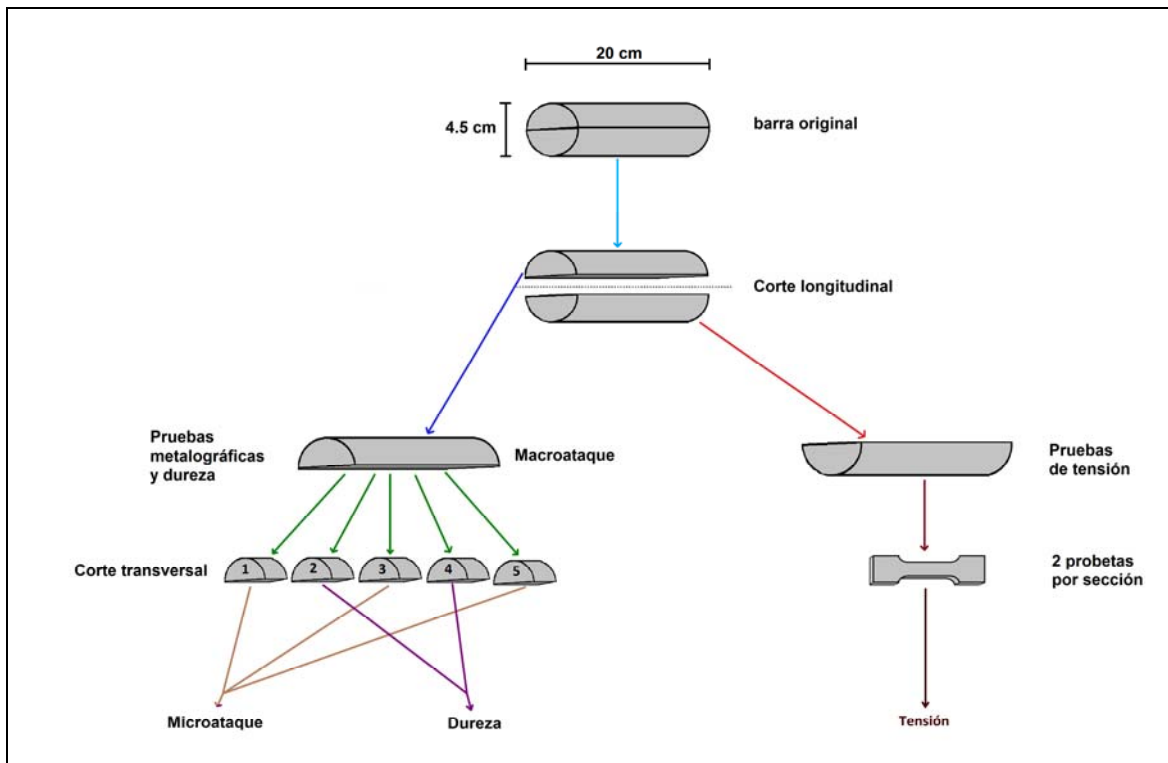


Figura 6.7 Asignación de muestras a partir del lingote para las diferentes pruebas

En la figura 6.8 se observan algunos cortes longitudinales de los lingotes, mostrando los termopares que se insertaron.

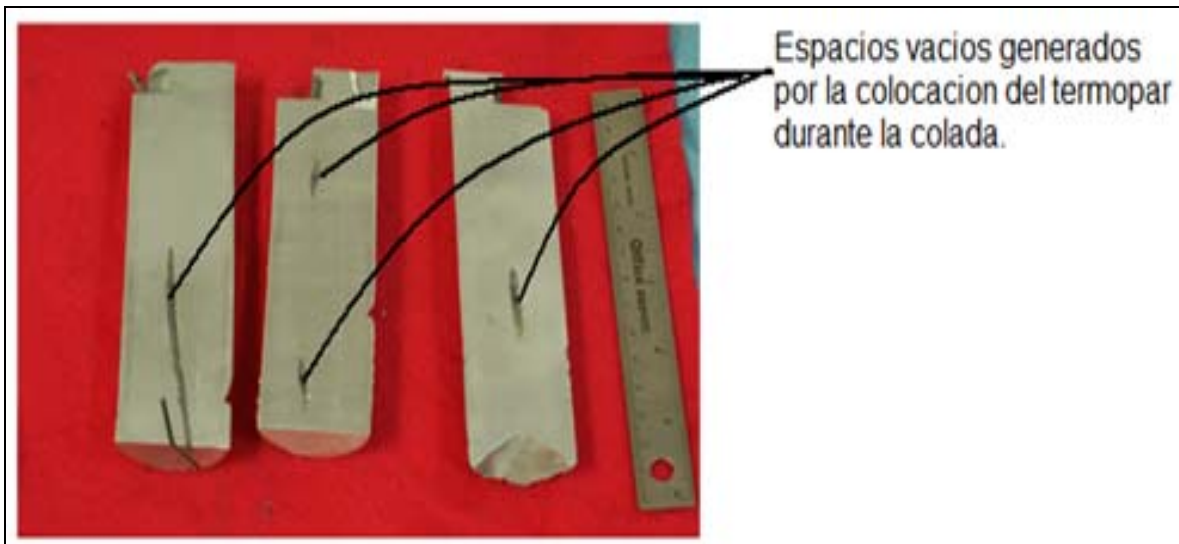


Figura 6.8 lingotes cortados longitudinalmente.

6.3 Medición de temperatura del agua de enfriamiento.

Para determinar la cantidad de calor absorbida por el sistema de enfriamiento, se instalaron termopares tipo k en la entrada y salida del molde, conectándolos a un sistema de adquisición de datos. Se varió la rapidez de enfriamiento a través del flujo de agua y la velocidad de la colada.

Las lecturas de temperatura con respecto al tiempo, muestran dispersión de datos; dado a que al entrar el agua al molde esta no sigue una trayectoria única, parte del agua circula alrededor del molde absorbiendo mayor cantidad de calor, otra recorre una trayectoria menor, absorbiendo menos calor, mientras que otra fracción del líquido se estancó en el fondo del molde (figura 6.9); así mismo cabe la posibilidad de que algunas burbujas de aire se encuentren en el flujo induciendo también a la dispersión de datos [5].

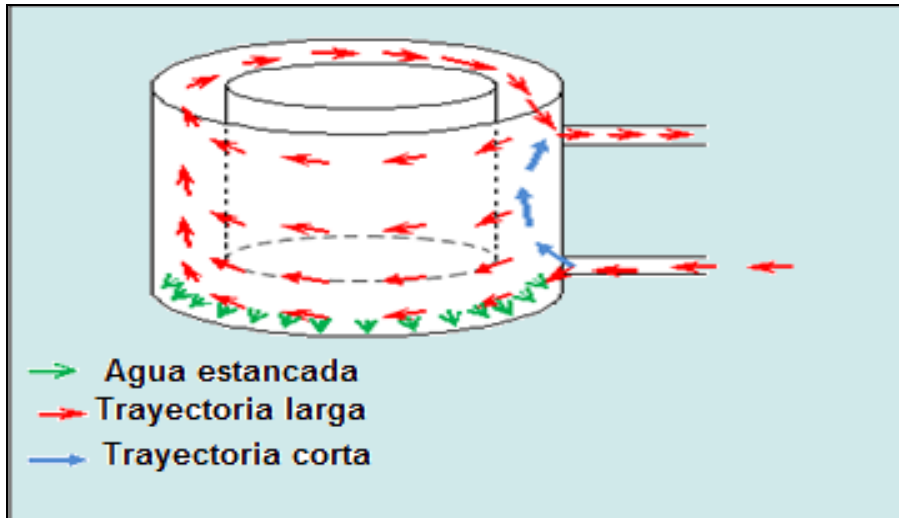


Figura 6.9 Trayectoria del flujo de agua en el sistema primario

Es importante mencionar que los termopares de entrada y salida del agua de enfriamiento se mueven con el flujo de agua (figura 6.10), induciendo a tomar temperaturas de un elemento de fluido que no necesariamente es idéntico al elemento predecesor, sobre todo en el agua de salida; ya que como se ha indicado el agua en el molde sigue diversas trayectorias. Con respecto al flujo de agua del sistema primario cuando este fue mayor, la dispersión de datos aumentó, reduciéndose al ocurrir lo contrario.

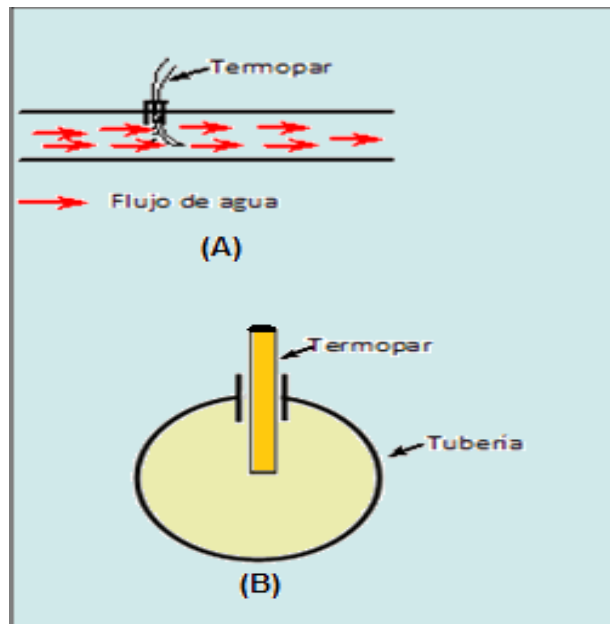


Figura 6.10 (A) Movimiento del termopar por el flujo del agua; (B) Colocación del termopar en la salida del sistema de enfriamiento

Para el registro de temperaturas en la entrada y salida de enfriamiento primario, se colocaron termopares, tomando lecturas en intervalos de dos segundos en los nueve experimentos. Con esta información se construyeron las gráficas de temperatura contra tiempo. Un ejemplo de éstas, se muestra en la figura 6.11, las 8 restantes se localizan en el Apéndice 3. En éstas se muestra la variación de la temperatura con respecto al tiempo y a los parámetros de operación que se fueron asignando; así mismo se calculó la cantidad de calor que el agua extrajo de los lingotes mediante la ecuación 3.3, reportándose estos cálculos en la tabla 6.2

Como se observa en las graficas de temperaturas del sistema de enfriamiento primario, en el momento en que se alimenta el metal al molde, la temperatura aumenta y en cuanto se va disminuyendo esta desciende.

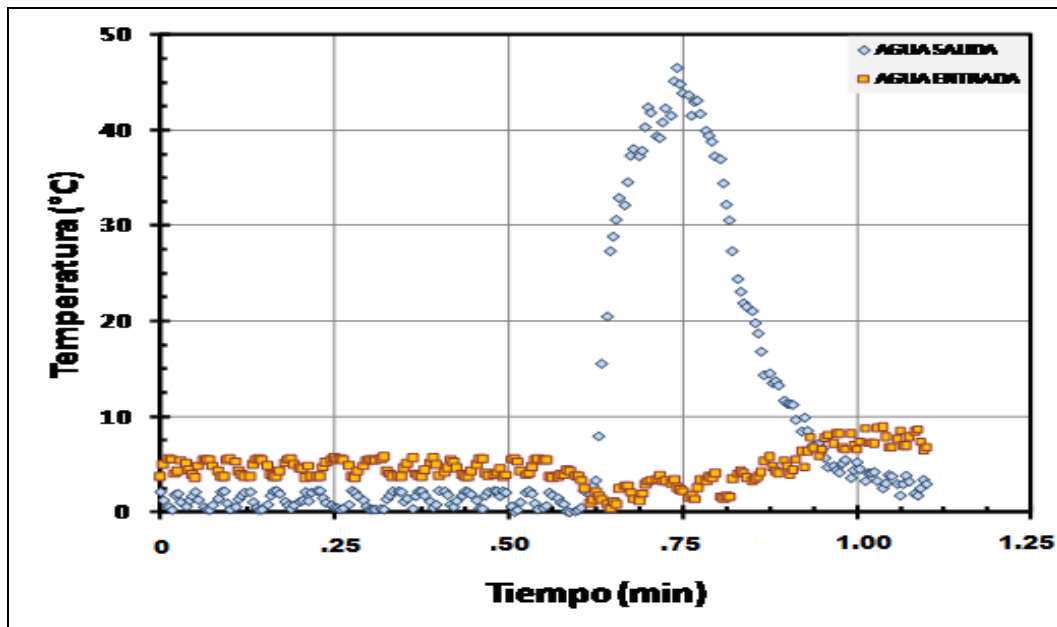


Figura 6.11 Gráfica de temperatura de agua de enfriamiento en la muestra 8.

6.4 Pruebas de perfil de solidificación del sistema de enfriamiento.

Para la generación de las lecturas de temperatura durante la solidificación y por consiguiente de la extracción de calor, en cada uno de los experimentos se colocó un termopar tipo *k en* el centro del molde y otro en el horno. La figura 6.12 presenta la variación de la temperatura con respecto al tiempo de una de las muestras. Se puede observar en este conjunto de gráficos el efecto del flujo de agua y de la velocidad de colada sobre el enfriamiento de las muestras. Para determinar el valor del calor liberado por el metal, se empleó la ecuación 3.5, los resultados se muestran en la tabla 6.2. Se observa que la relación energética se

conserva alrededor de la unidad, excepto cuando el flujo de agua es más pequeño (Apéndice 4).

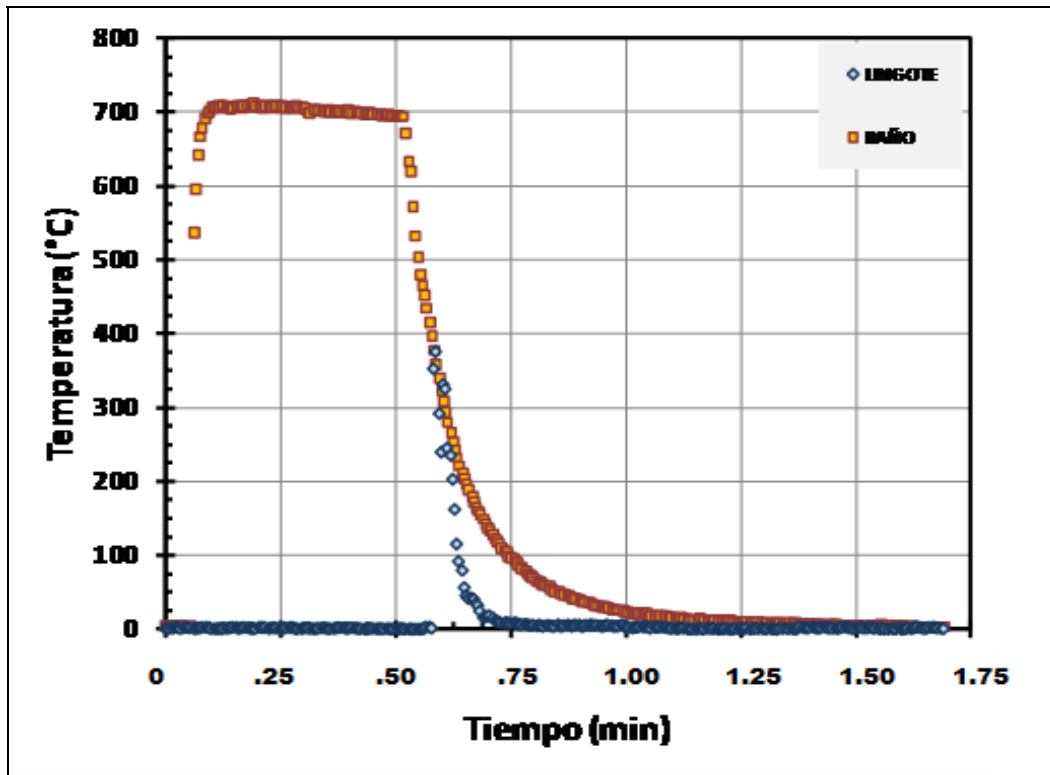


Figura 6.12 Curva de enfriamiento durante la formación del lingote (muestra 1)

Tabla 6.2 Resultados obtenidos durante la experimentación en laboratorio.

No de experimento	Peso de la barra fundida Al (kg)	Tiempo de colada (min)	Calor absorbido por el agua de enfriamiento (J)	Calor liberado por el aluminio (J)	Velocidad de colada (cm/min)	Flujo de agua en el primario (L/min)	Relación Energética.
1	0.94	1.00	1.91×10^5	3.68×10^5	8.1	9.5	0.52
2	0.64	0.70	2.53×10^5	2.50×10^5	12.5	9.5	1.01
3	0.78	0.90	2.86×10^5	3.05×10^5	17.0	9.5	0.94
4	0.90	0.81	3.54×10^5	3.52×10^5	24.0	9.5	1.00
5	0.86	1.07	3.36×10^5	3.40×10^5	24.0	5.0	0.99
6	0.90	1.83	3.60×10^5	3.52×10^5	24.0	2.0	1.02
7	0.44	0.35	1.85×10^5	1.72×10^5	42.0	9.5	1.07
8	0.92	1.20	2.47×10^5	3.60×10^5	42.0	2.0	0.69
9	0.34	0.85	0.668×10^5	1.33×10^5	42.0	2.0	0.50

6.5 Valoración estructural.

6.5.1 Macroataque.

Las muestras utilizadas para el macroataque se prepararon con lija de granulometría 80, para eliminar la capa superficial de óxido de cada muestra. Con la ayuda de una segunda lija con granulometría 180, se continuó la operación en cada lingote en sentido contrario a la primera, para garantizar que las rayas dejadas por ésta fueran eliminadas por completo, y que la superficie fuera aún más homogénea.

De la misma manera se fueron empleando lijas con granulometrías más finas hasta llegar a la 1200. Una vez preparadas las superficies, las muestras se macroatacaron con una solución ácida con 9.5% en volumen de HF, 5% en volumen de HCl y el resto de agua destilada [6].

Las superficies preparadas de las muestras se sumergieron en el reactivo, un tiempo de 50 segundos. Transcurrido ese tiempo se procedió a pasarlas por un chorro de agua y secarlas para detener el ataque químico. La figura 6.13 muestra la macroestructura de los 9 lingotes generados durante la experimentación, mostrando granos equiaxiales.



Figura 6.13 Macroestructura del corte longitudinal de los nueve lingotes.

6.5.2 Microataque.

Después de realizados los macroataques, se prepararon las mismas muestras, cortándolas sobre la sección transversal, obteniendo cinco tramos de aproximadamente 5 cm cada uno (figura 6.7), de las cuales se utilizaron las secciones 1, 3 y 5, preparándoles una cara longitudinal y una cara transversal [5].

Lo anterior consistió en lijar las probetas de forma similar a lo realizado en el macroataque, en seguida se pulieron con alumina de 0.3 μm disuelto en agua hasta lograr acabados tipo espejo. Una vez finalizada esta operación, se atacaron con una solución compuesta por 10% en volumen de HF, 15% en volumen de HCL, 25% en volumen de HNO_3 y el otro 50% de agua destilada [7].

Este ataque fue realizado durante 30 segundos deteniéndolo posteriormente con chorros de agua [6]. Se tomaron micrografías para cada sección trabajada, en un microscopio óptico.

La figura 6.14, muestra las micrografías obtenidas para las secciones correspondientes de uno de los lingotes trabajados, el resto se puede verificar en el Apéndice 5. En cada muestra se observa que la tendencia metalográfica es de estructuras dendríticas con granos equiaxiales distribuidos en toda el área; no se observaron granos columnares.

6.6 Determinación de propiedades mecánicas.

A las muestras de la tabla 6.1, se les realizaron pruebas de determinación de dureza y resistencia a la tensión.

6.6.1 Perfiles de dureza.

De las secciones para metalografía, se utilizaron las muestras 2 y 4, de la figura 6.7, bajo el siguiente procedimiento: se maquinaron las secciones antes mencionadas con una fresadora y herramienta de corte para acabado, la velocidad de corte fue de 1400 revoluciones por minuto y la profundidad de 50 μ ; esta operación se repitió en cada barra hasta lograr que las superficie interior y exterior, fueran paralelas, como se muestra en la figura 6.15

En seguida, se procedió a tomar las lecturas de dureza a lo largo de la sección, partiendo de la región de inicio de colada hacia el final de esta, haciendo las mediciones por sección, dejando una distancia de 7mm entre cada indentación se utilizó un durómetro Vickers marca Mitutoyo, AVK C-2 (figura 6.16), con una carga de 5 Kg, procediendo a tomar las lecturas correspondientes. (Apéndices 6 y 7)

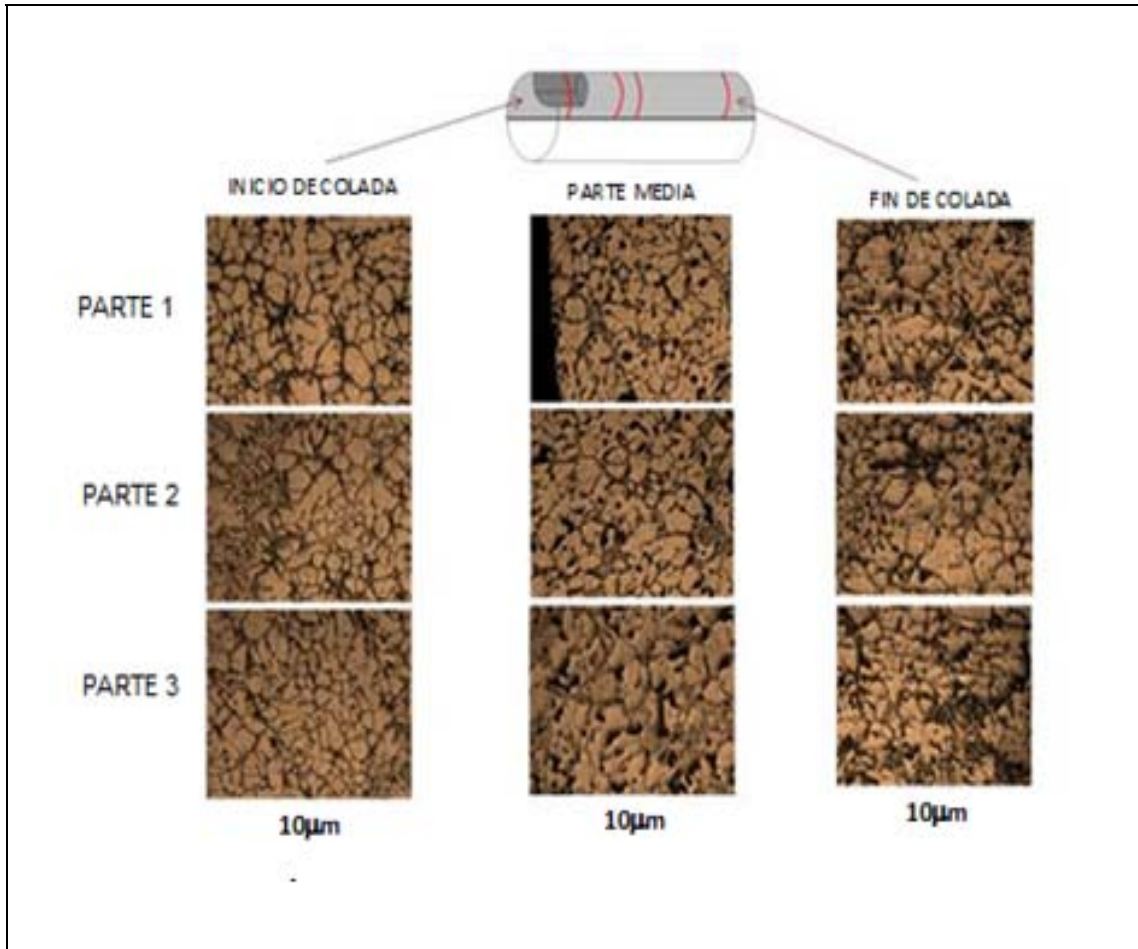


Figura 6.14 Fotografía del microataque del primer lingote.

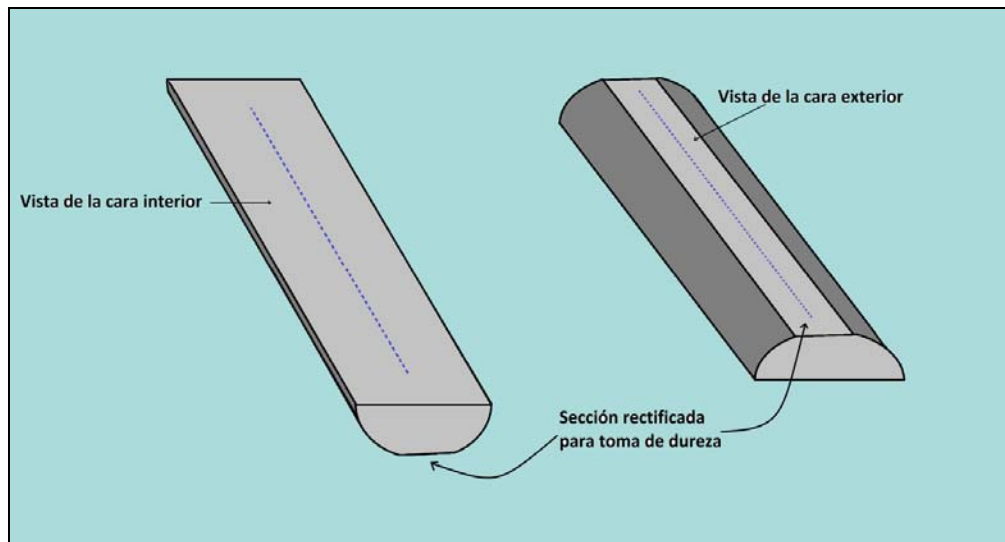


Figura 6.15 Vista de la sección de las barras con las marcas en las zonas donde se realizaron las indentaciones.



Figura 6.16 Durómetro Vickers Mitutoyo, AVK C-2

En cada superficie de las barras, se llevaron a cabo entre 7 y 11 indentaciones, esto debido a las longitudes en condiciones de poder analizar en cada una de ellas. En el mapa de dureza de la figura 6.17 se observa los registros de toma de una de las muestras, las ocho restantes se encuentran en el Apéndice 8.

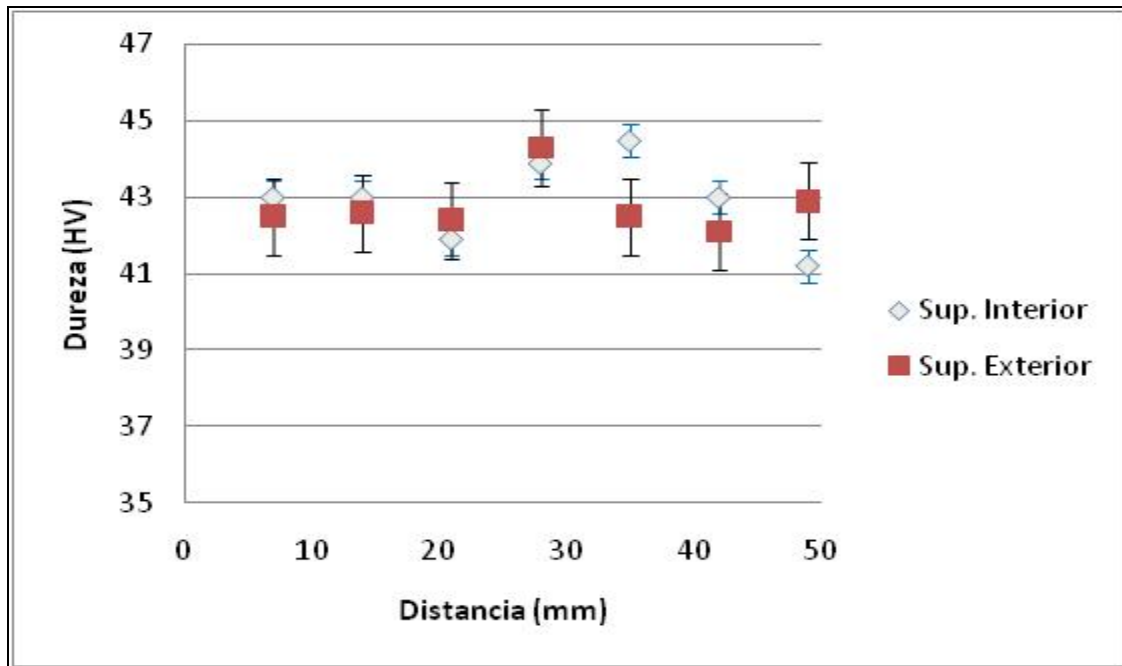


Figura 6.17 Mapa de durezas en escala Vickers (HV), para la muestra 5.

6.6.2 Pruebas de tensión.

Para el maquinado de los especímenes para ensayos de tensión se utilizaron las secciones indicadas en la figura 6.7. Las probetas se maquinaron de acuerdo a la norma ASTM E 8E/8M-08 [8], obteniendo probetas con las dimensiones indicadas en la figura 6.18.

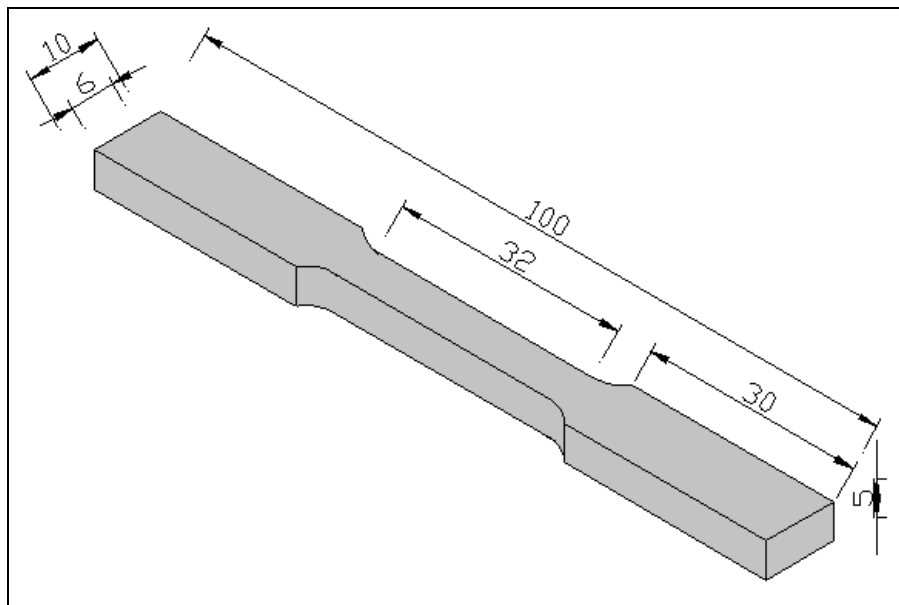


Figura 6.18 Dimensiones de probeta conforme a norma ASTM [8]

En la figura 6.19 se muestran secciones de cuatro probetas que se maquinaron para realizar los ensayos; la tabla 6.3 presenta las dimensiones de ocho probetas; de la barra 5 no se pudo obtener debido a fallas durante el maquinado.



Figura 6.19 Foto de las secciones maquinadas para realizar ensayos de tracción.

Tabla 6.3 Dimensiones de los especímenes maquinados según la norma ASTM E 8E/8M – 08.

Especímen	Espesor T (mm)	Ancho W (mm)	Área de la sección transversal (mm²)
1	6.06	5.05	30.60
2	5.99	5.00	29.95
3	6.03	5.01	30.21
4	6.02	5.04	30.34
6	5.98	5.05	30.19
7	6.00	5.02	30.12
8	6.01	5.02	30.17
9	5.99	6.03	36.11

Una vez obtenidos los especímenes para los ensayos, estos se realizaron en una maquina universal marca SHIMATZU, modelo SLFL-100 kN, la cual cuenta con interface y software para procesar los datos, (figura 6.20), la velocidad de cabezal utilizada fue de 1 mm por minuto, deteniéndose al momento de iniciar la fractura en los mismos, el procedimiento de prueba se encuentra en el apéndice 9.



Figura 6.20 Máquina de ensayos universales, marca SHIMATZU, modelo SLFL-100 kN

Los resultados de una las pruebas se muestra en la figura 6.21; las siete graficas restantes, se encuentran en el Apéndice 10.

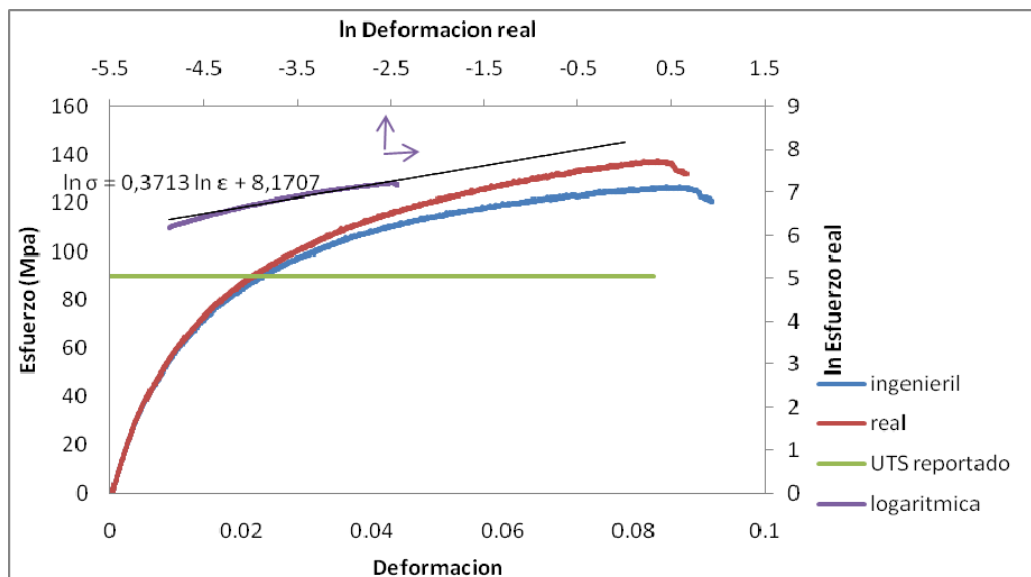


Figura 6.21 Curvas esfuerzo-deformación para la barra 3.

La tabla 6.4 muestra los resultados de los esfuerzos máximos de tensión (UTS) comparados con los del manual de Metales (Metal Handbook) que es de 90 Mega Pascales (MPa) para la aleación 1100 y de 180 para la 3004, también el exponente de endurecimiento (n) que es de 0.242 para ambas aleaciones, y La figura 6.22 representa los valores

Tabla 6.4 Resultados de los ensayos de tensión de las barras de aluminio.

Barra	Esfuerzo Máximo de Tensión (UTS en MPa)	Exponente de endurecimiento (n)	Desviación entre UTS (%)
ALUMINIO 1100			
1	127	0.30	41.11
2	120	0.41	33.33
3	137	0.37	52.22
4	121	0.40	34.44
6	117	0.41	30.00
7	123	0.37	36.66
8	120	0.40	33.33
ALUMINIO 3004			
9	223	0.44	23.88

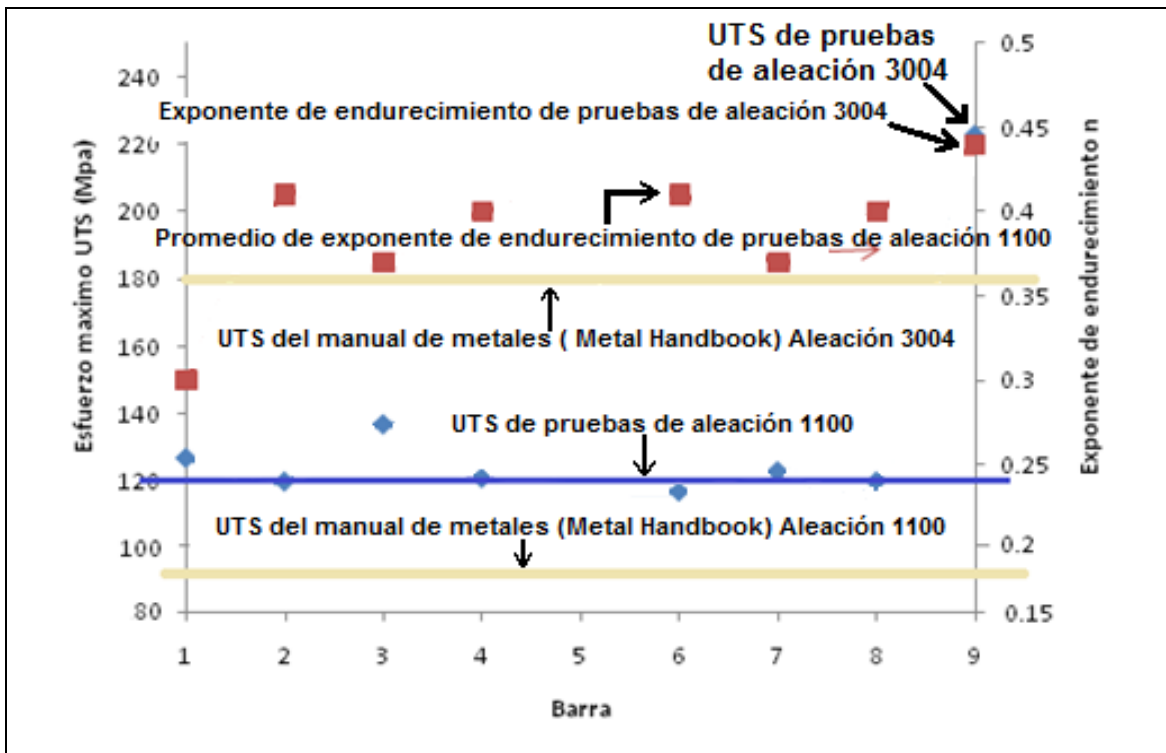


Figura 6.22 Grafica de esfuerzos máximos en Mpa y exponente de endurecimiento para cada una de las barras de ensayos de tensión.

La figura 6.23 muestra los esfuerzos máximos de tensión contra el flujo de agua para las aleaciones 1100 y 3004

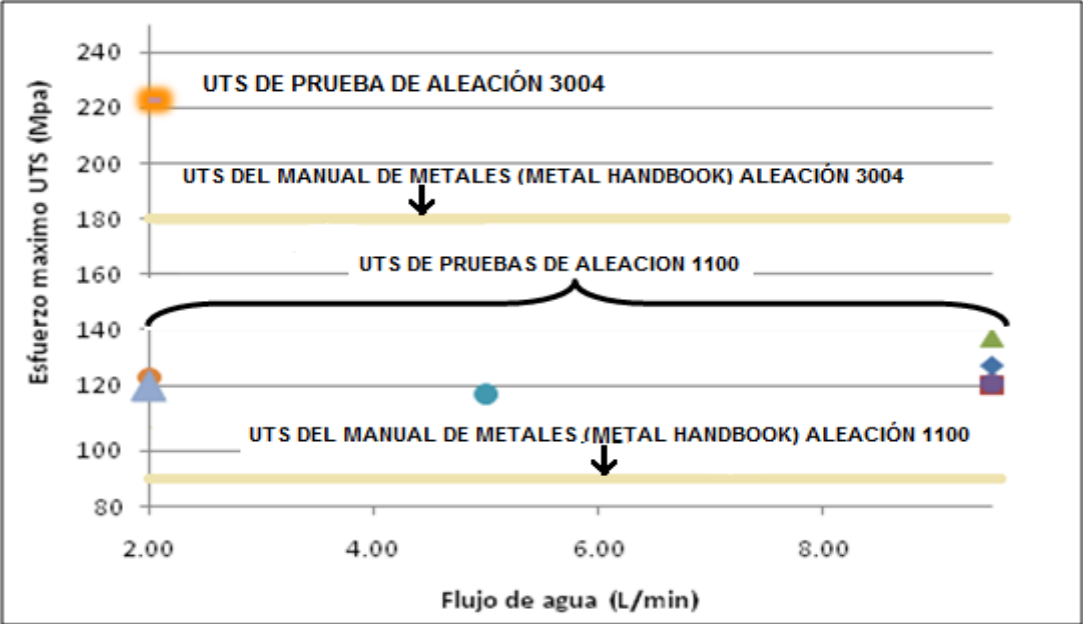


Figura 6.23 Esfuerzos máximos de tensión contra flujos de agua

La figura 6.24 muestra los esfuerzos máximos de tensión contra la velocidad de colada, para las aleaciones 1100 y 3004

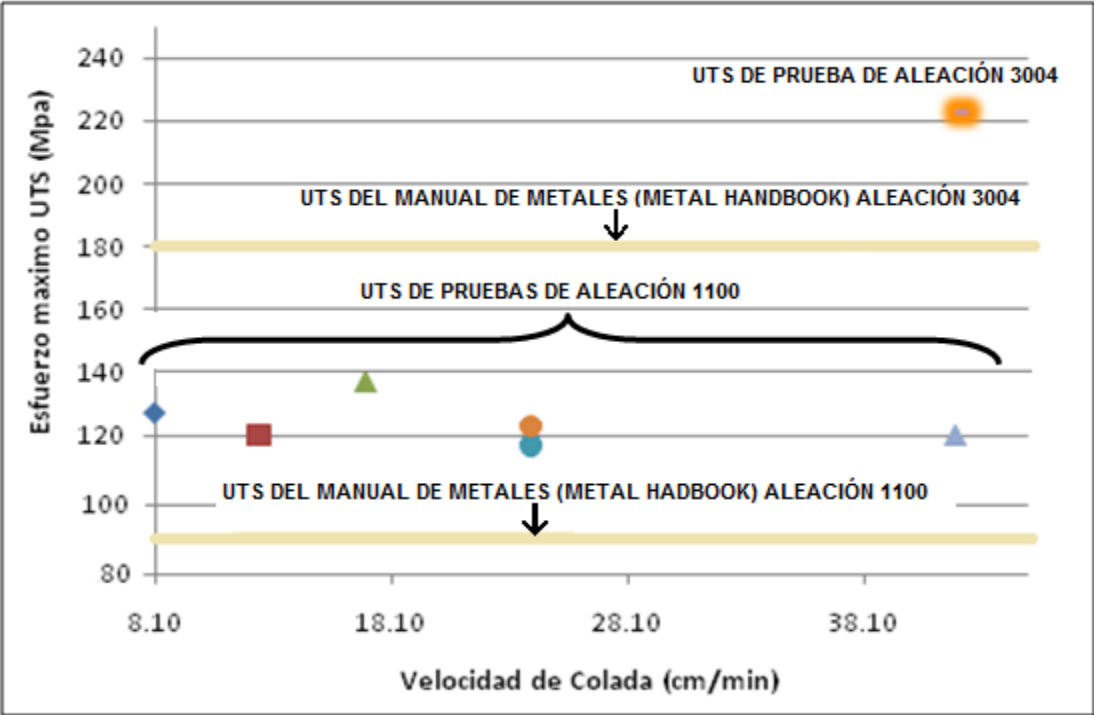


Figura 6.24 Esfuerzos máximos de tensión contra velocidad de colada

6.6.3 Resumen de las pruebas de laboratorio

En la estabilidad térmica, se observa que cuando se utilizan flujos de agua mayores en el sistema primario, la temperatura no rebasa los 25° C, no así cuando los flujos utilizados son menores; se alcanzan temperaturas de hasta 50° C. y cuando los flujos de agua fueron mínimos, el tiempo de colada aumentó.

En el perfil de solidificación, la pendiente de las curvas de enfriamiento tiende a ser de 90° cuando los flujos de enfriamiento son mayores y cuando estos disminuyen, su tendencia es a convertir la curva a una pendiente de 60°.

En lo que respecta al macroataque, las muestras que se sometieron a estudio, no presentan estructuras columnares, sus estructuras son equiaxiales distribuidas uniformemente, y no se observan defectos de fundición.

En cuanto al microataque, las muestras presentan estructuras dendríticas con granos equiaxiales distribuidos homogéneamente; los granos columnares son esporádicos y aislados. En la parte céntrica, las dendritas son sensiblemente de mayor tamaño. En general y de acuerdo a la norma ASTM-112 [9], el tamaño de grano promedio oscila entre 8 y 9. (Apéndice 11)

Con respecto a las pruebas mecánicas, para la dureza en la escala Vickers, la aleación 1100, osciló entre 39.7 y 46.25 grados, mientras que para la aleación 3004 fue de 60 grados. Y de las pruebas de tensión, el esfuerzo máximo en MegaPascales (MPa), para la aleación 1100, osciló entre 117 y 137, y para la aleación 3004 en 223.

6.7 Referencias.

- [1] Ríos M., "Estudio del Efecto del Flujo del Agua de Enfriamiento sobre la Microestructura de las Aleaciones de Aluminio 1100 y 3004 obtenidas por Colada Semicontinua", Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco México, enero 2010.
- [2] Smith. W., Principles of materials Science and Engineering 3rd Ed, Mc Graw Hill, New York, USA 1999.

- [3] Brimacombe. J., Samarasekera. I., Lait. J., Continuous Casting, Volume 2. Heat Flow, Solidification and Crack Formation, The Iron and Steel Society, Warrendale, PA, USA 1984.
- [4] Méndez. C., Ríos. M., Barrón M., Torres. A., Plasencia. G., and Jaramillo. D., Effect of the cooling rate on the microstructure of aluminum bars continuously cast. COM 2010 Vancouver BC
- [5] Salas. E., “Efecto del enfriamiento secundario con toberas sobre la solidificación de aleaciones de aluminio procesadas por colada continua”, Tesis de licenciatura, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Azcapotzalco, México, agosto 2010.
- [6] ASTM Standard E3-01 Practice for Preparation of Metallographic Specimens, ASTM International, West Conshohocken PA, USA
- [7] Kehl G., Principles of Metallographic Laboratory Practice, McGraw Hill, New York, USA, 1963
- [8] ASTM E 8/E 8M - 08, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials.
- [9] ASTM Standard E112-96 Standard Test Methods for Determining Average Grain Size, ASTM International, West Conshohocken PA, USA

Capitulo 7 Simulación Numérica.

7.1. Generalidades.

En los procesos de solidificación del aluminio, se extrae calor ya sea por convección radiación ó conducción. La manera de cómo y qué tan rápido ocurra es de gran importancia para controlar el crecimiento de grano desde la generación del lingote. Para poder entender dicho proceso en la colada semicontinua del aluminio, es necesario conocer cómo es que este se lleva a cabo, siendo que es un fenómeno físico que puede ser expresado matemáticamente para su estudio [1].

En este capítulo se analiza el proceso de solidificación por medio de la simulación numérica, mediante el elemento finito, utilizando el software comercial COMSOL. Esta, servirá en primera instancia, para comprobar los resultados obtenidos en planta y laboratorio, en seguida se realizaran predicciones con experimentos diseñados con diferentes variables de proceso para sugerir condiciones de operación óptimas de solidificación [2,3]

En el modelo matemático los puntos de estudio son: el molde y el enfriamiento secundario, haciendo un balance térmico a lo largo del lingote. La transferencia de calor de la línea de centro hacia la superficie está en función de las condiciones límite y las propiedades termo físicas del metal, como lo muestra la figura 7.1.

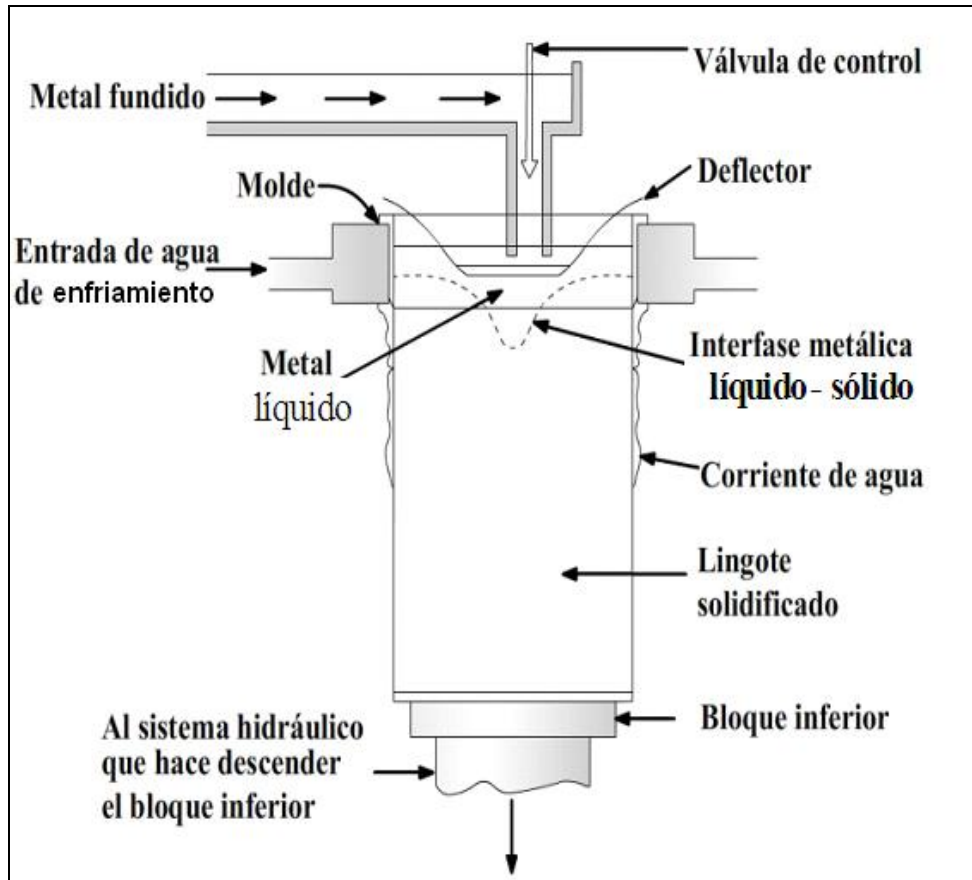


Figura 7.1 Proceso de colada semicontinua actual en IMASA [4].

7.2 Aspectos matemáticos a considerar para la definición del sistema.

La ecuación 7.1, describe la conducción de calor en un medio en movimiento a velocidad U y asume que:

$$\begin{array}{l}
 \text{Acumulación} \\
 \text{de calor} \\
 (n) \\
 \rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t}
 \end{array}
 +
 \begin{array}{l}
 \text{Calor} \\
 \text{extraído por} \\
 \text{el agua de} \\
 \text{enfriamiento} \\
 \rho \cdot c \cdot U \frac{\partial T}{\partial z}
 \end{array}
 -
 \begin{array}{l}
 \text{Conducción en el lingote} \\
 \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right]
 \end{array}
 = 0 \quad 7.1$$

1. El calor latente de fusión involucrado durante la solidificación de metal puede ser tomado en cuenta por el ajuste del calor específico sobre el rango de solidificación

2. La transferencia de calor por convección puede ser tomada en cuenta, por la conductividad térmica del aluminio líquido. Si el calor desciende a la velocidad de colada, la velocidad relativa sería cero y el término de transferencia de calor masiva desaparece; reduciéndose la ecuación a:

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial T}{\partial x} \right) = 0 \dots\dots\dots 7.2$$

La ecuación 7.2 describe el estado inestable de la sección del lingote en estudio, que es considerando la colada a una condición limite dada. La variación de conducción térmica puede ser tomada en cuenta por la expansión del segundo término de la ecuación, resultando:

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} - K \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) - b \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 = 0 \dots\dots\dots 7.3$$

Donde b es la razón de cambio de la conductividad térmica con la temperatura.

Las condiciones límite por considerar en la ecuación 7.3 son:

- Tiempo, línea de centro del lingote, y la superficie exterior del lingote.

7.3. Determinación de la geometría.

La generación de la geometría se presenta en la figura 7.2, y esta se realiza en base a la forma del lingote; en este caso 3D, misma que esta con relación a las dos zonas del sistema de enfriamiento, que en principio se consideran las condiciones reales de operación en IMASA, y en seguida se analiza el cambio de coeficientes de transferencia de calor y de dimensiones en el molde.

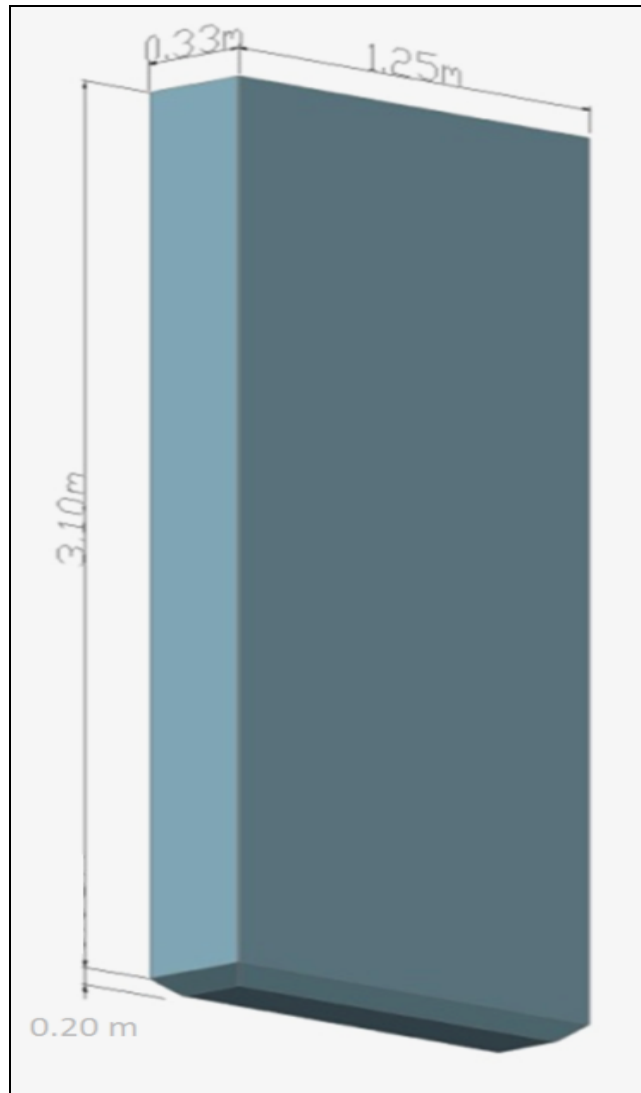


Figura 7.2 *Figura geométrica a escala en el programa.*

7.4 Generación del mallado.

El punto de partida para el método del elemento finito es una malla, que es la partición de la geometría en pequeñas unidades a una forma simple. En el método 1D, las particiones de los subdominios (intervalos) es en pequeños intervalos de malla o de malla de elementos y a los extremos de la malla se les llama intervalos de malla de vértices.

Del mismo modo, en el método 3D, a las particiones en subdominios tetraédricos o triangulares, cuyas caras, bordes y esquinas se les denomina como caras de malla, malla de bordes ó vértices de malla, respectivamente.

Estrictamente hablando, los vértices de malla son solo un subconjunto de los puntos de nodo; en ocasiones el término "elemento de malla", significa cualquiera de los elementos, tales como: caras, de bordes o vértices.

Por su parte, existen diferentes tipos de mallas [5-8], las cuales pueden generar elementos de diferentes formas y arreglos, como pueden ser: Mallas estructuradas; en este tipo los puntos están acomodados de manera regular y están constituidas por familias de líneas con la propiedad de que los miembros de una familia no se crucen entre si. Por su parte, las mallas no estructuradas constan de celdas de diferentes formas, pero generalmente se emplean triángulos o cuadriláteros en 2D y tetraedros y hexaedros en 3D. Generalmente este tipo es conveniente para geometrías complejas, sin embargo, las mallas no estructuradas generan mayor número de celdas, lo cual incrementa el tiempo de cómputo.

Una vez que se genera una malla, se pueden introducir aproximaciones a las variables dependientes. Para este debate, se concentran en el caso de una variable u , aproximándola con una función que describa con un número finito de parámetros, denominado grados de libertad (GDL). La inserción de esta aproximación a la forma débil de la ecuación genera un sistema de ecuaciones para los grados de libertad, lo cual se puede apreciar en la figura 7.3.

Los resultados del mallado generado para la simetría son los mostrados en la tabla 7.1 el número de elementos de 19090 nos indica cuantos elementos fueron los computados para obtener los resultados de las graficas de temperatura y transferencia de calor.

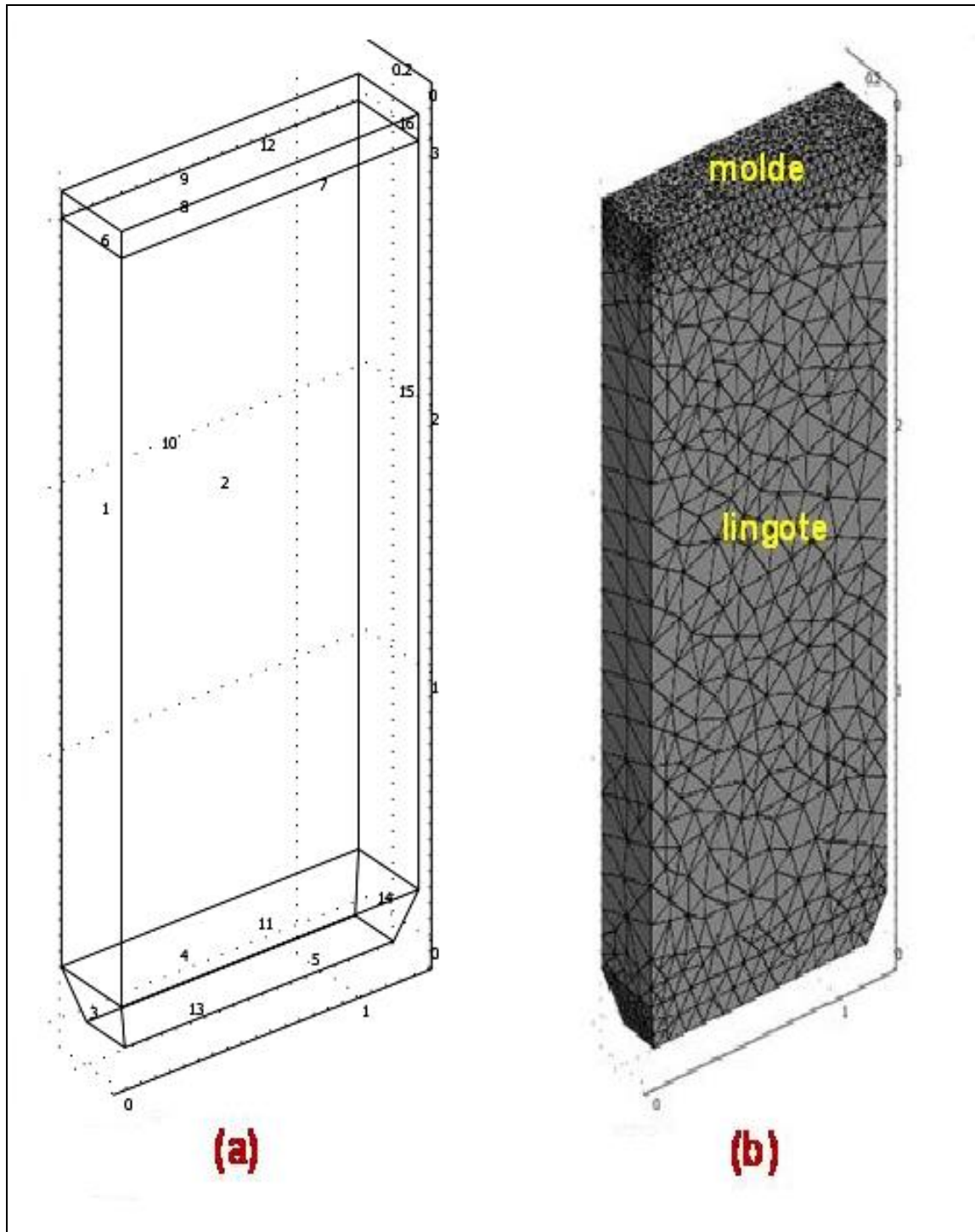


Figura 7.3 Esquema y mallado de un lingote por simulación numérica
a) Geometría del lingote; b) lingote mallado.

Tabla 7.1 Mallado de la simetría del lingote.

Número de grados de libertad	120934
Número de elementos tetraédricos	19090
Tetraedros	19090
Prisma	0
Hexaedros	0
Número de elementos de lado	343
Número de elementos de limite	5328
Triangular	5328

7.5 Establecimiento de condiciones de frontera (ECF).

Las condiciones de frontera son muy importantes, ya que estas le proporcionan al método numérico la información necesaria para iniciar el cálculo de las diferentes variables por analizar.

Así mismo, es necesario estimar el coeficiente de transferencia de calor en el molde y en la fosa de enfriamiento. Para ello primero, se utiliza la ecuación 3.7, y se evalúa a partir de los datos que se muestran en la Tabla 7.2 [9]:

Tabla 7.2 Valores necesarios para la estimación del coeficiente de transferencia de calor.

Cantidad	Símbolo	Unidades	Valor numérico
Flujo volumétrico	Q	m ³ /s	0.028
Densidad del agua	ρ	kg/m ³	1000
Diámetro de la tobera de entrada de agua al molde	D	m	0.100
Área transversal de la tobera de entrada de agua al molde	A	m ²	7.85 X 10 ⁻³
Viscosidad del agua	μ	kg/m/s	9.82 X 10 ⁻⁴
Número de Prandtl	Pr		5.83
Longitud del canal de enfriamiento del molde	L	m	6.32
Conductividad térmica del agua	k	W/m/K	0.600

Sustituyendo estos valores en las ecuaciones 3.6 y 3.7, se obtiene que el valor del coeficiente de transferencia de calor en el molde es $105 \text{ W/m}^2/\text{K}$. Este valor es de máxima importancia en los cálculos a desarrollar. Sin embargo, y debido a las dificultades para realizar mediciones directas, así como al desconocimiento de la situación del estado del canal de alimentación de agua de enfriamiento, el valor de este coeficiente para propósitos de cálculo se fijo como $150 \text{ W/m}^2/\text{K}$.

Además del valor del coeficiente de transferencia de calor en el molde, también es necesario establecer el valor de éste para la fosa de enfriamiento. En la práctica de IMASA se bombea de manera continua el líquido de enfriamiento hacia la torre de enfriamiento, sin embargo, en la fosa se alimenta agua del molde y por bombeo, manteniendo un volumen de agua prácticamente constante en ella, por lo que se puede considerar que la cantidad de agua en la fosa permanece constante, dando condiciones de estancamiento, por lo que el valor del coeficiente de transferencia de calor puede tomar un valor de $5 \text{ W/m}^2/\text{K}$.

Además de estos coeficientes, se alimentan al software diferentes parámetros de operación mismos que se describen en la Tabla 7.3

Tabla 7.3 Parámetros de operación y propiedades termo físicas utilizadas para la simulación numérica [3,5-6].

Parámetro	Valor	Unidad
Velocidad de colada	13	cm/min
Temperatura de vaciado	680	°C
Densidad de aluminio	2700	kg/m ³
Capacidad calorífica del aluminio	900	J/kg/K
Calor latente de solidificación del aluminio	-3.91×10^5	J/kg
Temperatura de solidificación del aluminio	660	°C
Conductividad térmica del aluminio	237	W/m/K
Coeficiente de transferencia de calor en el molde	150	W/m ² /K
Coeficiente de transferencia de calor en la fosa	5	W/m ² /K

También se alimentaron al programa como ya se indicó, las dimensiones del molde y del lingote por procesar. No se alimentaron las dimensiones de la fosa del agua de enfriamiento, debido a que en realidad, cada lingote está rodeado por una cantidad suficiente de agua, por lo que es innecesario añadir la fosa al modelo numérico. Considerando además que se hicieron los cálculos de transferencia de calor y de flujo de fluidos para un solo lingote, no para los tres que se procesan por vaciada.

Las constantes son valores que pueden introducirse y que el software comercial utilizado las evaluará para todos los subdominios y geometrías. Estas pueden ser una constante o una función matemática. Las propiedades físicas del aluminio consideradas para la simulación son las mostradas en la tabla 7.4:

Tabla 7.4 Propiedades del aluminio.

Propiedad	Expresión	Designación
Densidad	$2500 \frac{Kg}{m^3}$	ρ
Conductividad térmica	$200 \frac{W}{m \cdot K}$	kc
Viscosidad dinámica	$0.0012 \frac{Ns}{m^2}$	H
Constante de emisividad	0.8	u
Calor específico P=cte	$1179 \frac{J}{mol \cdot K}$	Cp S
Entalpía de fusión	$10.669 \frac{KJ}{Kg^{\circ} K}$	ΔH

Nota la temperatura de vaciado, T_m , está fijada en 680°C.

Una geometría se conforma por contornos, que son dominios, y consisten en diversas conexiones, tales como volúmenes, superficies, curvas, o puntos; y el subdominio es parte del modelado en el espacio en un modelo geométrico y su representación es una línea, área o volumen.

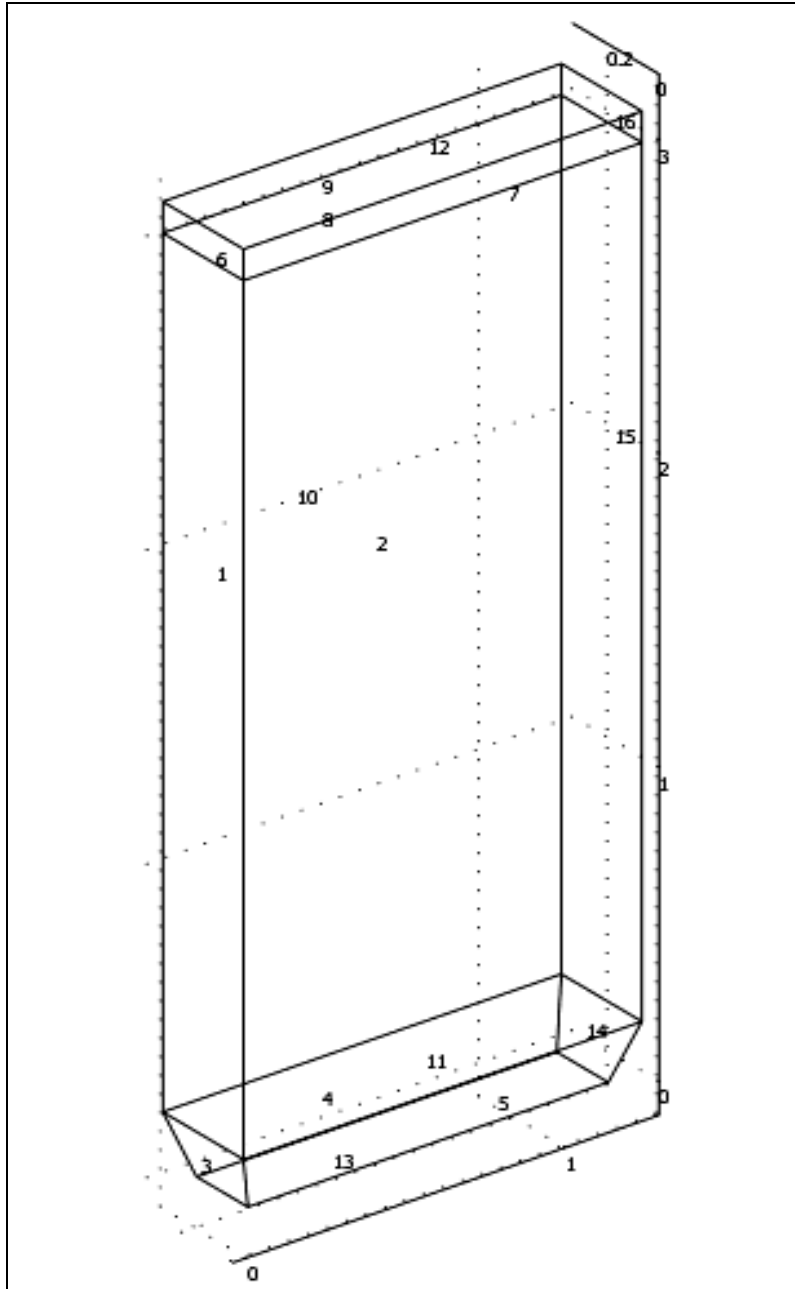


Figura 7.4 Geometría de un lingote con condiciones de frontera.

En la figura 7.4 se muestran los subdominios de la simulación realizada en la simetría y en el lingote completo. Los subdominios en 3D que son en volumen, se introducen los valores o el nombre de la constante o expresión correspondiente al aluminio y su velocidad de solidificación.

En las condiciones de frontera se especifica cómo se realiza el intercambio de calor en esa parte específica del modelo geométrico. Dado que se considera una distribución uniforme de calor en el lingote, se determina un límite en la simetría y en los otros límites se consideran según las características que da el planteamiento del problema (figura 7.1).

Las maneras para determinar las condiciones de frontera a través de las cuales el metal líquido entra al molde y el calor es extraído, son diversas. La tabla 7.5 indica las condiciones iniciales de la colada y la tabla 7.6 los medios bajo las cuales se realiza la extracción de calor para la solidificación.

Tabla 7.5 Condiciones de frontera del lingote por simulación.

Límites	Unidades	Condiciones de frontera		
		1-3, 5-7, 10-12, 14-16	9	13
Tipo		Pared	Entrada	Salida
Tipo de entrada		Velocidad	Velocidad	Velocidad
Tipo de salida		Presión, no esfuerzo por viscosidad	Presión, no esfuerzo por viscosidad	Presión, no esfuerzo por viscosidad
Tipo de pared		No deslizable	No deslizable	No deslizable
Tipo abierto		Esfuerzo normal	Esfuerzo normal	Esfuerzo normal
velocidad x (u_0)	m/s	0	0	
velocidad y (v_0)	m/s	0	0	0
velocidad z (w_0)	m/s	0	0.12	0
Presión (p_0)	Pa	0	0	0
Velocidad normal del flujo de entrada (U_{0in})	m/s	1	1	1
Velocidad normal del flujo de salida (U_{0out})	m/s	0	0	0
Energía cinética de turbulencia (k_0)	m^2/s^2	0.005	0.005	0.005
Razón de disipación de turbulencia (d_0)	m^2/s^3	0.005	0.005	0.005
Razón específica de disipación de turbulencia (ω_0)	1/s	10	10	10
Tipo de flujo		velocidad	velocidad	velocidad

Para la tabla 7.5, el limite 9 es por donde entra el metal fundido y por tanto en donde se suministra el calor, el limite que es la zona en contacto con el seguidor se supone como salida, los otros limites solo son indicados como paredes contenedoras de la aleación. Los 4 y 8 son continuidades en la geometría.

Las condiciones de frontera son definidas por el usuario, en este caso refiriéndose al reporte generado de la simulación, como se puede ver en la figura 7.4 los límites en donde se aplican con mayor detalle.

Tabla 7.6 Condiciones de frontera para transferencia general de calor.

variables	Unidades	Condiciones de frontera			
		1-3,5, 10-11,14- 15	6-7, 12, 16	9	13
Tipo		Flujo de calor	Flujo de calor	Temperatura	Temperatura
Coefficiente de transferencia de calor (h)	W/(m ² ·K)	h_outside	h_mold		h_outside
Temperatura exterior (T _{inf})	K	298	T0		
Temperatura (T0)	K			993	333
Emisividad en la superficie (épsilon)	1	0	épsilon	épsilon	0
Temperatura ambiente (Tamb)	K	0	333	T0	0
Tipo de radiación: (radType)		Ninguna	Ninguna	Superficie al ambiente	Ninguna

Los subdominios son definidos para la extracción de calor y para el flujo de la colada, como se muestra en la tabla 7.7.

Tabla 7.7 Configuración de los subdominios

Subdominio	Unidad	1-3
Densidad (ρ)	kg/m ³	2500
Viscosidad dinámica (η)	Pa·s	0.0012
Fuerza del volumen, x-dir. (F_x)	N/m ³	-Sr
Fuerza del volumen, y-dir. (F_y)	N/m ³	0
Fuerza del volumen, z-dir. (F_z)	N/m ³	-Sz
Velocidad inicial x (u)	m/s	0
Velocidad inicial y (v)	m/s	0
Velocidad inicial z (w)	m/s	0.12
Presión (p)	Pa	0
Temperatura de colada	K	993

7.6 Simulación numérica con condiciones de IMASA.

El primer modelo numérico que se construyó tomó en cuenta los parámetros de operación de la planta de IMASA. La primera etapa en la construcción del modelo numérico, consistió en generar una geometría con las dimensiones del lingote de 1250 mm de ancho. Una vez generada esta geometría, se procedió a dividir esta en subregiones para poder realizar en estas los cálculos que permitan conocer los campos de temperaturas dentro del lingote conforme la solidificación procede. Una vez dadas las condiciones de procesamiento, se realizan los cálculos necesarios. La Figura 7.4, muestra la geometría a analizar y el mallado generado para la evaluación numérica del mismo.

Para realizar los cálculos de extracción de calor en un lingote procesado en IMASA, se resolvieron de manera simultánea el flujo de fluidos en el molde, así como la transferencia de calor en el mismo. Para simplificación de los cálculos; se

consideró al sistema de colada como no transitorio, es decir, se considera que tanto la temperatura como la velocidad de colada del aluminio líquido en el molde no varían con el tiempo, lo cual se aprecia en la tabla 7.8.

Tabla 7.8 Parámetros de operación y propiedades termo físicas utilizadas para la simulación numérica [9-11].

Parámetro	Valor	Unidad
Velocidad de colada	13	cm/min
Temperatura de vaciado	680	°C
Densidad de aluminio	2700	kg/m ³
Capacidad calorífica del aluminio	900	J/kg/K
Calor latente de solidificación del aluminio	-3.91 X 10 ⁵	J/kg
Temperatura de solidificación del aluminio	660	°C
Conductividad térmica del aluminio	237	W/m/K
Coeficiente de transferencia de calor en el molde	150	W/m ² /K
Coeficiente de transferencia de calor en la fosa	5	W/m ² /K

Los resultados de las primeras simulaciones se muestran en la figura 7.5, en donde la mayor extracción de calor ocurre en el molde, y a lo largo del lingote el flujo de calor es menor; corroborando lo que se observa en la figura 5.11, que a lo largo del molde el aluminio no presenta resistencia térmica significativa; si se sobreponen las curvas de enfriamiento éstas son constantes definiendo que el modelo se puede estudiar como estacionario.

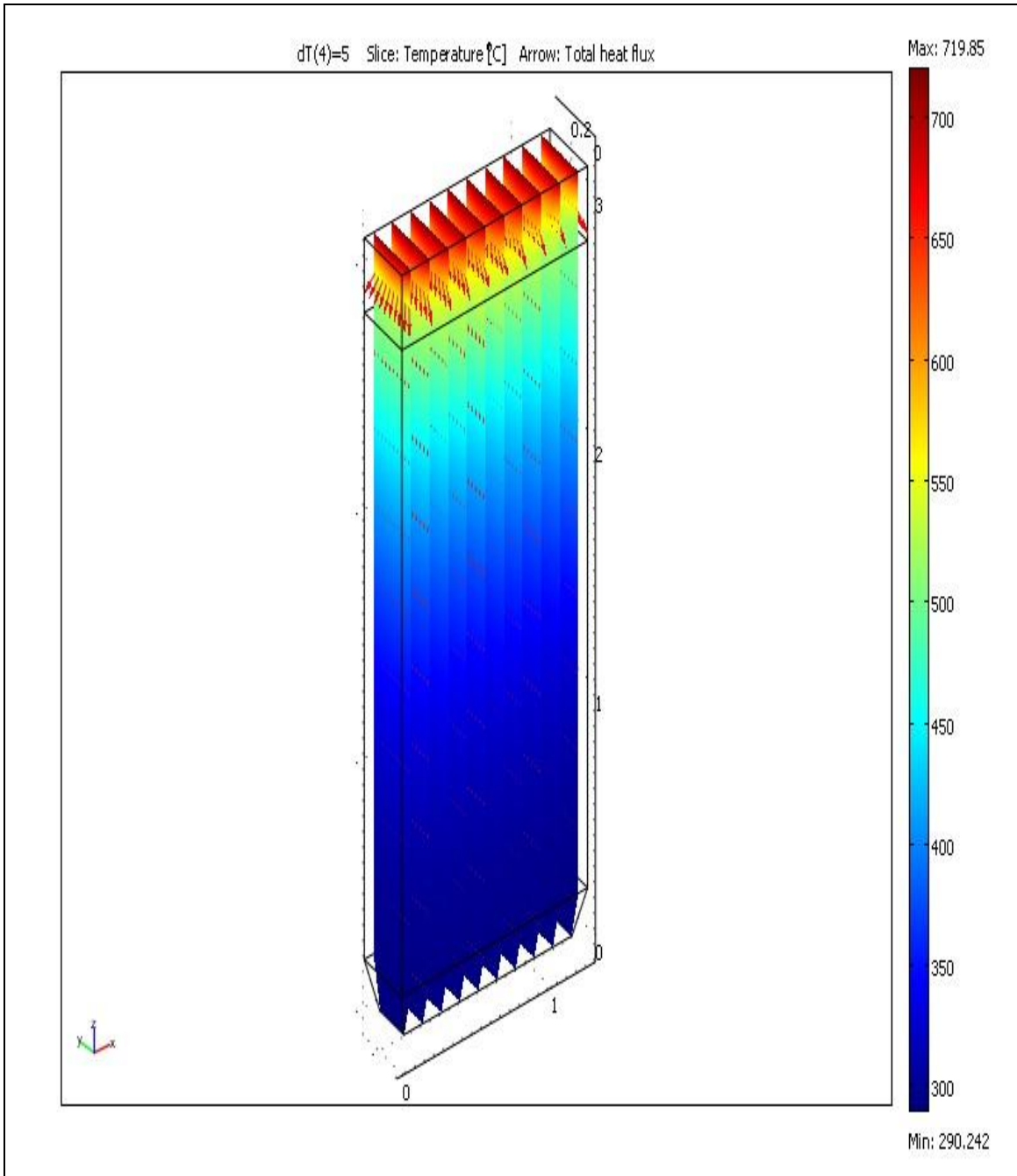


Figura 7.5 Temperaturas generadas y vectores de flujo de calor durante la simulación

La figura 7.6 presenta la dirección de los vectores de flujo de calor y la intensidad representa el tamaño y las isothermas la cercanía entre el aluminio líquido y el ya solidificado.

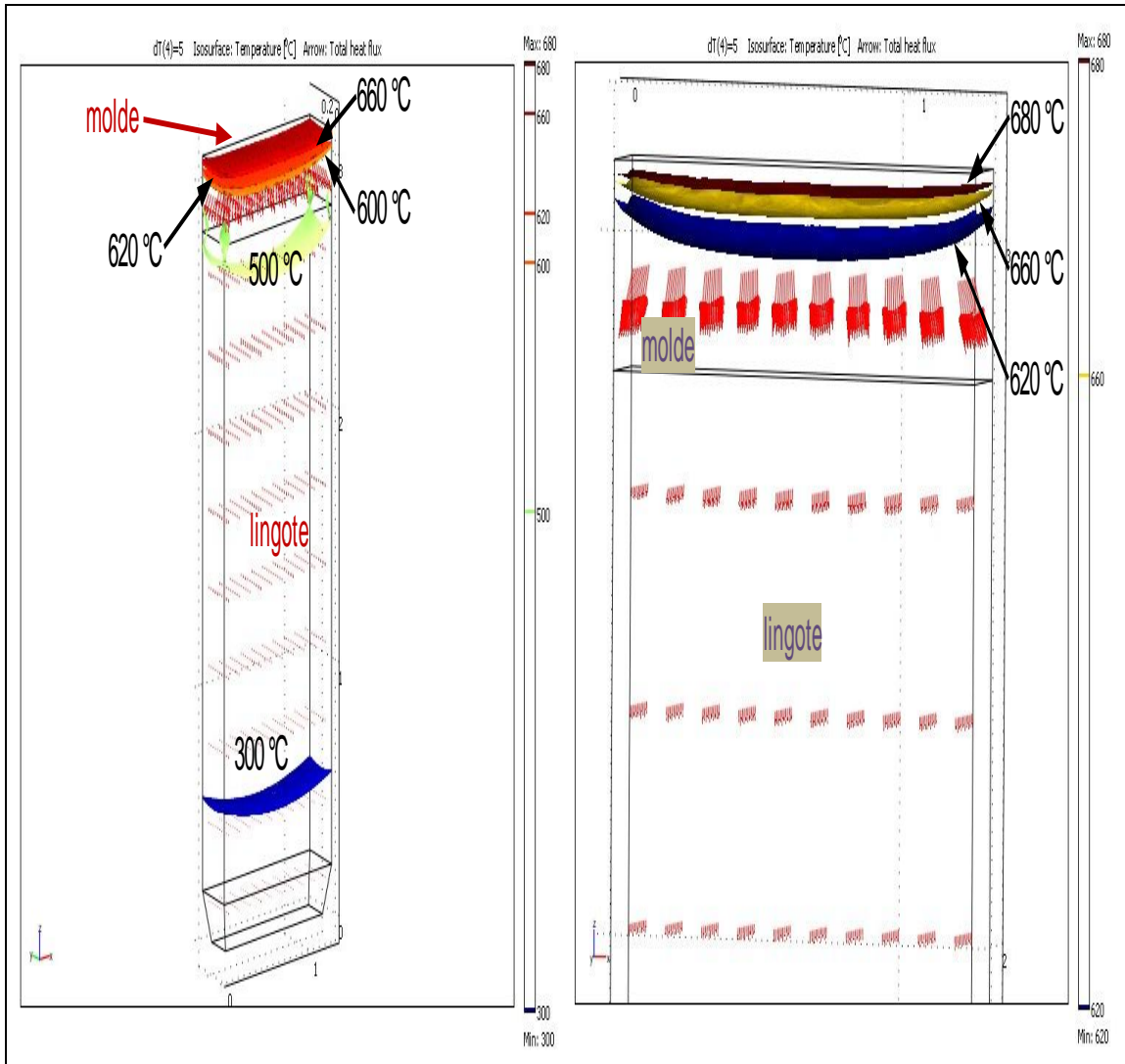


Figura 7.6 Isotermas en la región del molde de colada, mostrando que la solidificación se presenta en el molde.

Como se puede apreciar en las figuras 5.6, 5.11, 7.5 y 7.6 prácticamente toda la extracción de calor se lleva a cabo en el molde, una vez por debajo de éste, el lingote sufre un enfriamiento menos severo.

De acuerdo a las temperaturas medidas, y las estimadas, se puede establecer que hay concordancia entre ambos datos, por lo que se puede decir que las simulaciones numéricas describen adecuadamente el proceso de solidificación.

La estimación del coeficiente de transferencia de calor que se realizó fue de $150 \text{ W/m}^2/\text{K}$, la cual no fue del todo precisa por las dificultades para llevar a cabo ciertas mediciones en planta.

Aparentemente, el valor real de este coeficiente debe ser del orden de $200 \text{ W/m}^2/\text{K}$. Sin embargo, a pesar de éste coeficiente, las temperaturas en el lingote se encuentran de acuerdo a lo esperado; es decir, la mayor cantidad de calor debe ser extraída en las etapas iniciales de la colada del lingote, para que el agua de enfriamiento en la fosa literalmente solo enfríe al lingote fabricado. También se estimo la cantidad de calor que se puede extraer por cada sección del lingote, incluyendo la perteneciente al molde; en la figura 7.7, se establecen las condiciones de frontera y éstas se muestran en la tabla 7.9

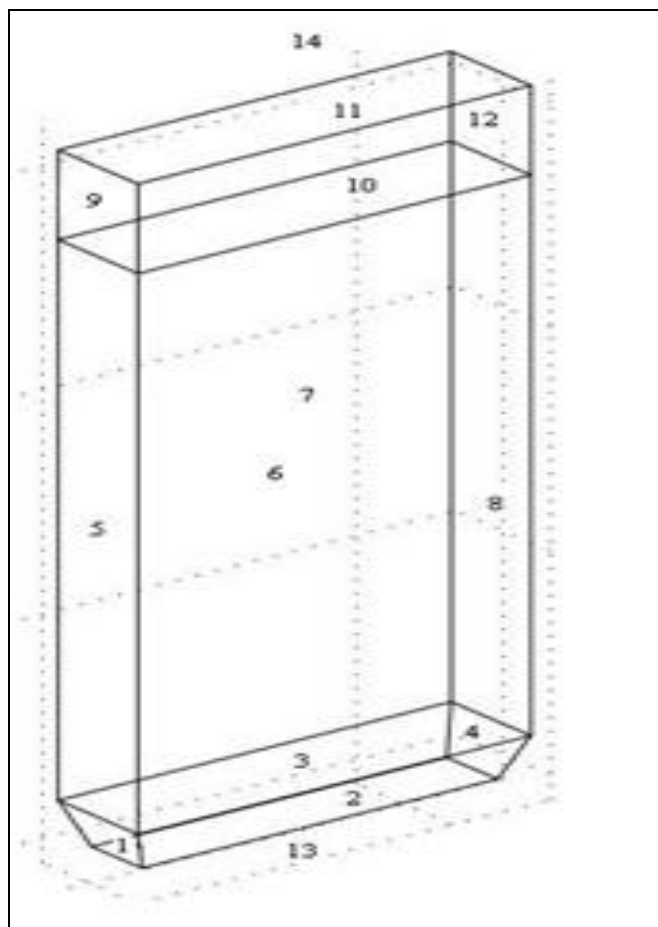


Figura 7.7 Distribución de extracción de calor en las diferentes secciones del lingote.

Tabla 7.9 Condiciones de frontera, calor liberado y porcentaje representativo, en la simulación numérica.

Condiciones de frontera	Calor liberado del lingote (W)	% Calor liberado por sección del lingote	% de distribución de calor por sección invertir columnas
Molde			
12	6841.35	77.91	8.18
11	25760.86		30.81
10	25412.00		30.39
9	7129.53		8.52
Cuerpo			
8	1721.83	21.09	2.05
7	7088.39		8.50
6	7145.07		8.54
5	1680.44		2.00
Fondo			
4	76.69	1.00	0.10
3	337.76		0.40
2	339.90		0.41
1	76.44		0.09
TOTAL	83610.88	100	100

Con los datos de la figura 7.7, se estimó que la energía extraída al lingote es del orden de 84 Kw (260 MJ), de los cuales 65 Kw son extraídos en el molde, es decir el 77.91% de la energía retirada al lingote sale por el molde, mientras que en el cuerpo del lingote expuesto al agua de enfriamiento dentro de la fosa, se retira el restante 22.09% de la energía (21.1% en el cuerpo y 1% en la base del lingote). Estos cálculos refuerzan la noción presentada en la sección anterior, en términos de la utilización del agua de enfriamiento, ya que en principio se utiliza la misma cantidad de agua en el molde (enfriamiento primario) que en la fosa (enfriamiento secundario). Las cifras que se presentan aquí demuestran que el enfriamiento

secundario no es tan severo como el primario, por lo que no es necesario utilizar grandes cantidades de agua como la práctica de fusión actual lo requiere.

7.7 Simulación numérica con condiciones impuestas

7.7.1 Efecto del cambio de coeficiente de transferencia de calor (h).

Para comprobar la eficacia de la extracción de calor en el molde, se realizaron otra serie de cálculos, manteniendo constantes los parámetros operacionales previamente descritos, pero imponiendo diferentes coeficientes de transferencia de calor en el mismo. Para estos cálculos, se emplearon coeficientes de transferencia de 300 y 1000 W/m²/K, respectivamente. Los resultados de estos cálculos se muestran en la Figura 7.8, lo que se observa en esta, es la influencia de la condición hidrodinámica en el molde para aumentar la transferencia de calor, representada con el incremento de h.

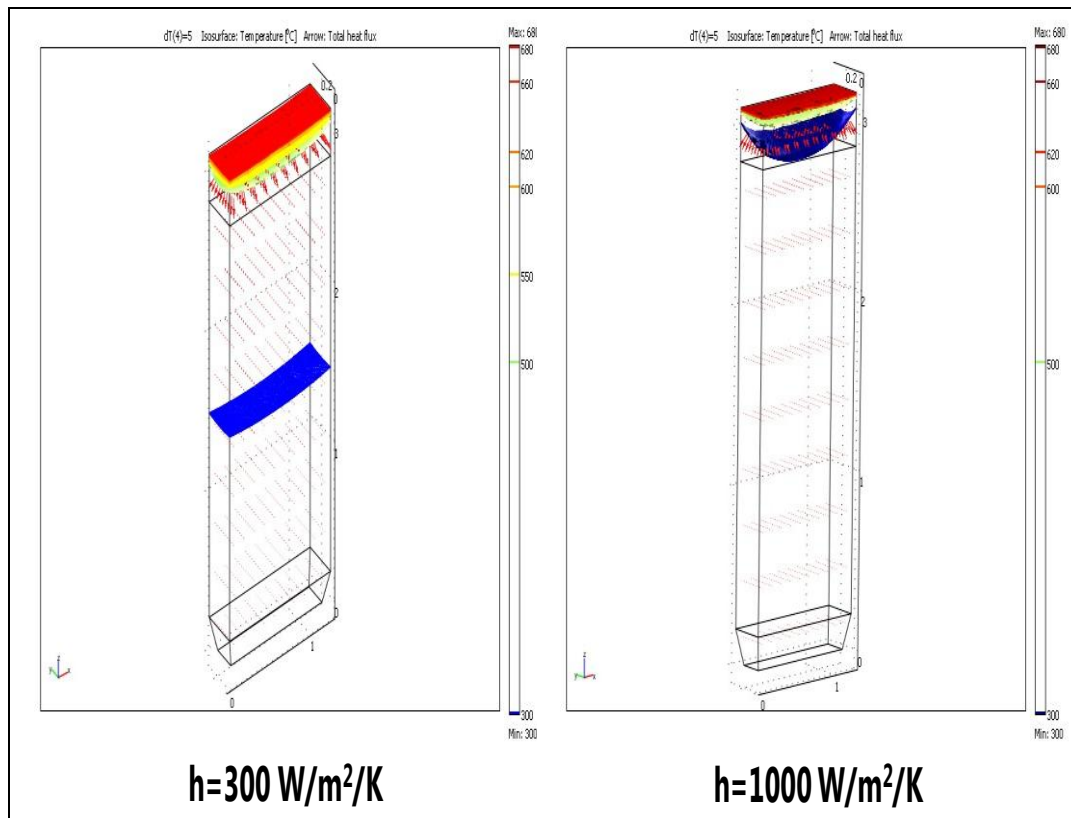


Figura 7.8 Efecto de la simulación del incremento del coeficiente de transferencia de calor sobre el enfriamiento del lingote.

Como se puede ver en la figura 7.8, el efecto del agua en el molde es significativo, ya que el incremento en el valor del coeficiente de transferencia de calor significa que las condiciones hidrodinámicas han aumentado, es decir, se puede utilizar el mismo volumen de agua, pero con una mayor velocidad a través del molde, lo cual resultará en un efecto convectivo mayor, cuya capacidad para remover calor sea potenciada. Por otro lado, se puede aplicar el mismo flujo volumétrico, pero la cantidad de agua empleada para la solidificación del metal si debe aumentar.

Cualquiera de estas combinaciones, definitivamente impactan la capacidad de extracción de calor en el molde, por lo que se puede enfriar más rápidamente al metal, reduciendo así los tiempos de residencia en el molde y aprovechar de mejor forma la cantidad de agua utilizada para solidificar y enfriar al lingote. Por otra parte, al hacer más severo el enfriamiento, necesariamente, la cantidad de calor extraída disminuye, por lo que se requiere un menor volumen de agua para el enfriamiento secundario. Esto a su vez reduce los costos de procesamiento en la colada del aluminio.

La Tabla 7.10, presenta la comparación del calor extraído a los lingotes al ser sometidos a los diferentes regímenes de enfriamiento.

Tabla 7.10 Calor extraído a los lingotes, sometidos a diferentes regímenes de enfriamiento.

Posición	h= 150 W/m ² /K		h= 300 W/m ² /K		h= 1000 W/m ² /K	
	Calor extraído (W)	Calor extraído (%)	Calor extraído (W)	Calor extraído (%)	Calor extraído (W)	Calor extraído (%)
Molde	65144.35	77.9	111792.1	86.0	231909.3	93.2
Cuerpo	17635.74	21.1	17527.8	13.5	16499.7	6.6
Base	830.79	1.0	697.64	0.5	406.0	0.2
Total	83611	100	130018	100	248815	100

Es evidente de la tabla 7.10 que la mejor utilización del agua para el enfriamiento impacta de manera definitiva a la capacidad de extracción de calor en el molde.

Por otra parte, un análisis a los datos presentados en la figura 5.6, demuestra de manera numérica la asimetría térmica que existe en el sistema de enfriamiento durante la formación del lingote en IMASA.

Esta serie de experimentos numéricos da lugar a considerar posibles mejoras al diseño del sistema de enfriamiento y con ello mejorar las condiciones de procesamiento del sistema de colada.

7.7.2 Efecto del Cambio de Altura de los moldes.

El sistema de enfriamiento primario esta en relación directa con el flujo de agua que pasa alrededor del molde, por lo que el tamaño de este también es un factor a considerar, en la tabla 7.11 se muestra el resultado de una simulación considerando un coeficiente de transferencia de calor de $150 \text{ W/m}^2/\text{K}$ y diferentes alturas y dimensiones de molde y simulando con otros coeficientes, se presentan en el apéndice 12.

Tabla 7.11 Simulación numérica con dimensiones de molde variadas.

Posición	molde 10cm		Molde 30cm		Molde 40cm	
	Calor extraído	Calor extraído (%)	Calor extraído (W)	Calor extraído (%)	Calor extraído (W)	Calor extraído (%)
	(W)					
Molde	65143.74	77.91	65144.35	77.91	78563.09	83.36
Cuerpo	17635.73	21.09	17635.74	21.09	14952.19	15.87
Base	830.79	1.00	830.79	0.99	725.48	0.77
Total	83610.87	100.00	83610.87	100.00	94240.77	100.00

La tabla 7.11 muestra que con una altura en el molde de 10 cm es suficiente para extraer la mayor cantidad de calor en el mismo molde. Las figuras 7.9, 7.10 y 7.11 presentan los resultados de los vectores de flujo de calor y las isoterms entre el metal líquido y el sólido.

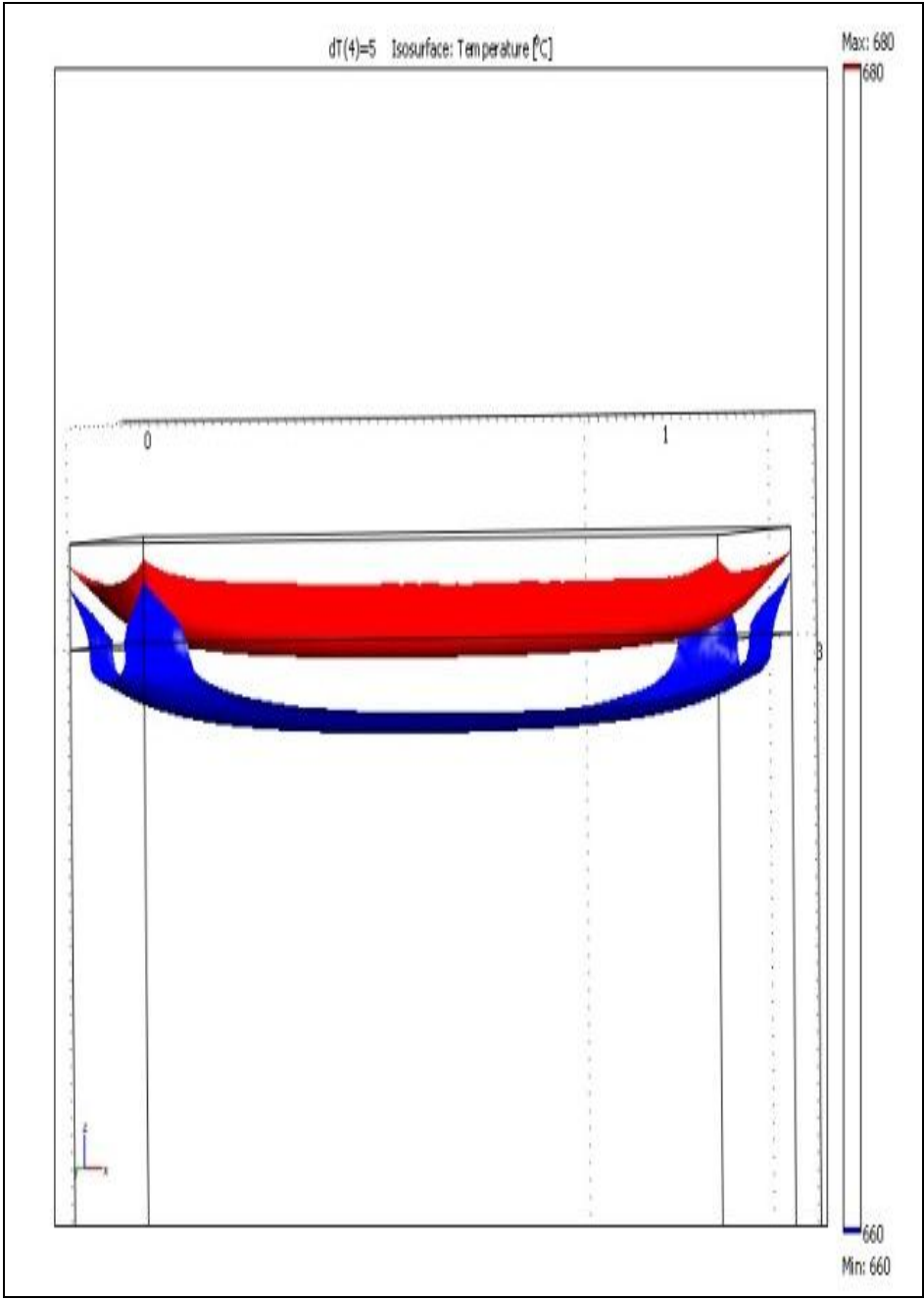


Figura 7.9 Efecto de la simulación del tamaño del molde de 10 cm en el sistema de enfriamiento.

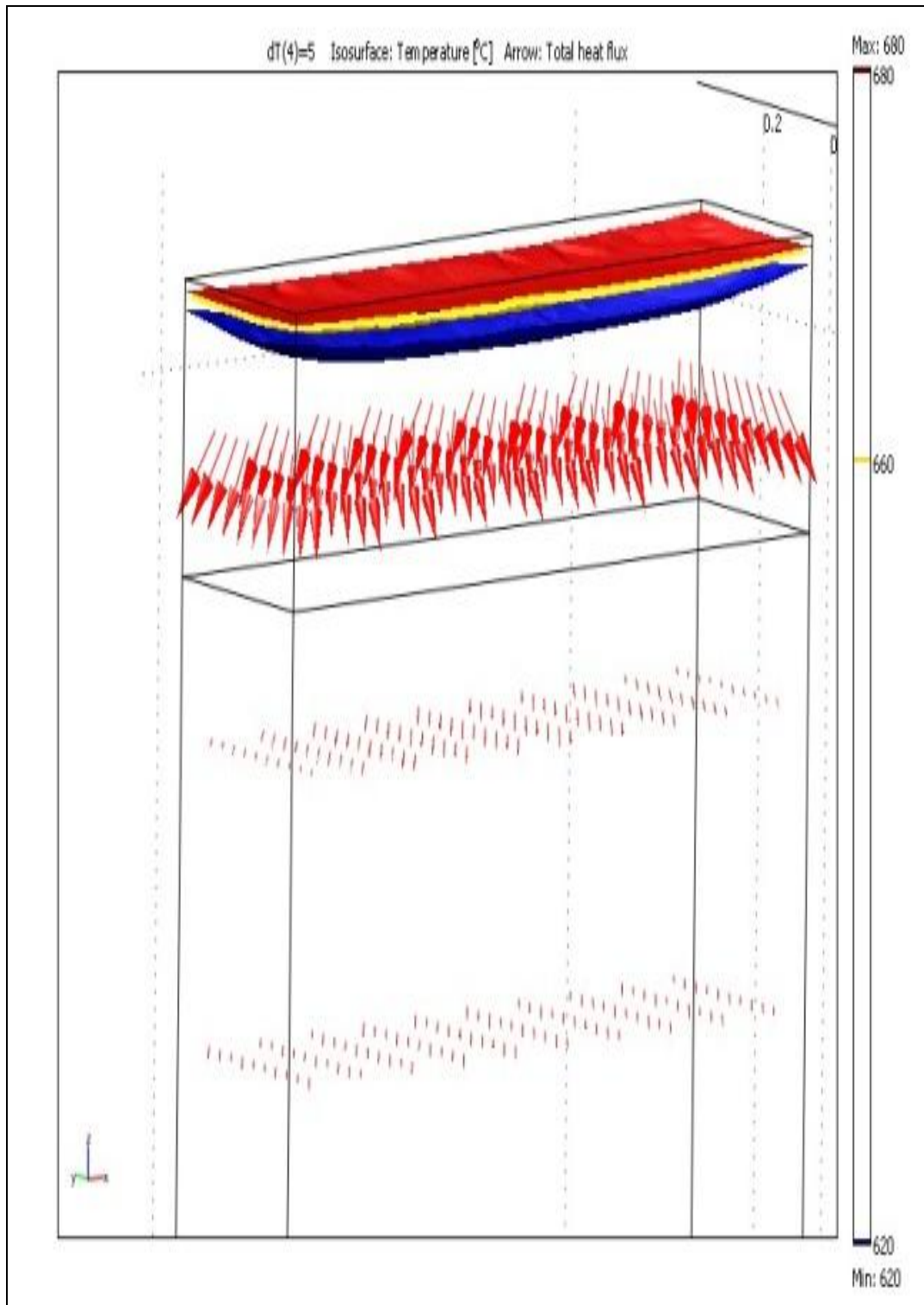


Figura 7.10 Efecto de la simulación del tamaño del molde de 30 cm en el sistema de enfriamiento.

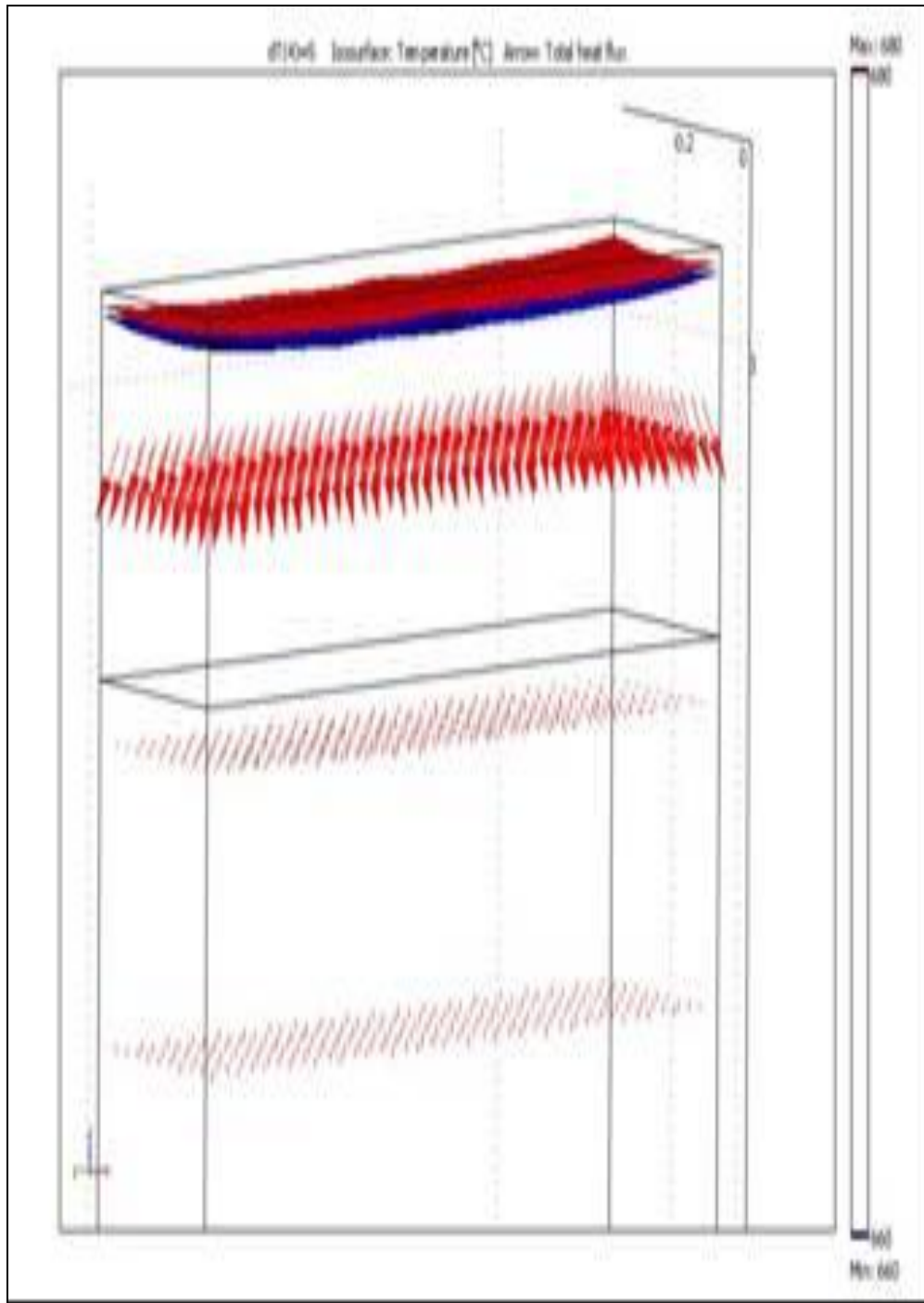


Figura 7.11 Efecto de la simulación del tamaño del molde de 40 cm en el sistema de enfriamiento

Con un molde de altura de 10 cm, la fase sólida y líquida están más definidas permitiendo que el enfriamiento secundario realice su función y termine la solidificación.

Es importante considerar que lo que se busca es una extracción de calor uniforme para dar pie a la distribución ordenada del crecimiento de grano, la cual en un enfriamiento súbito no sucede.

7.8 Análisis y comparación.

Con respecto a la simulación y la información obtenida en planta, los coeficientes de transferencia de calor establecieron una concordancia entre ambos datos, por lo que se puede decir que las simulaciones numéricas describen adecuadamente el proceso de solidificación, es decir, que la cantidad de calor que se extrajo es mayor en el molde, por ser en éste donde sucede la solidificación y donde se tiene el enfriamiento primario, demostrando que el enfriamiento secundario no es tan severo, lo que hace innecesario utilizar tanta agua en la práctica real.

Se observa que la transferencia de calor con moldes de 10 y 30 cm de altura es similar, con la diferencia de que el de 10 cm consume menos agua.

7.9 Referencias.

- [1] Somerhofer. H, "Influence parameters on Continuous Casting of Aluminum", Light Metals 2003, P. N. Crepau, Ed., TMS, USA 2003, pp 733-739.
- [2] Mendez. C., Sanchez C., Plascencia G., Rubio M., Jaramillo D., "Thermal Assesment of the casting operation at IMASA Shop"., 139 light Metals J.A Johnson, Ed., TMS, USA, 2010, pp 715-719.
- [3] Sánchez. C., "Simulación Numérica del Proceso de Colada Semicontinua de IMASA, Tesis de licenciatura, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Azcapotzalco, México, 2009
- [4] Smith W., Ciencia e ingeniería de materiales, McGraw Hill, 4a Ed. 2006.
- [5] Buchanan, G., Theory and problems of Finite element analisis, shaum's series, Mg Graw Hill, U.S.A. 1995, p. 27

- [6] Chapra/Raymond C. Métodos Numéricos para ingenieros. McGraw Hill. Mexico, 2003, p. 897.
- [7] Ferziger, J., Peric M. Computational Methods For Fluid Dynamics 3rd Edition. Springer – Verlag Berlin Heidelberg, 2002. p. 26-29.
- [8] Sanchez C., Mendez. C., Baza. C., Plascencia G., Jaramillo D., Numerical modelling of the casting operation at IMASA Shop. COM 2010 Vancouver , BC.
- [9] Pincropa, F. & PDrwitt D., Fundamentals of Heat and Mass Transfer 4th Ed., Wiley, New York, USA, 1996
- [10] Bejan A., Heat Transfer, Wiley, New York, USA, 1993.
- [11] Poirier, D. & Geiger G., Transport Phenomena in Materials Processing, Ed. TMS, USA, 1994.

Capítulo 8 Discusión general y conclusiones

8.1 Problemática del proceso en estudio.

Una de las etapas del proceso que por su naturaleza, genera mayor cantidad de defectos o consume grandes cantidades de insumos, es la colada semicontinua. Por lo que la investigación se enfocó a este punto, para conocerlo con más detalle y en su momento ofrecer alternativas de solución basadas en estudios de transferencia de calor, y soportado con experimentos en planta, laboratorio y procesos de simulación numérica.

8.2 Experimentos en planta.

Se desarrollaron tres experimentos consistentes en determinar la estabilidad térmica, el comportamiento de la solidificación de los lingotes y la medición de la temperatura del agua empleada durante el enfriamiento de los lingotes.

En cuanto a la estabilidad térmica, las pruebas consistieron en colocar termopares en la parte superior del molde donde inicia la formación de los lingotes y el metal aun es líquido; con lo cual se demostró que el comportamiento no es térmicamente simétrico.

En relación a las curvas de solidificación, en la etapa de líquido a sólido, la rapidez de enfriamiento es del orden de los $1100^{\circ}\text{C}/\text{minuto}$, y a medida que el lingote se va formando este decrece a un promedio de $162^{\circ}\text{C}/\text{minuto}$; por lo tanto las curvas se conformaron, en los diferentes niveles del lingote, mostrando una pendiente similar comprobando así la simetría.

Para la medición de la temperatura del agua de enfriamiento, se colocaron termopares en la parte superior e inferior de la fosa; esta información permitió determinar el coeficiente de transferencia de calor y detectar que la cantidad de agua utilizada en el sistema es de al menos el doble de la requerida.

8.3 Experimentos en laboratorio.

Se corroboró que en el proceso de colada semicontinua las curvas de enfriamiento no cambian a través del tiempo. Las diferencias encontradas con los experimentos en las diferentes condiciones de operación, muestran ser semejantes entre sí, con lo cual se demuestra que el material no opone resistencia térmica.

Se realizaron nueve pruebas con diferentes condiciones de operación, tales como variación en los flujos de agua desde 2.0 hasta 9.5 litros por minutos; así como la velocidad de colada desde 8 hasta 42 centímetros por minuto.

A los nueve lingotes obtenidos, se les realizaron pruebas metalográficas consistentes en micro y macroataques, en donde se encontró que las estructuras son dendríticas con la formación de granos de tipo equiaxial en toda la superficie, detectando que las diferentes condiciones de operación no afectaron metalúrgicamente al proceso.

Otras pruebas consistieron en medir la dureza y tensión, encontrando que aun con las variaciones en las condiciones de operación, no existieron cambios sustanciales

8.4 Simulación numérica.

El proceso de colada semicontinua es un fenómeno físico que puede ser expresado matemáticamente a través de la simulación numérica; en primera instancia se corroboraron los resultados obtenidos en planta y laboratorio, reforzando la teoría de la utilización en exceso de agua de enfriamiento. En seguida se hicieron predicciones en principio variando los coeficientes de transferencia de calor y ya sea que estos fueran menores o superiores, se observó que la mayor parte de la solidificación se realiza en el molde.

Posteriormente, se llevaron a cabo predicciones variando la geometría del molde (altura de 10 hasta 40 cm), observando, que con moldes de altura mínima y gasto

mínimo de agua el proceso de colada semicontinua se lleva a cabo sin afectación del producto.

8.5 Impacto en la industria del aluminio.

Las empresas mexicanas dedicadas al tratamiento del aluminio, requieren de soporte técnico en los diferentes procesos que realizan; la investigación realizada en esta tesis sobre colada semicontinua es de aplicación en las compañías que laminan y extruyen aluminio, ayudándoles a mejorar en la etapa de la formación de los lingotes, reduciendo los insumos que utilizan, como la cantidad de agua de los sistemas de enfriamiento, en primera instancia, y con estudios adicionales con la misma metodología, a reducir defectos así como mejorar las propiedades mecánicas para cumplir con las especificaciones, dando un mejor servicio a sus mercados, impactando estas acciones en la reducción de costos de fabricación.

8.6 Conclusión.

Esta tesis exploró la utilización de termopares conectados a un sistema de adquisición de datos y este a su vez a una computadora, registrando las temperaturas cada dos segundos, antes y durante el fenómeno de solidificación de lingotes en planta y laboratorio, para analizar la transferencia de calor; también mediante la simulación numérica se corroboraron los resultados y con diferentes variables y condiciones de operación se predijeron mejoras que ayudaran a optimizar el proceso de colada semicontinua.

Con respecto a la hipótesis planteada al inicio del proyecto, se puede decir, que se estudiaron las variables de operación de la colada semicontinua, que se realizó un estudio térmico, llegando a la conclusión de que operando en condiciones ideales o críticas, la afectación en el producto es irrelevante, por ser el aluminio un metal que no presenta resistencia térmica. Sin embargo se detectó que el consumo de insumos, como es el caso del agua de enfriamiento su utilización es en exceso.

Para reducir el consumo de agua, se recomienda realizar un rediseño de los moldes, esto se soporta con los resultados de la simulación numérica obtenidos en la sección 7.9, en los cuales se predice que con moldes de menor altura se consumirá menos agua y no habrá variaciones en las especificaciones del producto. Esta propuesta se refuerza con la sección 3.4.6 en donde se exponen una nueva generación de equipos de colada semicontinua para la fundición de aluminio.

De la asimetría térmica encontrada en los lingotes, se desprende que, el procesamiento para cada uno de ellos presentará características diferentes, provocando una serie de defectos en las etapas posteriores, difíciles de predecir. La asimetría estructural puede ser minimizada, con cambios en el molde de colada, que no impactarán en los costos, debido a las bondades del aluminio y sus aleaciones.

De los estudios realizados, se encontró que el consumo de agua del proceso de IMASA es de sesenta mil metros cúbicos mensuales. Los cálculos mostrados en la tabla 5.7 manifiestan que se está utilizando el doble de agua, por lo que en términos económicos y considerando el costo del metro cubico de agua en \$15.00, si se modifican los moldes a una altura de 10 cm, el ahorro anual estimado sería:

CONCEPTO	COSTO DE CONSUMO DE AGUA EN PESOS (ANUAL)
Costo de agua actual:	\$ 10,800 000
Costo del agua con modificación de sistema de enfriamiento (moldes de 10cm):	\$ 5, 400 000
Ahorro anual:	\$ 5,400 000

El ahorro de agua, traerá consigo un impacto al ambiente positivo, en un renglón importante del combate a la contaminación, así mismo, el enfriamiento secundario realizará su función de absorber calor del lingote.

APENDICE

(1) Composiciones químicas para aleaciones 1100 y 3004

Limites de composición química de las aleaciones de aluminio para tratamiento mecánico de las series 1100 y 3003.

No. AA	%Si	%Fe	%Cu	%Mn	%Zn	Otros		Aluminio %Mínimo
						%c/u	%Total	
1100	Si + Fe 0.95		.05-.20	.05	0.1	.05	.15	99.00
3003	0.6	0.7	.05-.20	1.0-1.5	0.1	.05	.15	97.5 Min.

Para identificar las aleaciones de aluminio utilizadas para los procesos de extrusión y laminación, se hace referencia al siguiente sistema que consiste de cuatro dígitos donde el primero identifica a la serie y principal elemento aleante que interviene en la aleación.

El segundo dígito indica las modificaciones que ha sufrido la aleación, si este es cero quiere decir que se trata de la aleación original.

Los últimos dos dígitos de las series 2xxx ala 8xxx sirven para identificar la aleación.

En el caso de las serie 1xxx estos dos dígitos indican el porcentaje mínimo de aluminio contenido en la aleación.

SERIE	PRINCIPAL ELEMENTO ALEANTE
1xxx	99.0% mínimo de aluminio
3xxx	Manganeso

(2) Forma del lingote experimental

$$\rho_{al} = 2.7 \text{ Kg/dm}^3$$

$$\rho = m/v$$

$$0.435 \text{ dm}$$

$$m = 1 \text{ Kg}$$

$$\Phi = 4.35$$

$$r = 2.17$$

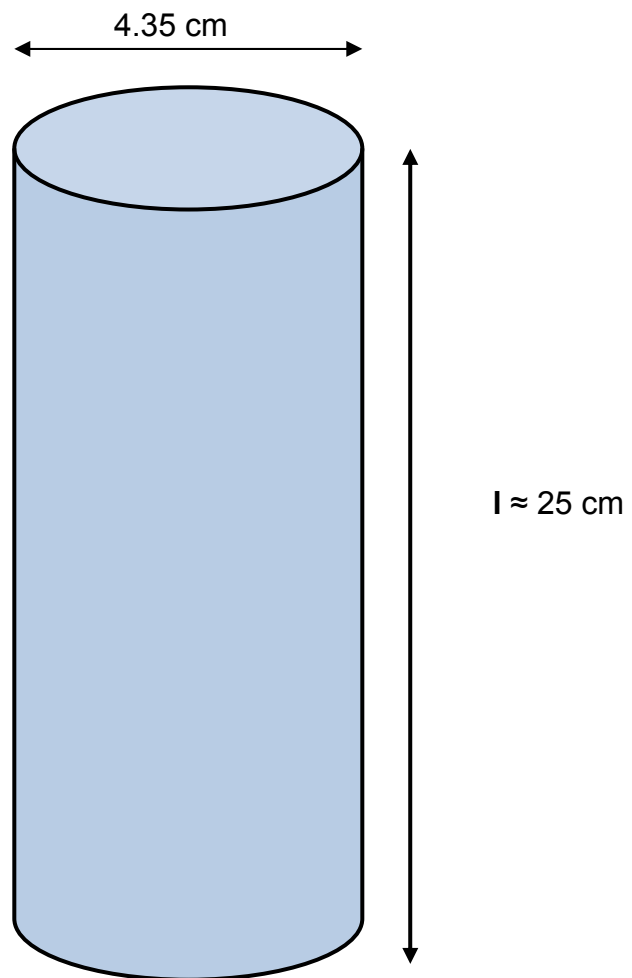
$$v = m/\rho = 1 \text{ Kg} / 2.7 \text{ Kg}$$

$$v = 0.37 \text{ dm}^3$$

$$v = \pi r^2 l$$

$$l = 0.370 / 3.14 (0.217)^2$$

$$l = 2.5 \text{ dm} \approx 25 \text{ cm largo}$$



(3) Medición de temperatura de agua de enfriamiento, durante la generación de lingotes.

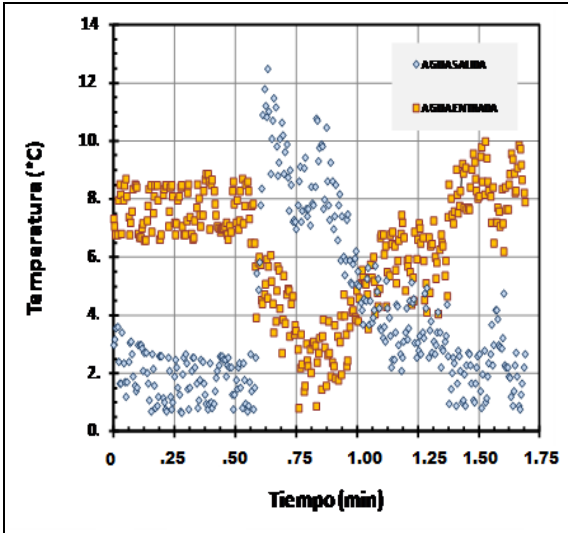


Figura 1 Gráfica de temperatura de agua de enfriamiento en la muestra 1

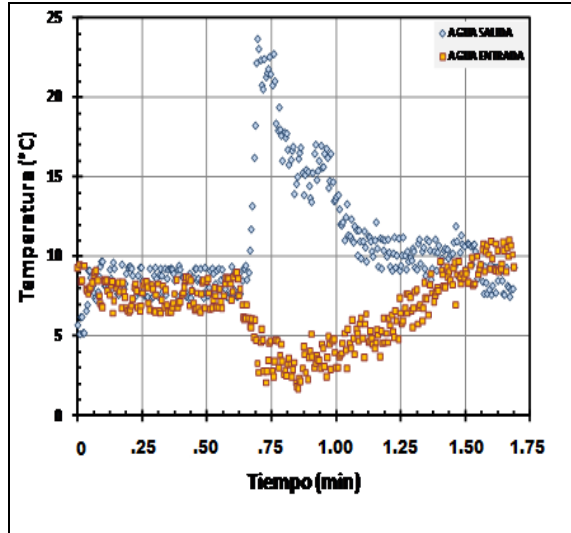


Figura 2 Gráfica de temperatura de agua de enfriamiento en la muestra 2

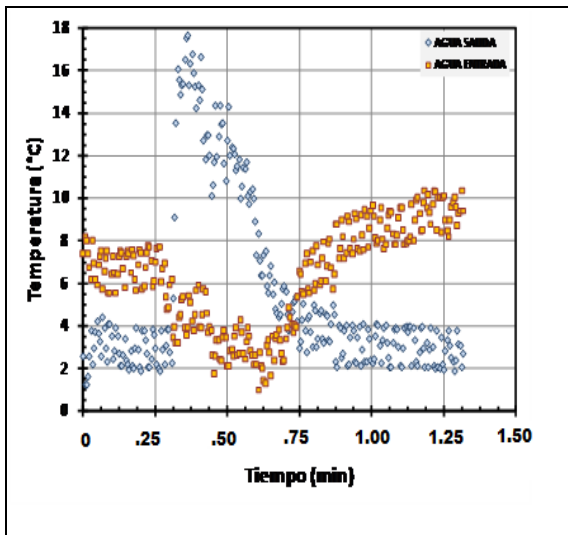


Figura 3 Gráfica de temperatura de agua de enfriamiento en la muestra 3.

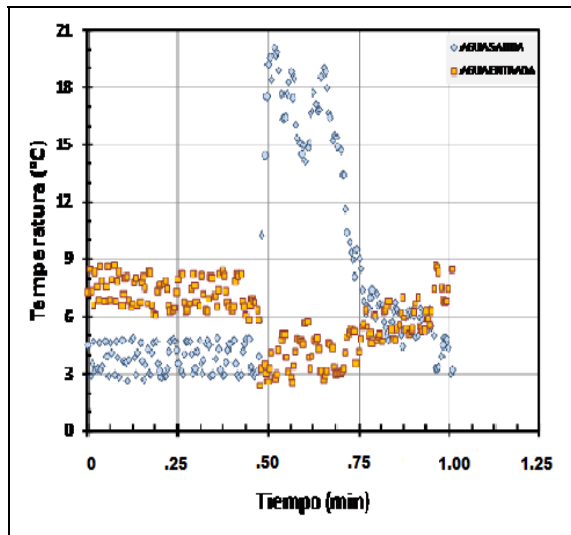


Figura 4 Gráfica de temperatura de agua de enfriamiento en la muestra 4.

(3) **Medición de temperatura de agua de enfriamiento, durante la generación de lingotes.**

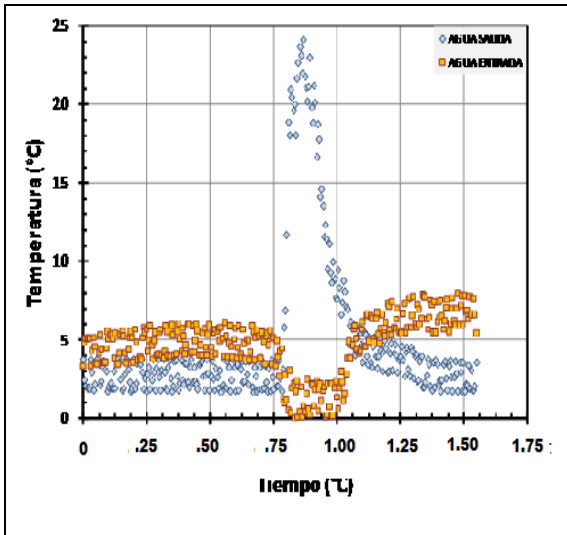


Figura 5 Gráfica de temperatura de agua de enfriamiento en la muestra 5.

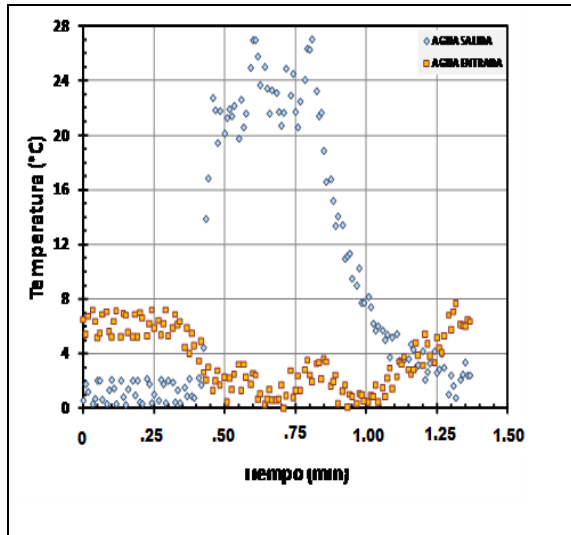


Figura 6 Gráfica de temperatura de agua de flujo de enfriamiento en la muestra 6.

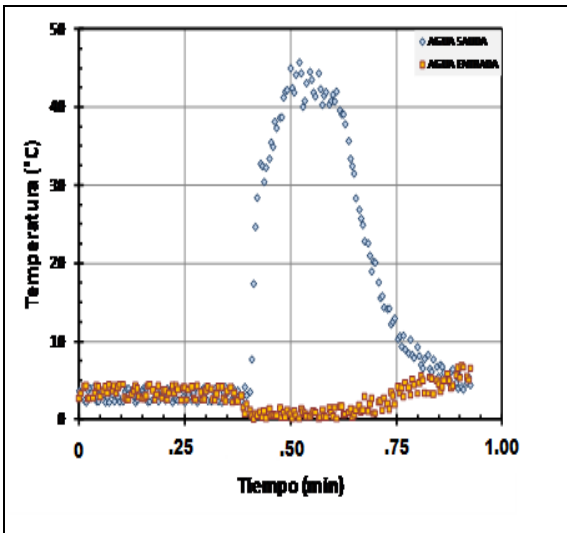


Figura 7 Gráfica de temperatura de agua de enfriamiento en la muestra 7.

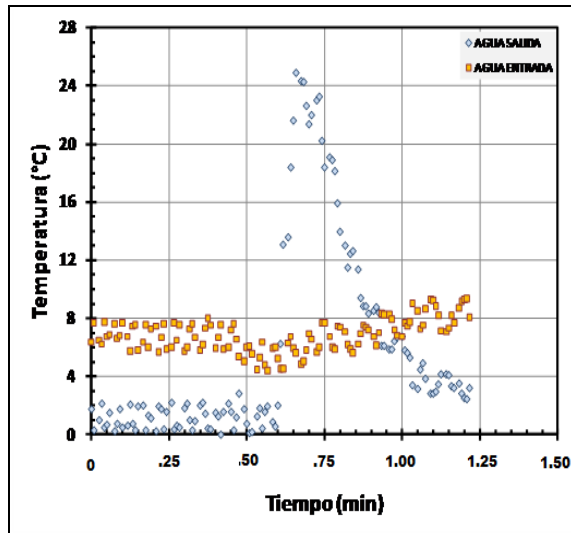


Figura 8 Gráfica de temperatura de agua de enfriamiento en la muestra 9

(4) Lectura de temperaturas durante la solidificación de los lingotes

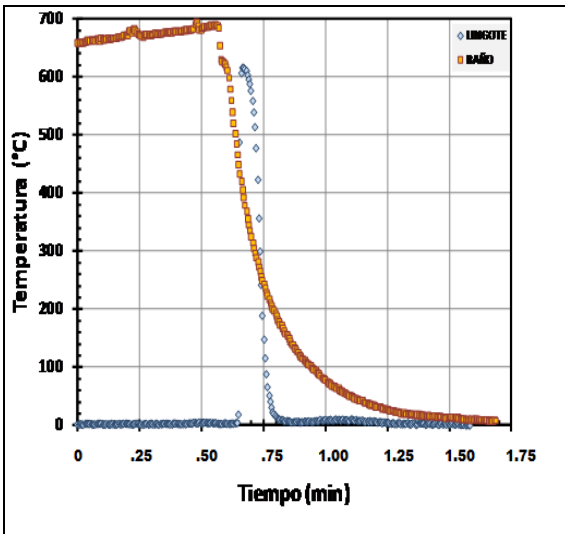


Figura 1 Curva de enfriamiento durante la formación del lingote (muestra 2).

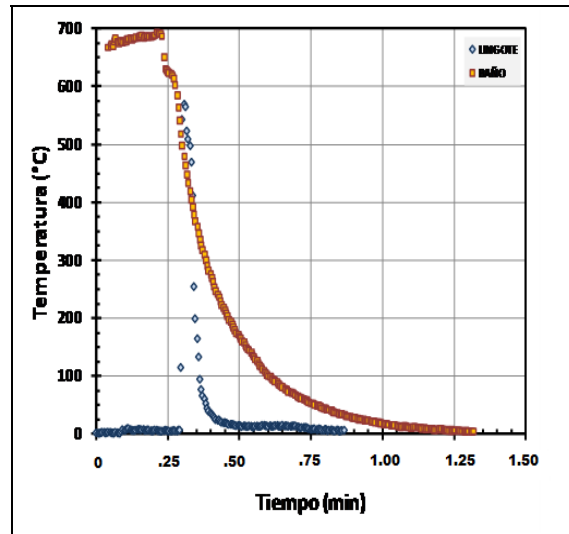


Figura 2 Curva de enfriamiento durante la formación del lingote (muestra 3).

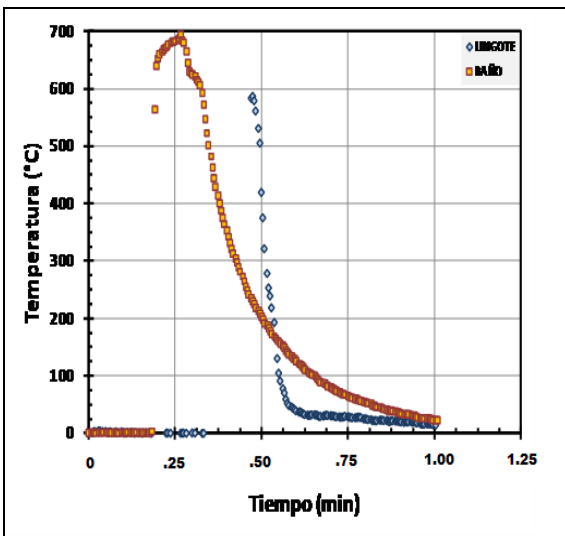


Figura 3 Curva de enfriamiento durante la formación del lingote (muestra 4).

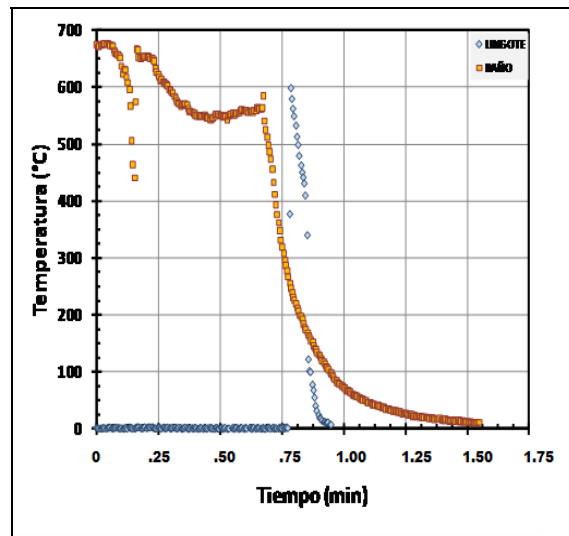


Figura 4 Curva de enfriamiento durante la formación del lingote (muestra 5).

(4) Lectura de temperaturas durante la solidificación de los lingotes

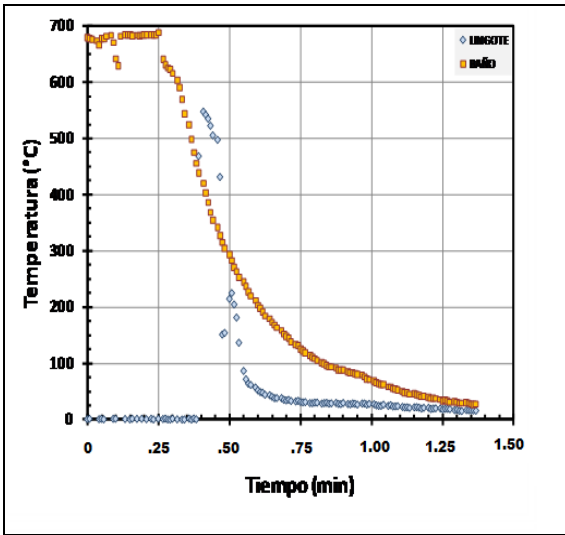


Figura 5 Curva de enfriamiento durante la formación del lingote (muestra 6).

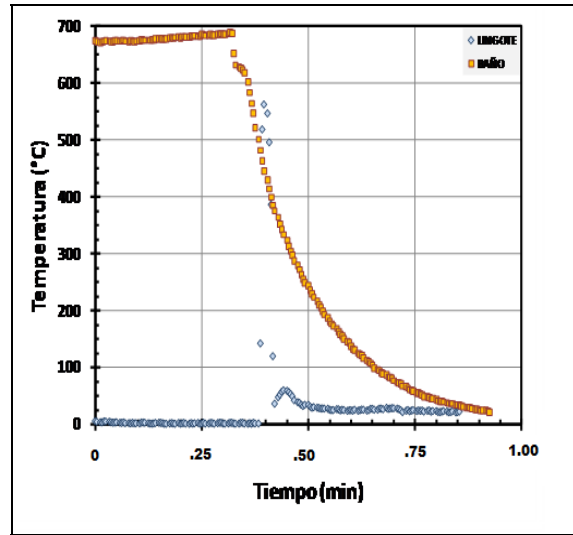


Figura 6 Curva de enfriamiento durante la formación del lingote (muestra 7).

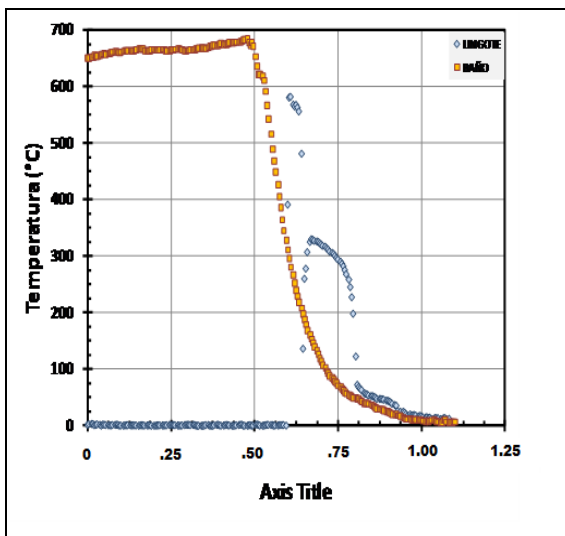


Figura 7 Curva de enfriamiento durante la formación del lingote (muestra 8).

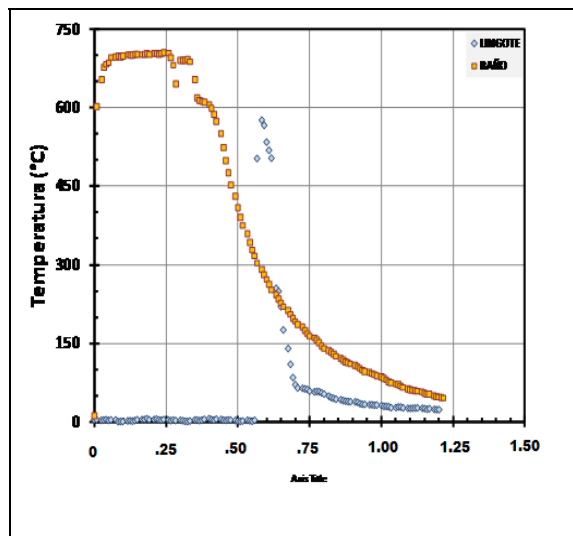


Figura 8 Curva de enfriamiento durante la formación del lingote (muestra 9).

- (5) **Fotografías de los microataques efectuados en cada muestra de los lingotes**

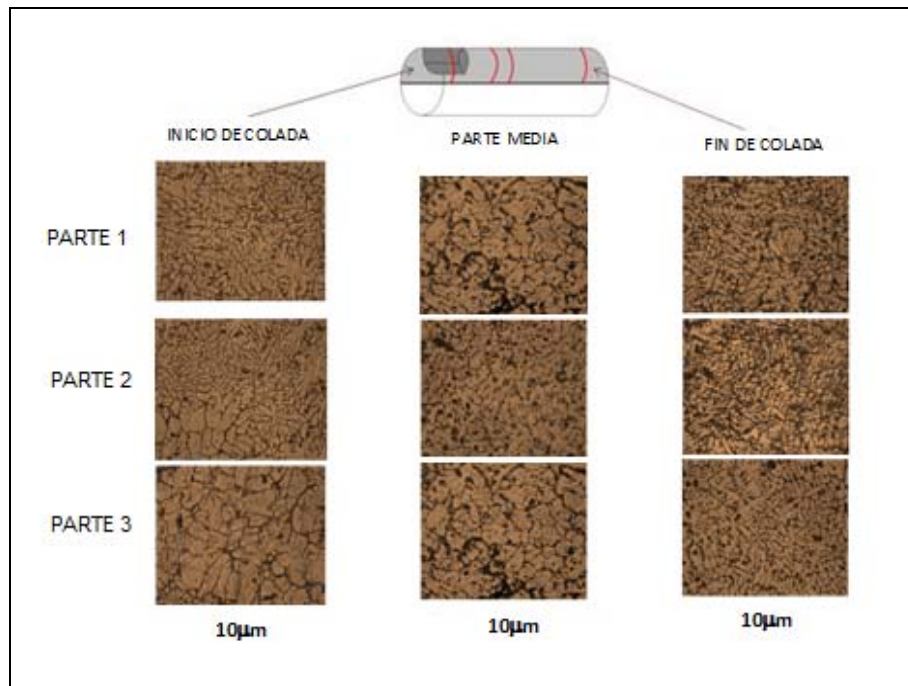


Figura 1 Fotografía del microataque del segundo lingote.

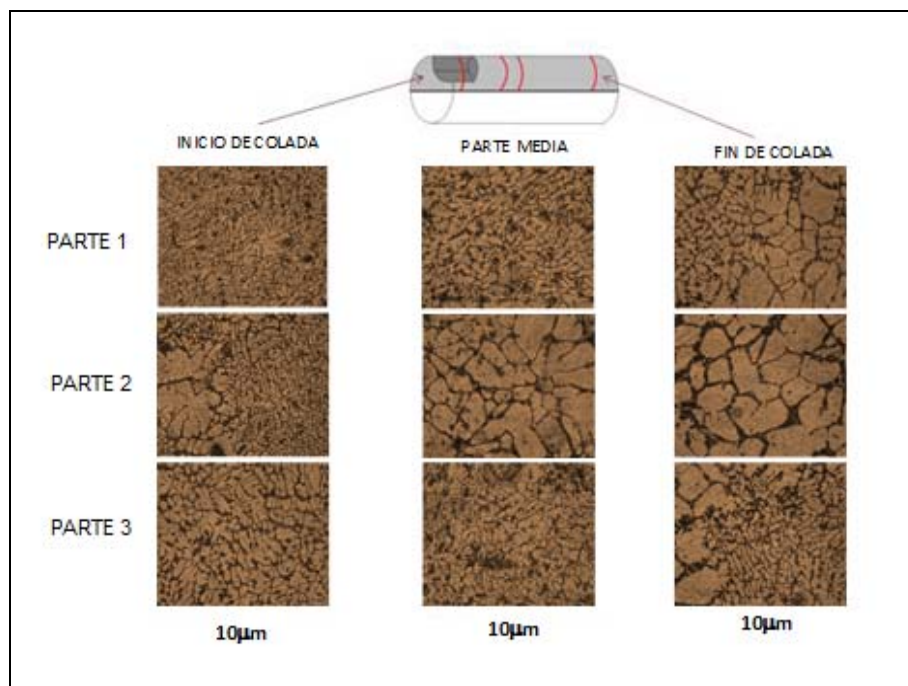


Figura 2 Fotografía del microataque del tercer lingote.

- (5) **Fotografías de los microataques efectuados en cada muestra de los lingotes**

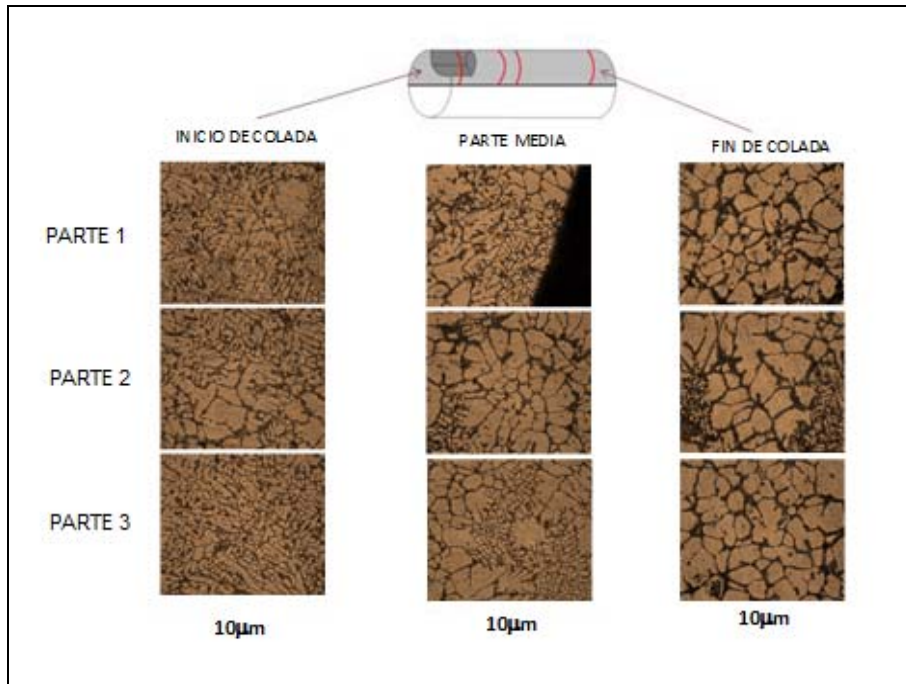


Figura 3 Fotografía del microataque del cuarto lingote.

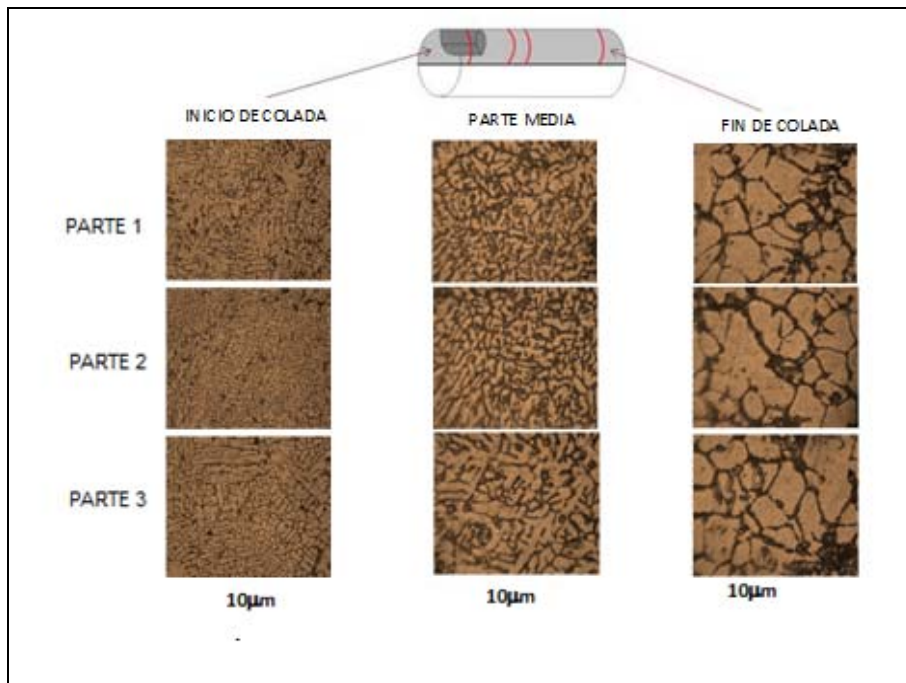


Figura 4 Fotografía del microataque del quinto lingote.

- (5) **Fotografías de los microataques efectuados en cada muestra de los lingotes**

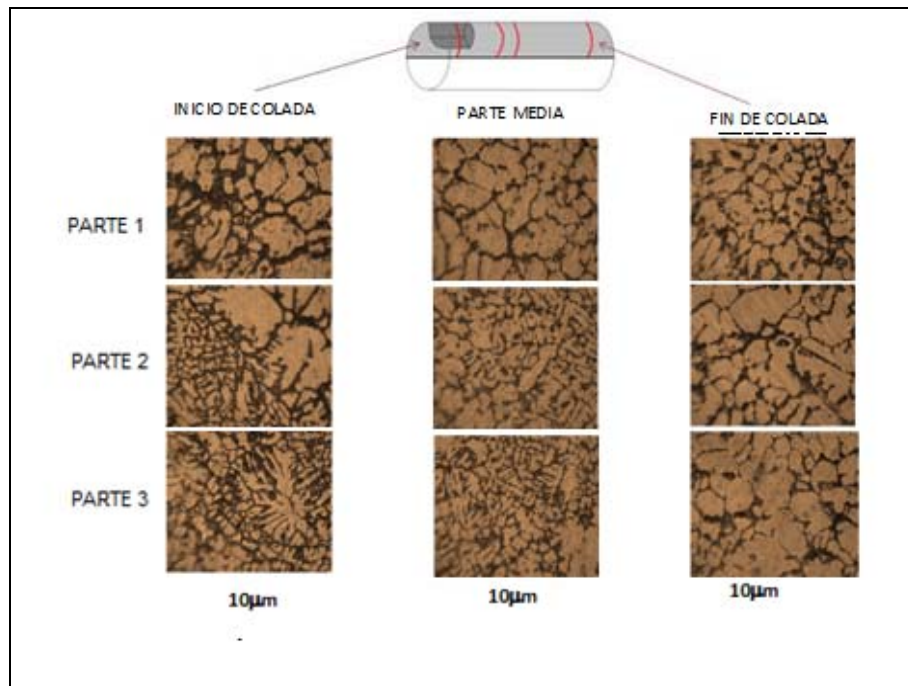


Figura 5 Fotografía del microataque del sexto lingote.

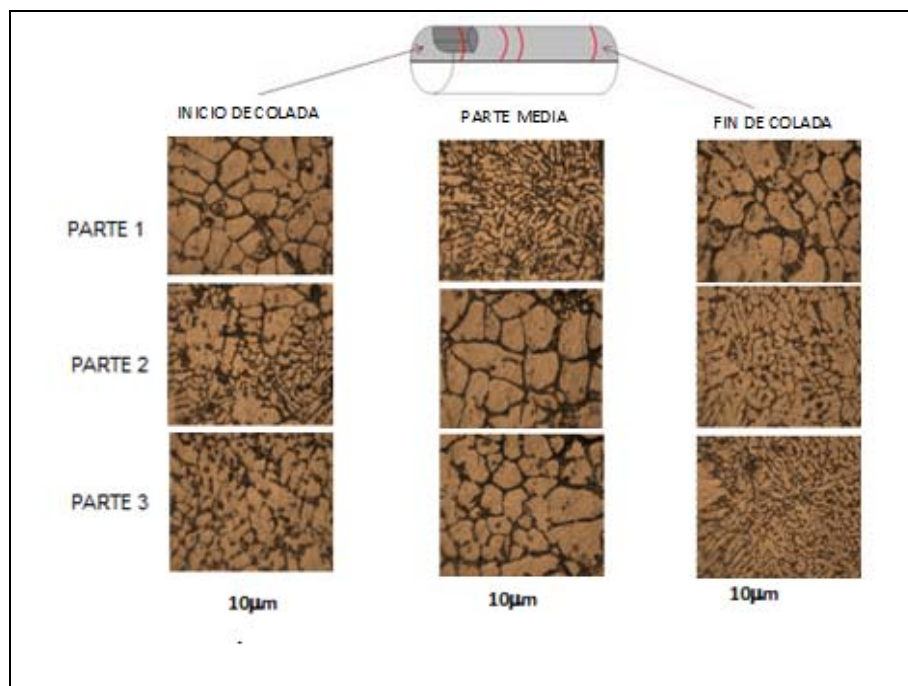


Figura 6 Fotografía del microataque del séptimo lingote.

- (5) **Fotografías de los microataques efectuados en cada muestra de los lingotes**

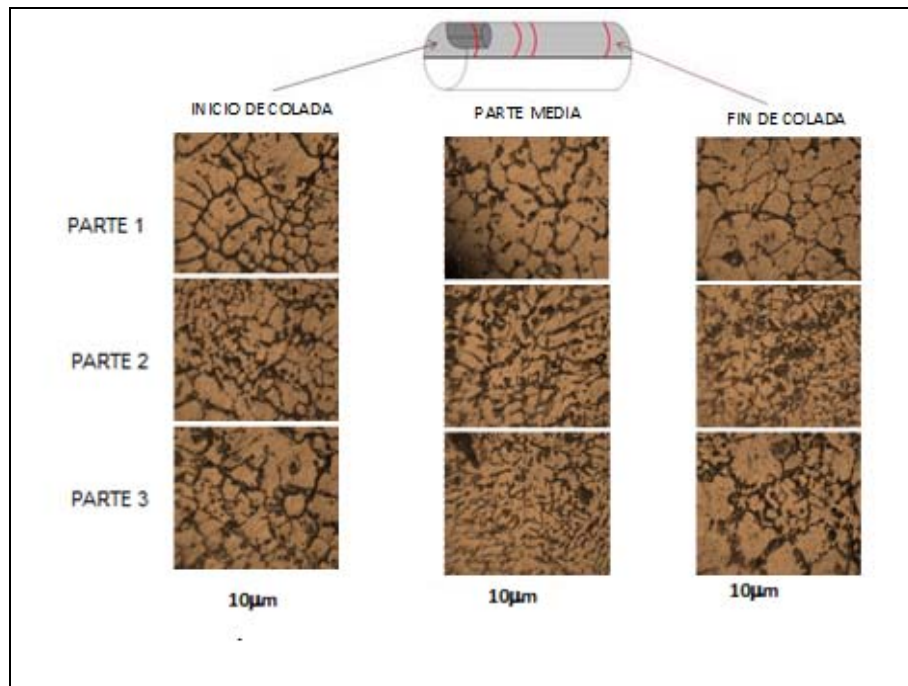


Figura 7 Fotografía del microataque del octavo lingote.

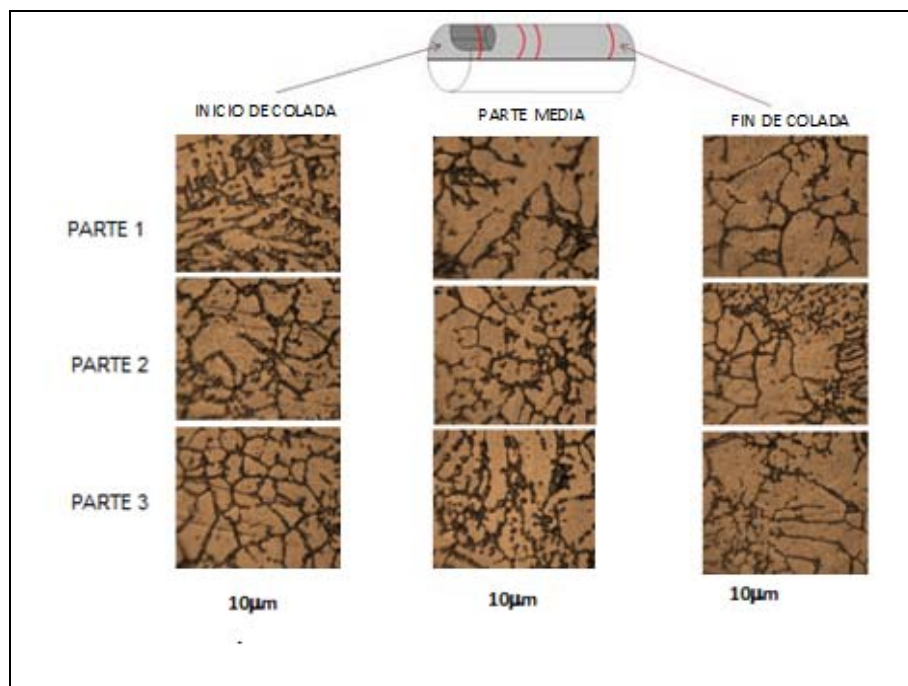


Figura 8 Fotografía del microataque del noveno lingote.

(6) Procedimiento para corte y desbaste de barras para ensayo de dureza.

Se realizó una inspección visual a todas las barras seleccionando, las secciones de los lingotes que estuvieran libres de residuos del termopar utilizado para el rastreo de las temperaturas durante la solidificación de las barras, omitiendo las sometidas al análisis metalográfico; se tomó en cuenta las muestras con superficies planas para obtenerlas totalmente paralelas, lo cual se llevó a cabo de la siguiente manera:

Se maquinaron las secciones con ayuda de una fresadora en la cual se utilizó herramienta de corte de un solo filo para desbaste fino debido a las características del aluminio, se utilizó como fluido de corte un aceite animal para obtener un buen acabado superficial y así mismo reducir la alteración en las propiedades mecánicas de las barras a maquinar que se originan durante el maquinado y que a su vez pueden originar lecturas erróneas al realizar los perfiles de dureza, los parámetros más importantes a mencionar durante la operación de maquinado son: la velocidad de corte utilizada durante la operación de maquinado para las secciones de aluminio a ser perfiladas fue de 1400 rev/min, con profundidades de corte de 0.05 mm.

Estos parámetros en la operación de maquinado se conservaron y la operación se realizó en repetidas ocasiones para cada sección hasta obtener las superficies (interior y exterior) con un buen acabado durante la operación de maquinado de las barras de aluminio obteniendo superficies lo más paralelas posibles.

Realizando la operación de maquinado para cada una de las secciones de aluminio, fue de suma importancia cuidar que la cantidad de material removido fuera el menor posible ya que los valores de dureza que se obtienen están en función de la zona en la cual se esté llevando a cabo la indentación; es decir conservar el concepto de superficie interior y superficie exterior de la muestra, obteniendo con esto la lectura de las durezas en la región que realmente se está considerando y no en zonas distintas a las indicadas para el lingote.

(7) Procedimiento para los perfiles de dureza.

Las etapas realizadas fueron:

1. Tomar lecturas de dureza a lo largo de la sección iniciando de la región de inicio de colada hacia el final de esta, dejando una distancia de 7mm entre cada indentación, con ayuda de un durómetro Vickers Mitutoyo, AVK C-2, utilizando una carga de 5kg. con un indentador punta de diamante con forma piramidal.
2. Se enciende el durómetro y se enfoca el ocular localizando una zona de la pieza a evaluar, una vez enfocada la muestra se gira el revólver del durómetro para posicionar el indentador, se oprime el botón para obtener la huella, en aproximadamente 10 segundos, enseguida se eleva el indentador y nuevamente se gira el revólver para enfocar ahora la indentación obtenida,
3. Con las líneas paralelas que se visualizan con el ocular, se coloca cada una de estas líneas en los extremos de la indentación y se oprime el botón que se encuentra en el ocular, posteriormente se gira 90 grados el ocular y se colocan nuevamente las líneas en los extremos de la indentación y se oprime nuevamente el botón que se encuentra en el ocular, seguido de esto el durómetro proporciona la dureza de la pieza.
4. Una vez obtenido el valor de dureza se regresa el ocular a su posición anterior y se juntan las líneas mediante la ayuda del ocular, hecho esto se procede a realizar una nueva indentación en la pieza que se está perfilando, repitiendo los pasos 2 y 3, cuantas veces sea necesario.
5. Se perfila la superficie interior y posteriormente la superficie exterior de cada sección de aluminio, conservando el sentido de la colada de las barras, realizando una cantidad de indentaciones adecuada para cada sección de aluminio evaluada aproximadamente entre 7 y 11 indentaciones por superficie para cada sección, esto es debido a las longitudes de las secciones obtenidas durante el corte de las barras.
6. Se repite los pasos anteriores para cada una de las secciones a perfilar conservando por consiguiente los mismos criterios.

(8) Mapas de dureza de las muestras en estudio

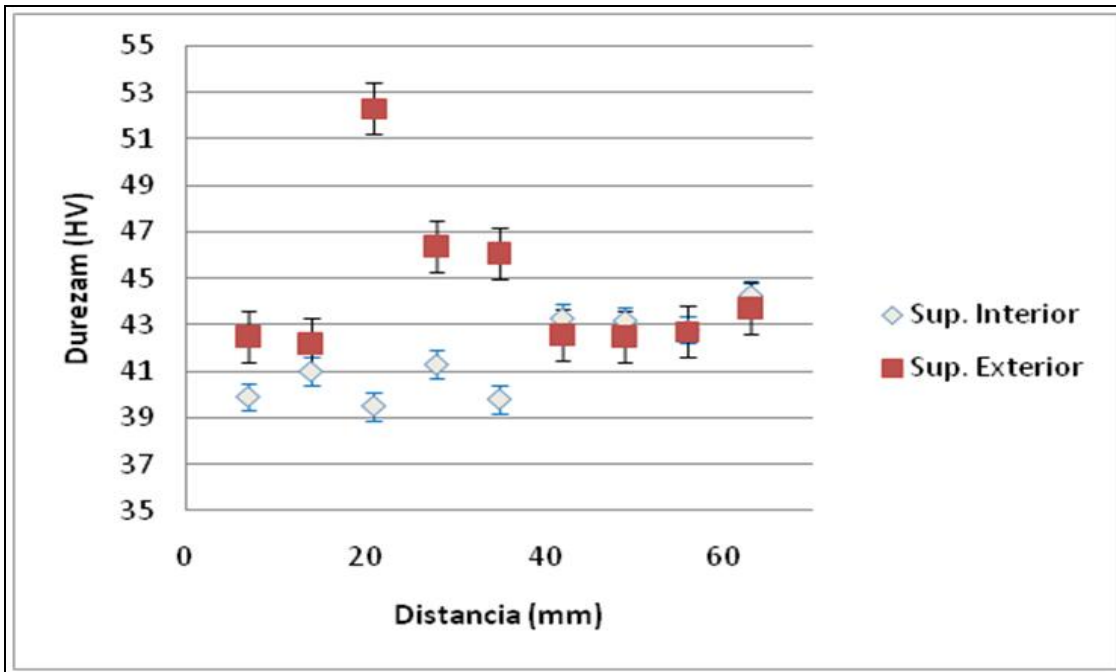


Figura 1 Mapa de durezas en escala Vickers (HV), para la muestra 1.

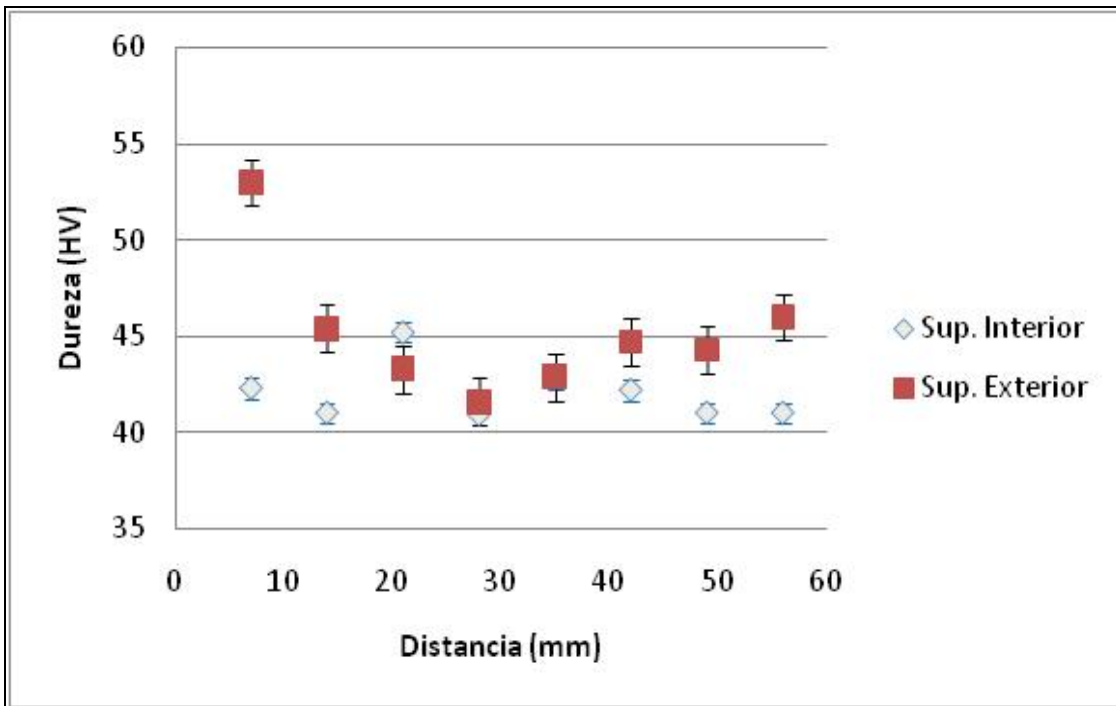


Figura 2 Mapa de durezas en escala Vickers (HV), para la muestra 2.

(8) Mapas de dureza de las muestras en estudio

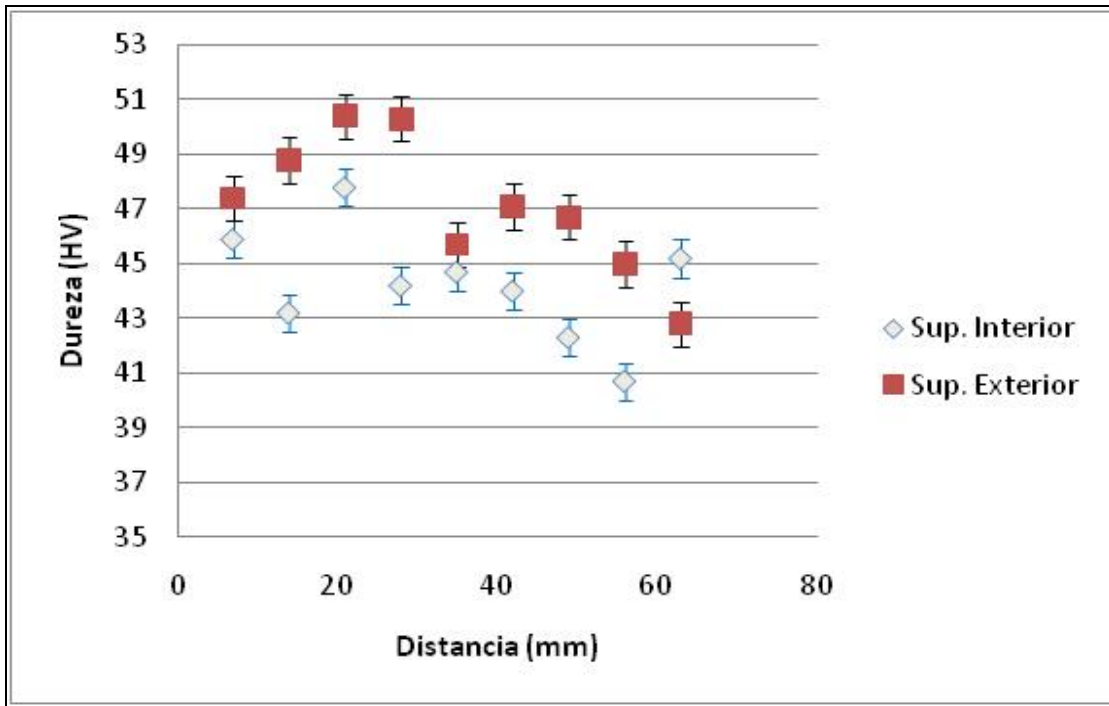


Figura 3 Mapa de durezas en escala Vickers (HV), para la muestra 3.

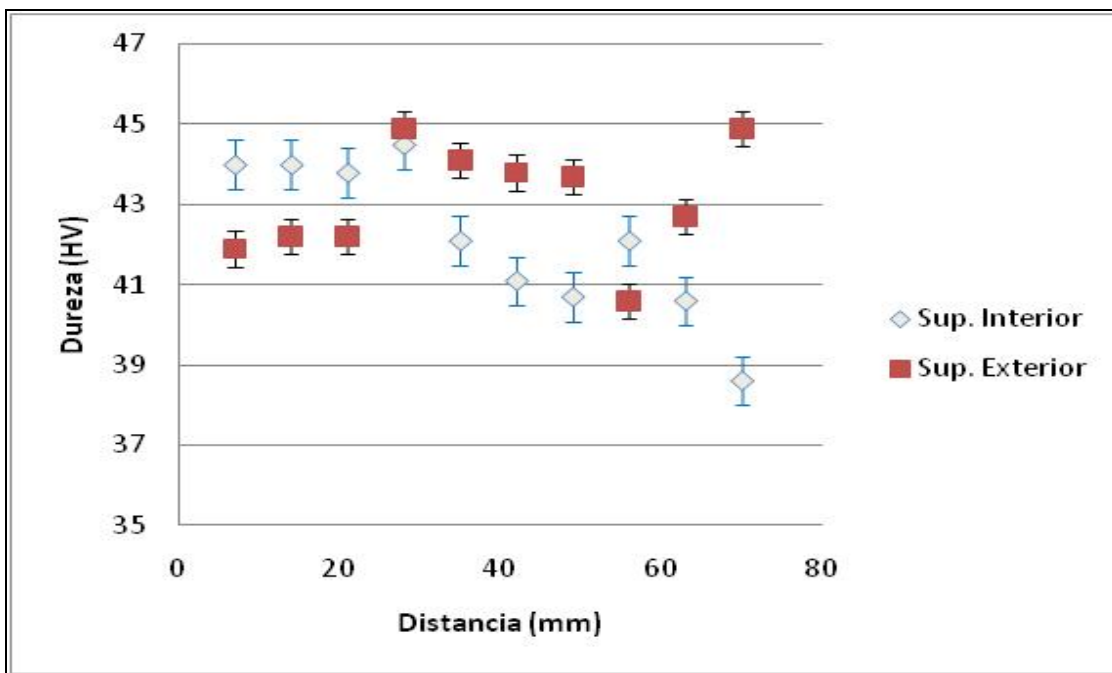


Figura 4 Mapa de durezas en escala Vickers (HV), para la muestra 4.

(8) Mapas de dureza de las muestras en estudio

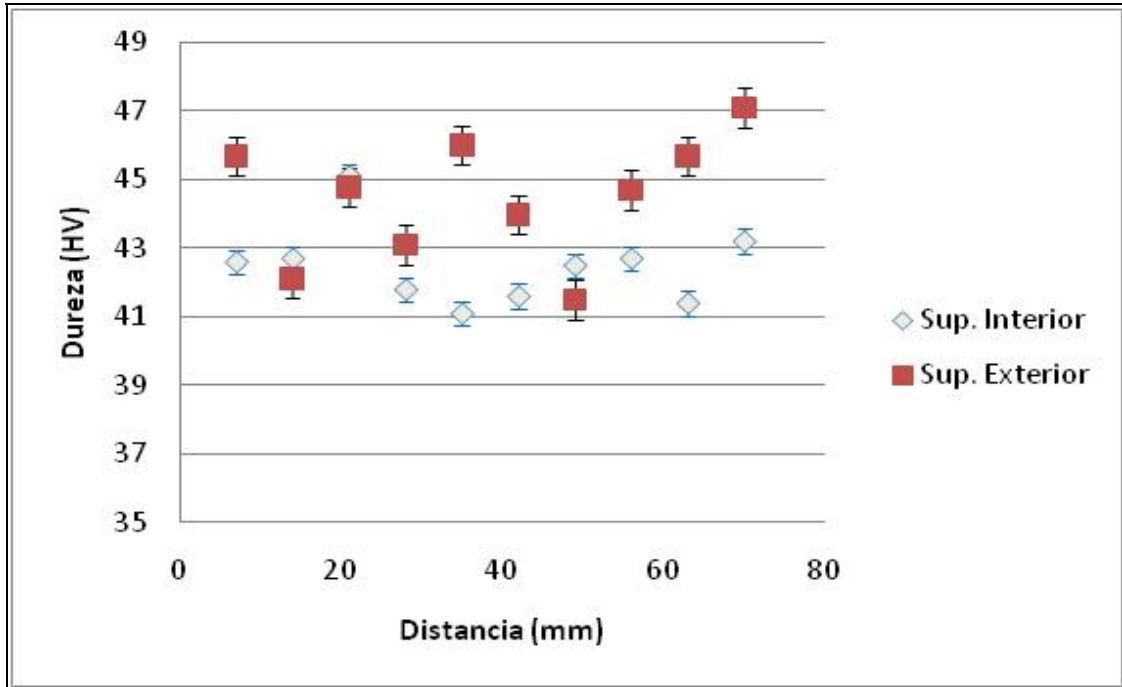


Figura 5 Mapa de durezas en escala Vickers (HV), para la muestra 6.

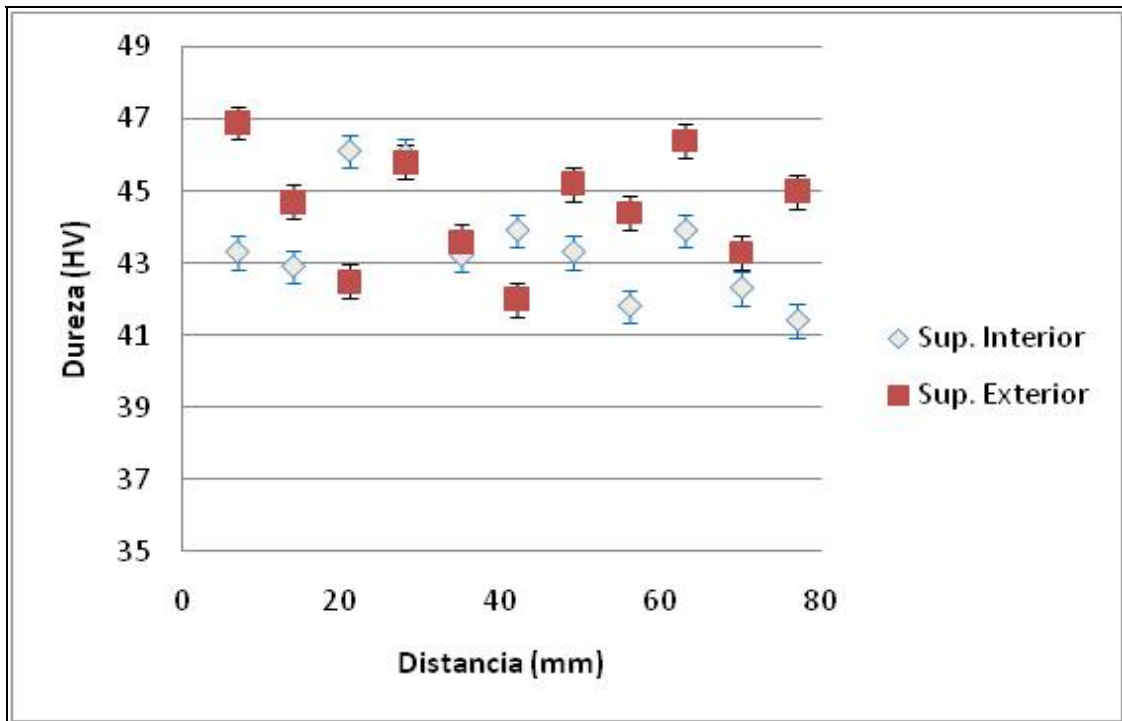


Figura 6 Mapa de durezas en escala Vickers (HV), para la muestra 7.

(8) Mapas de dureza de las muestras en estudio

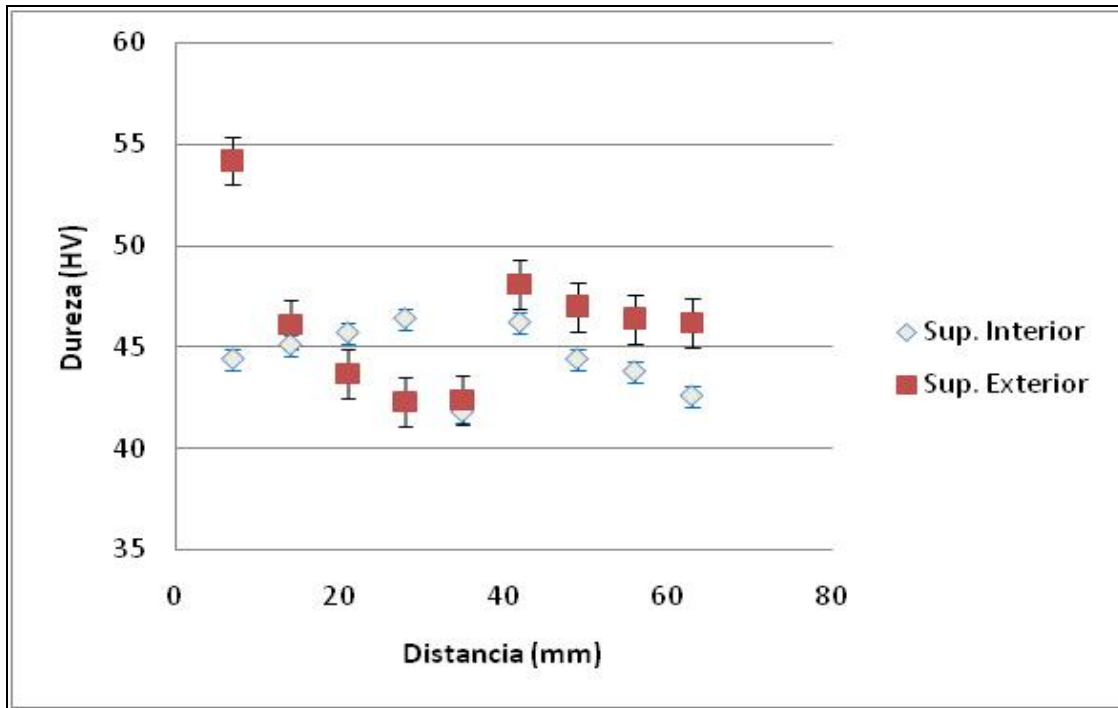


Figura 7 Mapa de durezas en escala Vickers (HV), para la muestra 8.

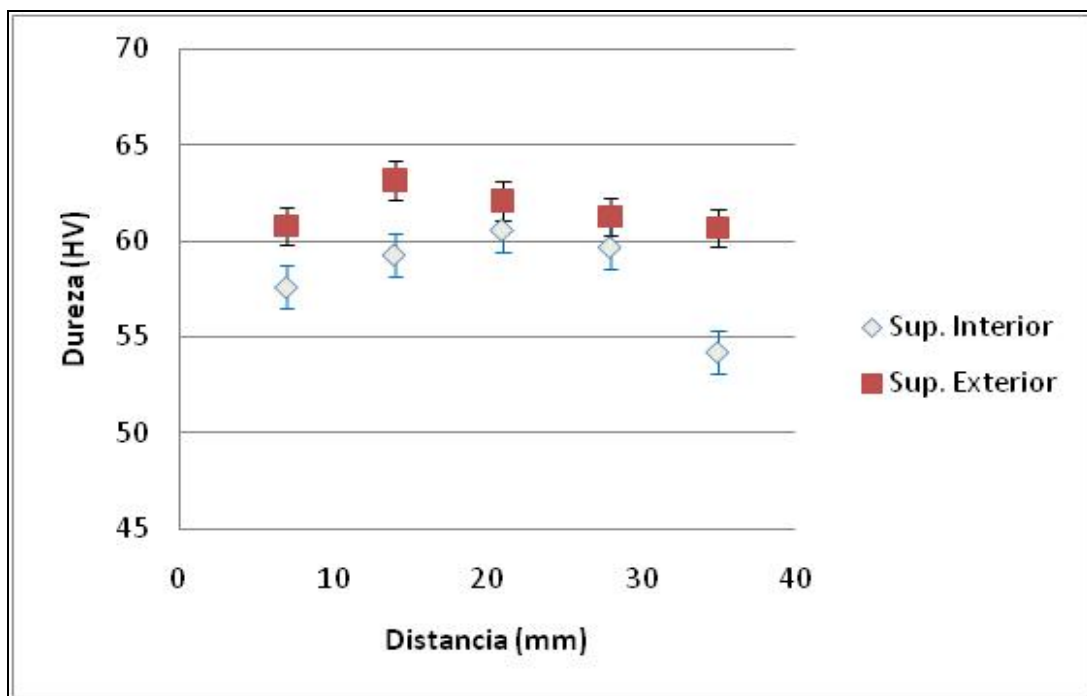


Figura 8 Mapa de durezas en escala Vickers (HV), para la muestra 9.

(9) Procedimiento para ensayos de tensión.

Una vez obtenidas los especímenes para ensayo de tensión se realizaron los ensayos en una máquina de ensayos universales (*marca SHIMATZU, modelo SLFL-100 kN*) la cual cuenta con interface y software para proporcionar los datos obtenidos del ensayo (carga, distancia y tiempo).

Al realizar todos los ensayos se utilizó para los especímenes una velocidad de 1mm/min deteniendo cada uno de los ensayos al iniciar la fractura de los especímenes, de acuerdo a los siguientes pasos:

1. Colocar el espécimen a ensayar en la máquina de ensayos universales, sujetándolo con ayuda de un par de mordazas, las cuales están sujetadas a la máquina de ensayos universales, verificando que el espécimen quede bien sujetado por las mordazas para poder llevar a cabo el ensayo de manera correcta.
2. Una vez montado el espécimen a ensayar con ayuda del software de la máquina, se calibra el equipo, de igual manera se introduce la velocidad a la cual se lleva a cabo (1mm/min).
3. Iniciar con el ensayo de tensión para el espécimen mientras el software de la maquina va obteniendo y almacenando datos del ensayo (carga en kilonewtons, alargamiento en milímetros y tiempo en segundos).
4. Detener el ensayo una vez que el espécimen llega a la fractura, ocasionada por la carga que está siendo aplicada por la máquina de ensayos universal.
5. Retirar las partes del espécimen fracturado y manera simultánea almacenar los datos obtenidos mediante el software de la maquina durante el ensayo, antes de colocar el espécimen próximo a ensayar.
6. Repetir los pasos del 1 al 5 para cada uno de los especímenes.

(10) **Curvas de Esfuerzo-deformación para pruebas de tensión**

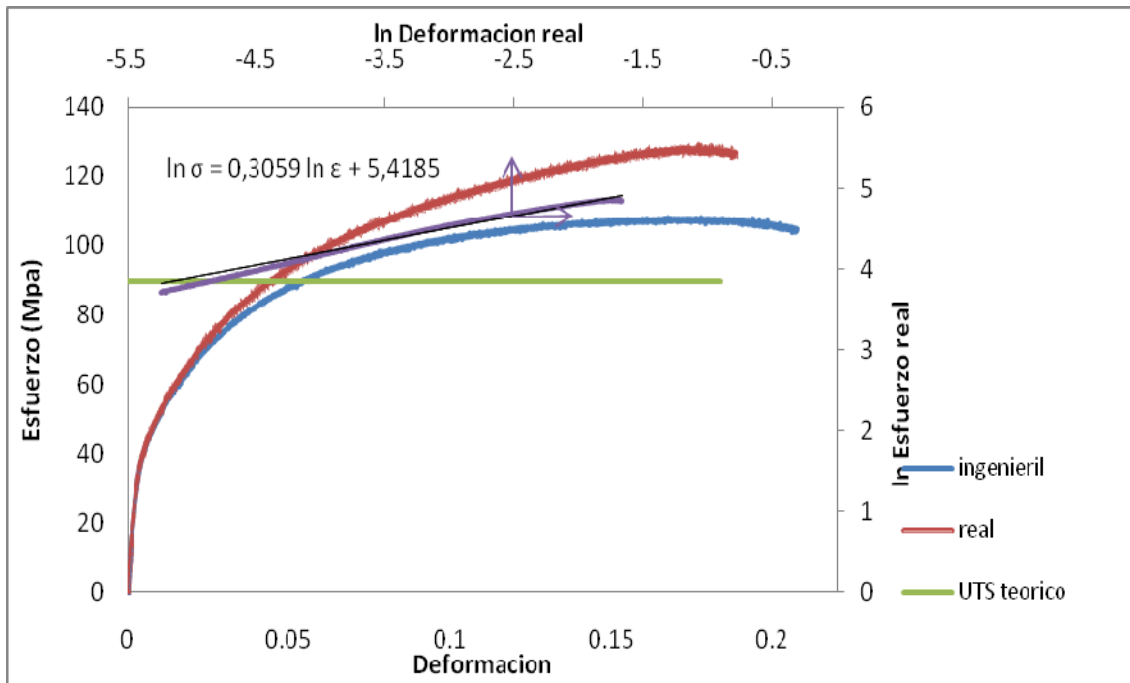


Figura 1 Curvas esfuerzo-deformación para la barra 1.

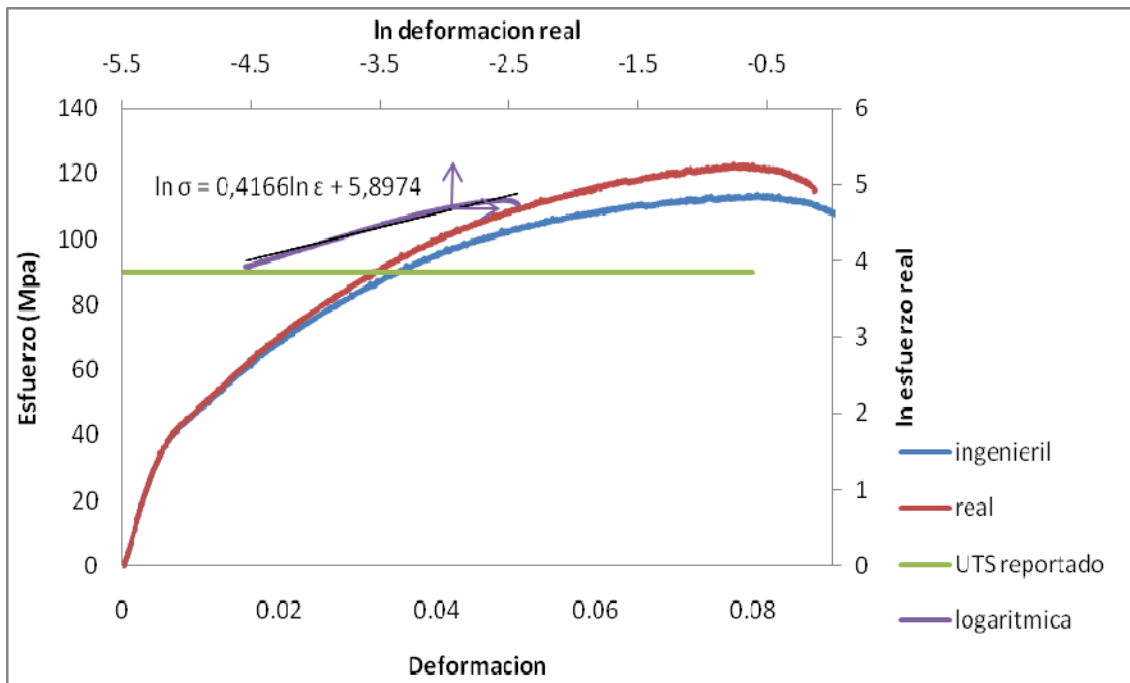


Figura 2 Curvas esfuerzo-deformación para la barra 2.

(10) **Curvas de Esfuerzo-deformación para pruebas de tensión**

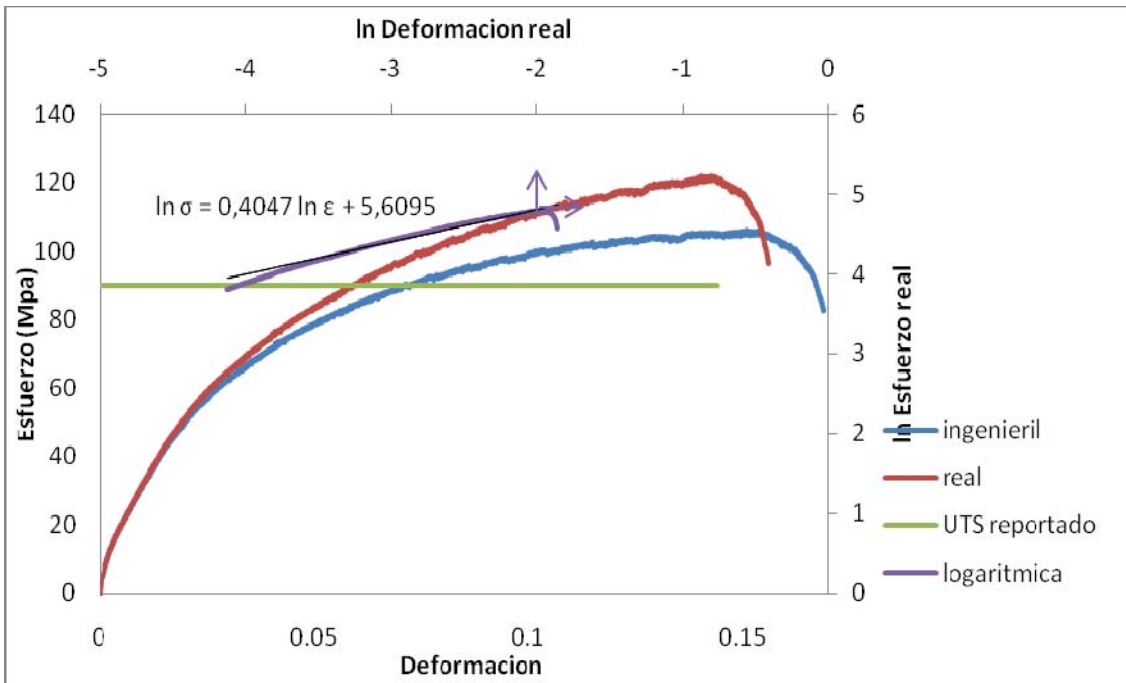


Figura 4 Curvas esfuerzo-deformación para la barra 4.

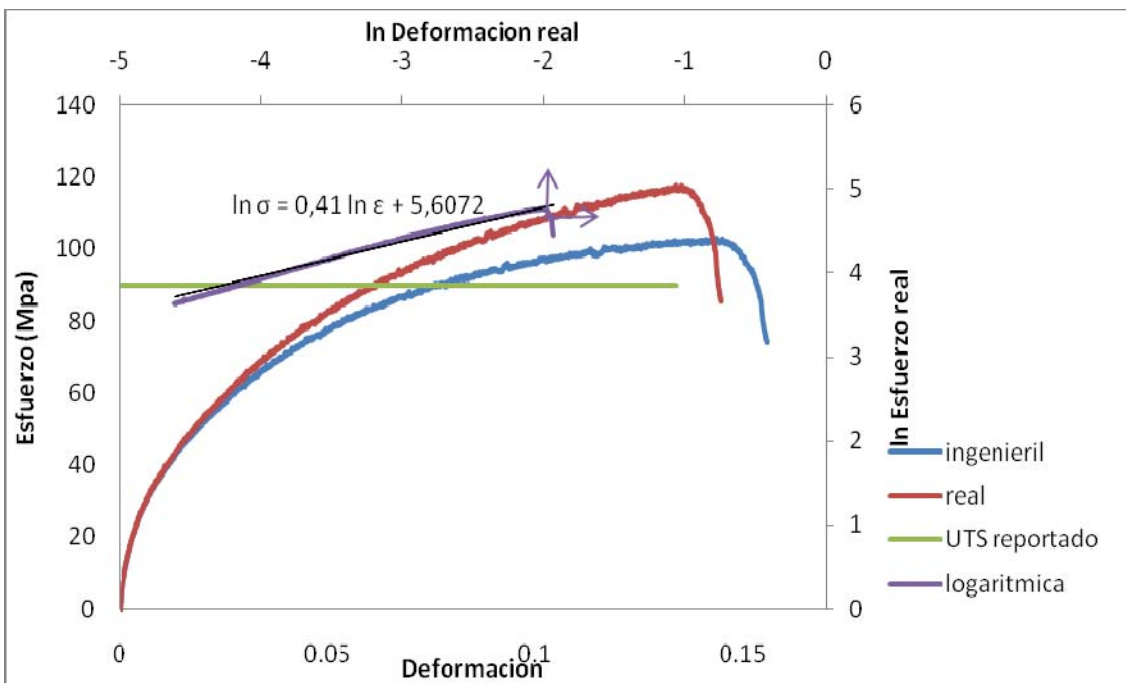


Figura 5 Curvas esfuerzo-deformación para la barra 6.

(10) **Curvas de Esfuerzo-deformación para pruebas de tensión**

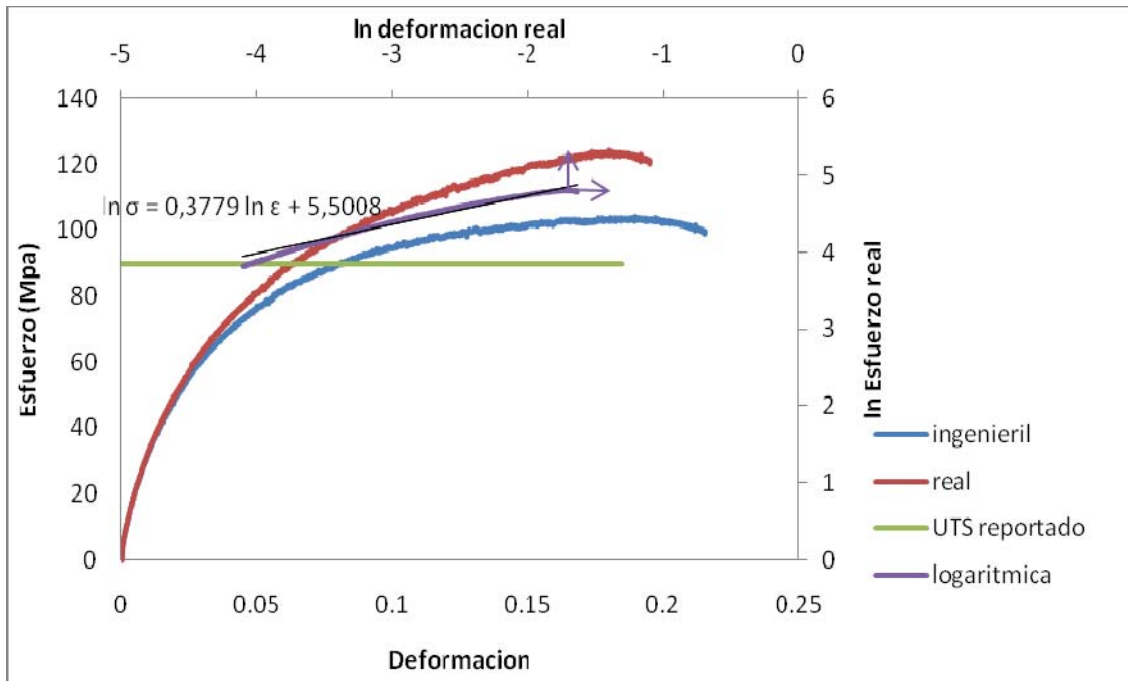


Figura 6 Curvas esfuerzo-deformación para la barra 7.

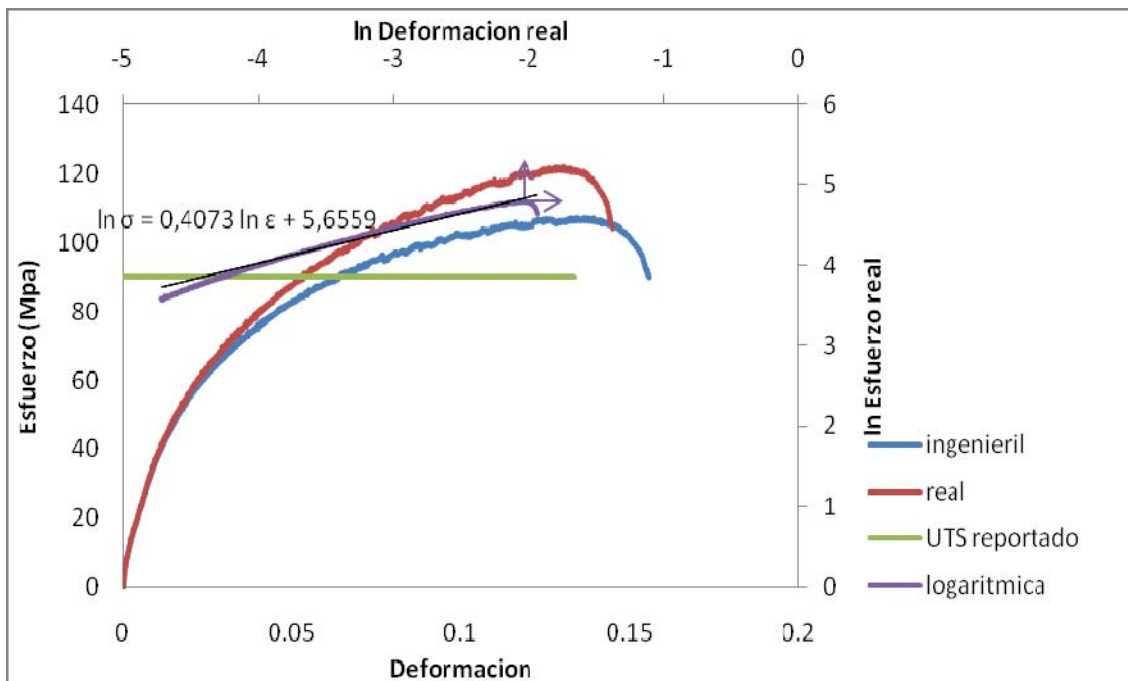


Figura 7 Curvas esfuerzo-deformación para la barra 8.

(10) Curvas de Esfuerzo-deformación para pruebas de tensión

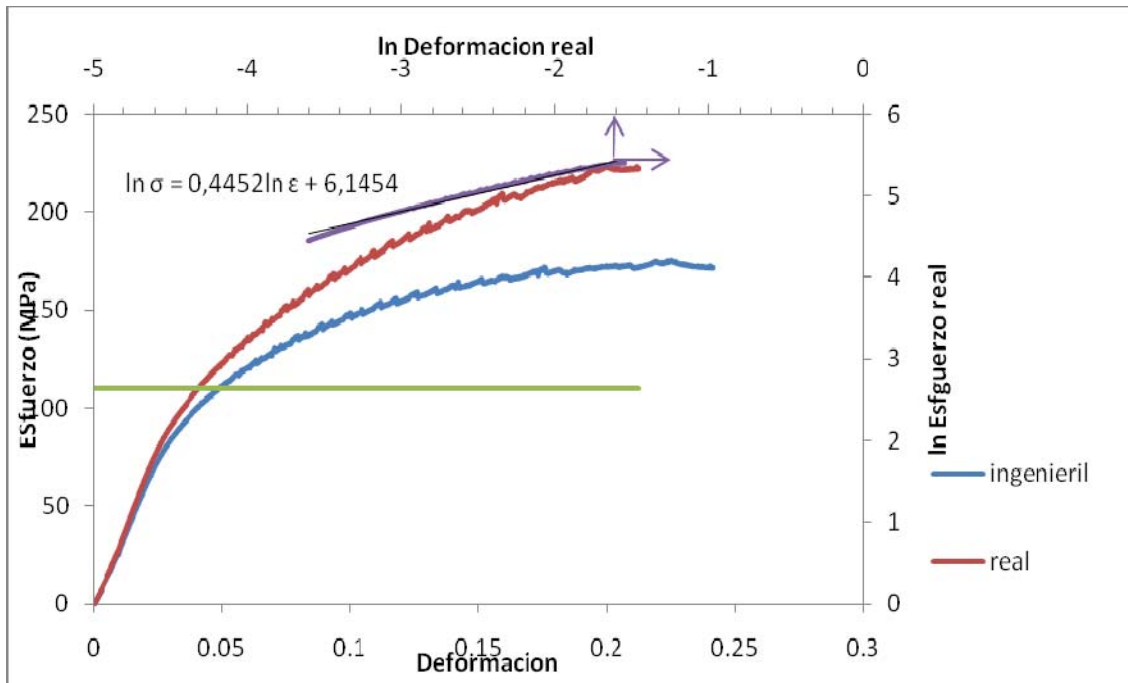
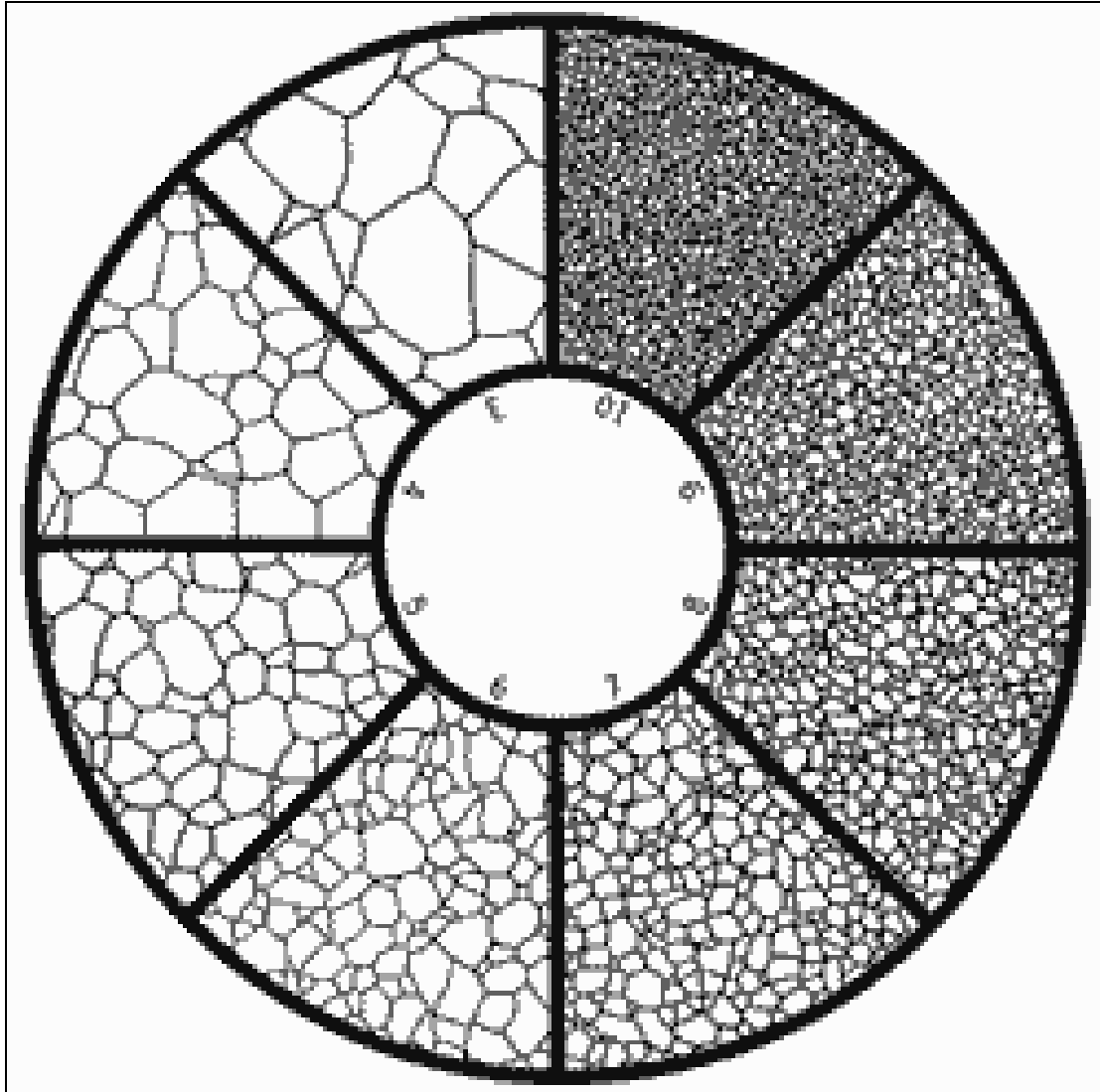


Figura 8 Curvas esfuerzo-deformación para la barra 9.

(11) patrón de comparación de tamaños de grano establecido en la norma ASTM 112

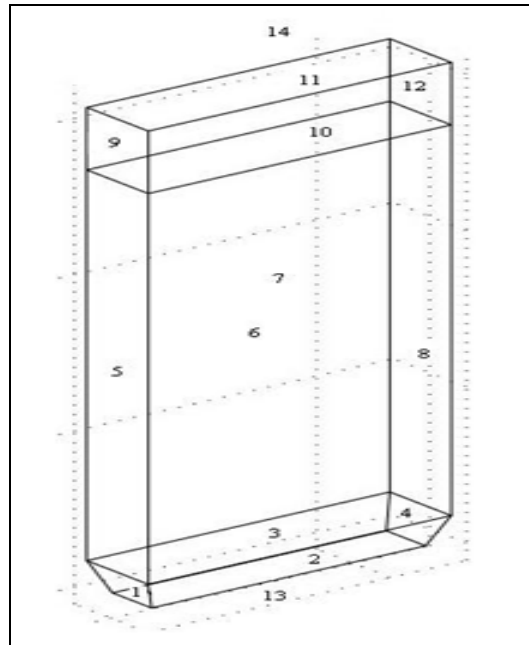


Patrón de comparación de tamaños de grano

(12) **Comparación entre moldes y flujo de agua**

A continuación se muestran los resultados de las comparaciones de las simulaciones numéricas llevadas a cabo. La figura que se presenta es la misma en todos los estudios, pues durante el desarrollo de estas la ubicación de las condiciones de frontera fue siempre la misma.

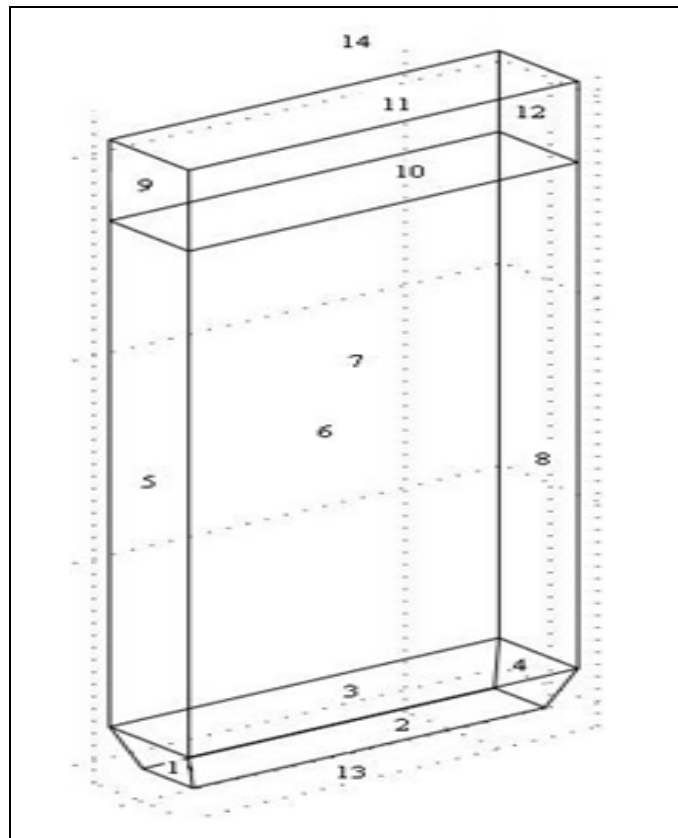
Molde de 10 cm de altura y $h=150$:



Condiciones de frontera	Calor liberado del lingote (W)	% Calor liberado por área del lingote	% de distribución de calor por sección
Molde			
12	6841.35	77.91	8.18
11	25760.86		30.81
10	25412.00		30.39
9	7129.53		8.52
Cuerpo			
8	1721.83	21.09	2.05
7	7088.39		8.50
6	7145.07		8.54
5	1680.44		2.00
Fondo			
4	76.69	1.00	0.10
3	337.76		0.40
2	339.90		0.41
1	76.44		0.09
TOTAL	83610.88	100	100

(12) **Comparación entre moldes y flujo de agua**

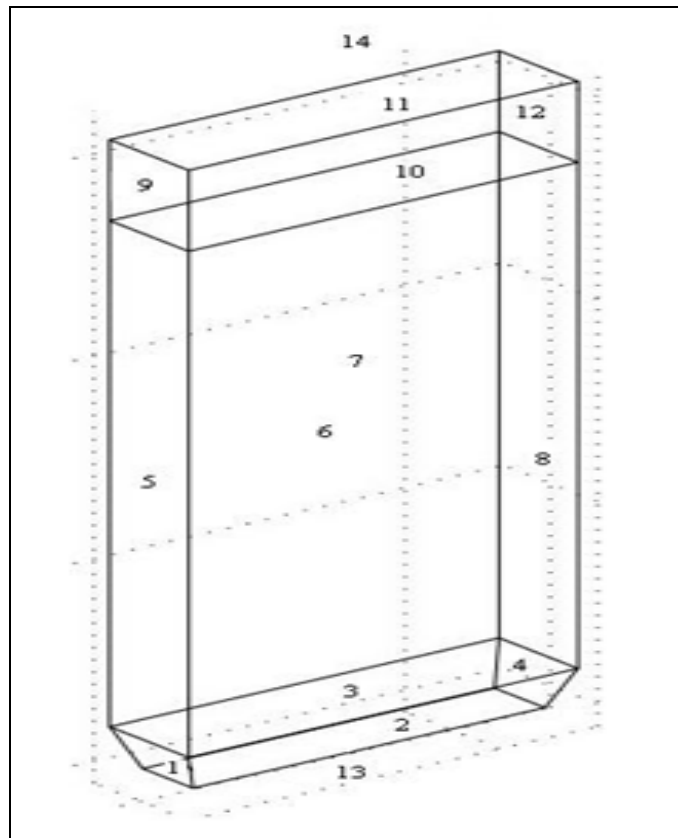
Molde de 10 cm de altura y h=300:



Condiciones de frontera	Calor liberado del lingote (W)	% Calor liberado por área del lingote	% de distribución de calor por sección
Molde			
12	5052.19	66.83	7.17
11	18447.92		26.18
10	18426.48		26.15
9	5169.29		7.33
Cuerpo			
8	2338.82	31.76	3.31
7	8713.12		12.36
6	9066.61		12.86
5	2278.39		3.23
Fondo			
4	89.44	1.41	0.13
3	395.53		0.56
2	395.49		0.56
1	89.19		0.13
TOTAL	70462.47	100	100

(12) **Comparación entre moldes y flujo de agua**

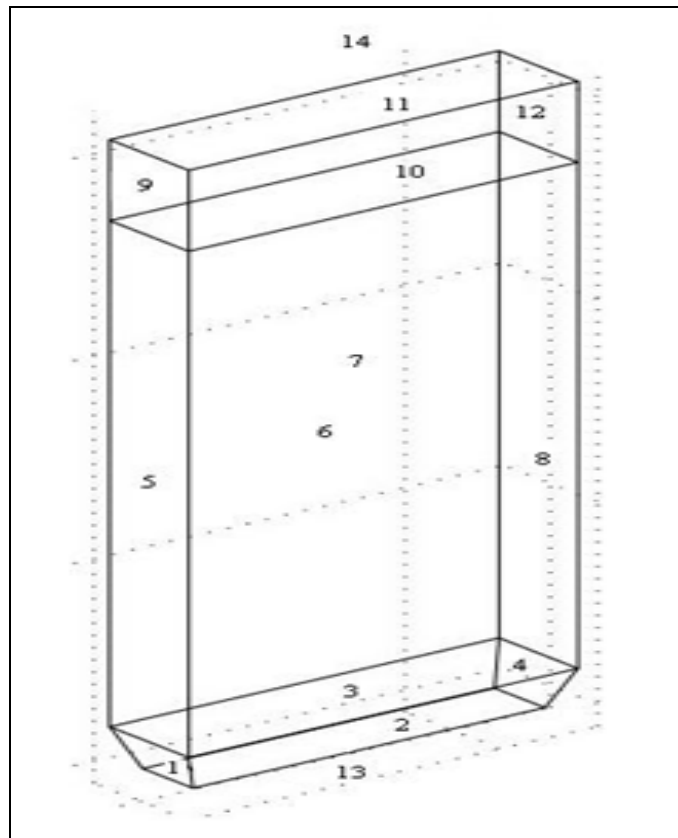
Molde de 10 cm de altura y h=1000



Condiciones de frontera	Calor liberado del lingote (W)	% Calor liberado por área del lingote	% de distribución de calor por sección
Molde			
12	13915.58	78.52	8.25
11	52122.75		30.92
10	52086.34		30.90
9	14237.80		8.44
Cuerpo			0
8	2832.12	16.20	1.68
7	10415.75		6.18
6	11395.38		6.76
5	2668.42		1.58
Fondo			0
4	8108.01	5.28	4.81
3	358.06		0.21
2	358.18		0.21
1	80.78		0.05
TOTAL	168579.17	100	100

(12) **Comparación entre moldes y flujo de agua**

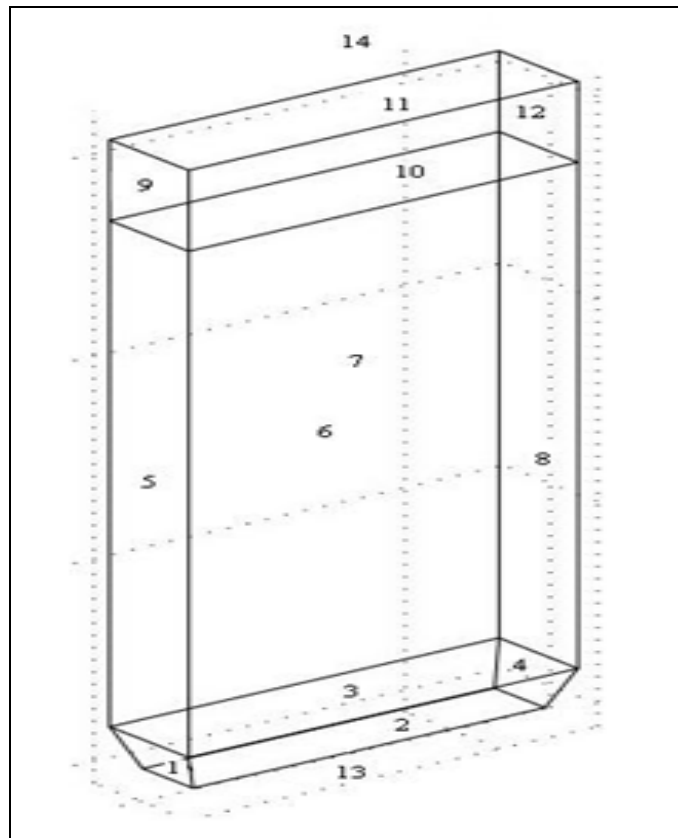
Molde de 30 cm de altura y h=150



Condiciones de frontera	Calor liberado del lingote (W)	% Calor liberado por área del lingote	% de distribución de calor por sección
Molde			
12	6841.35	77.91	8.18
11	25760.86		30.81
10	25412.00		30.39
9	7129.53		8.53
Cuerpo			
8	1721.83	21.09	2.06
7	7088.39		8.48
6	7145.07		8.55
5	1680.44		2.01
Fondo			
4	76.69	0.99	0.09
3	337.76		0.40
2	339.90		0.41
1	76.44		0.09
TOTAL	83610.26	100	100

(12) **Comparación entre moldes y flujo de agua**

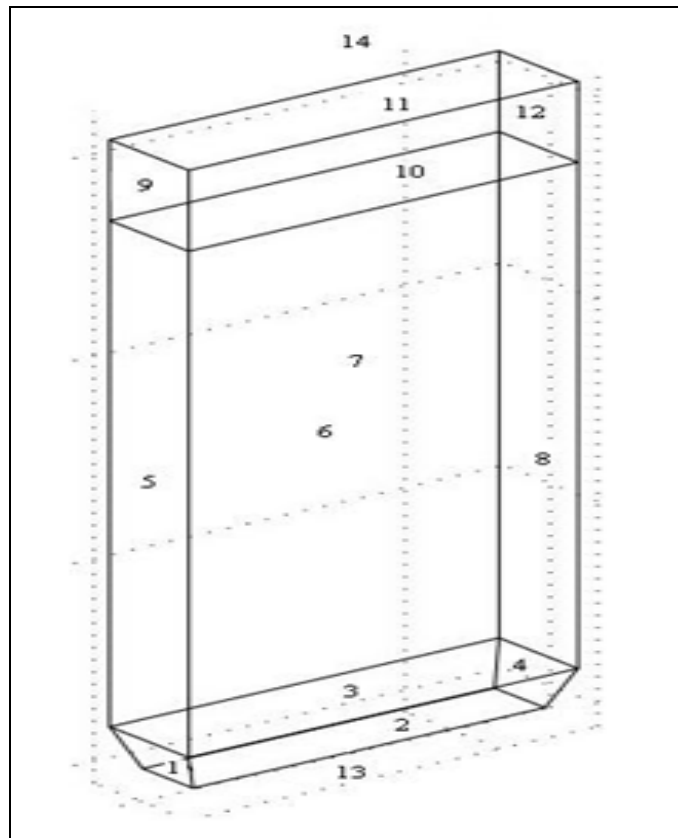
Molde de 30 cm de altura y h=300



Condiciones de frontera	Calor liberado del lingote (W)	% Calor liberado por área del lingote	% de distribución de calor por sección
Molde			
12	11482.75	85.98	8.83
11	44432.73		34.17
10	43810.86		33.70
9	12065.78		9.28
Cuerpo			
8	1623.26	13.48	1.25
7	7124.21		5.48
6	7222.96		5.56
5	1557.41		1.20
Fondo			
4	64.40	0.54	0.05
3	283.63		0.22
2	285.42		0.22
1	64.19		0.05
TOTAL	130017.6	100	100

(12) **Comparación entre moldes y flujo de agua**

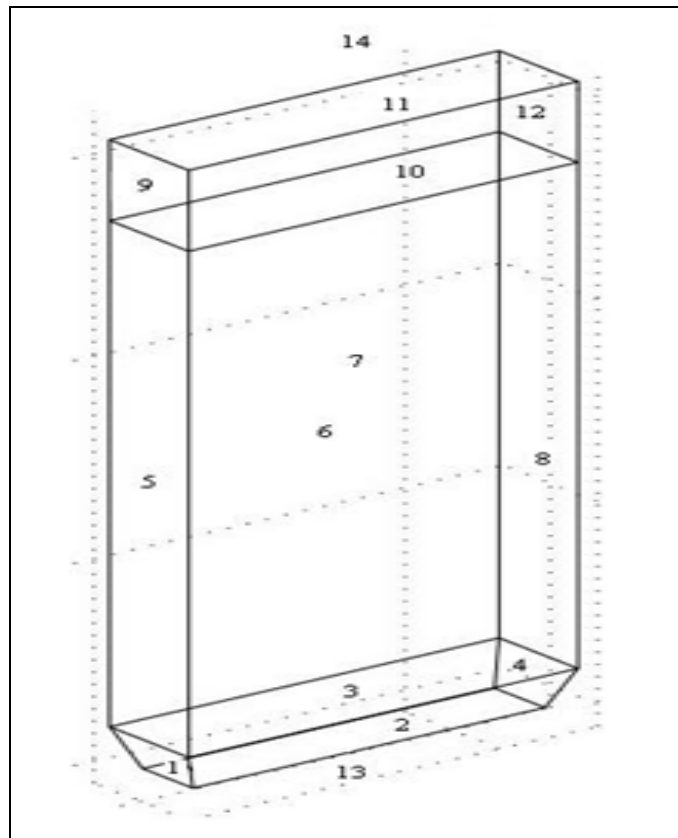
Molde de 30 cm de altura y h=1000



Condiciones de frontera	Calor liberado del lingote (W)	% Calor liberado por área del lingote	% de distribución de calor por sección
Molde			
12	22330.36	93.21	8.97
11	93349.74		37.52
10	91989.17		36.97
9	24240.03		9.74
Cuerpo			
8	1306.02	6.63	0.52
7	6895.77		2.77
6	7087.7		2.85
5	1210.19		0.49
Fondo			
4	37.48	0.16	0.02
3	165.06		0.07
2	166.1		0.07
1	37.35		0.02
TOTAL	248814.97	100.00	100.00

(12) **Comparación entre moldes y flujo de agua**

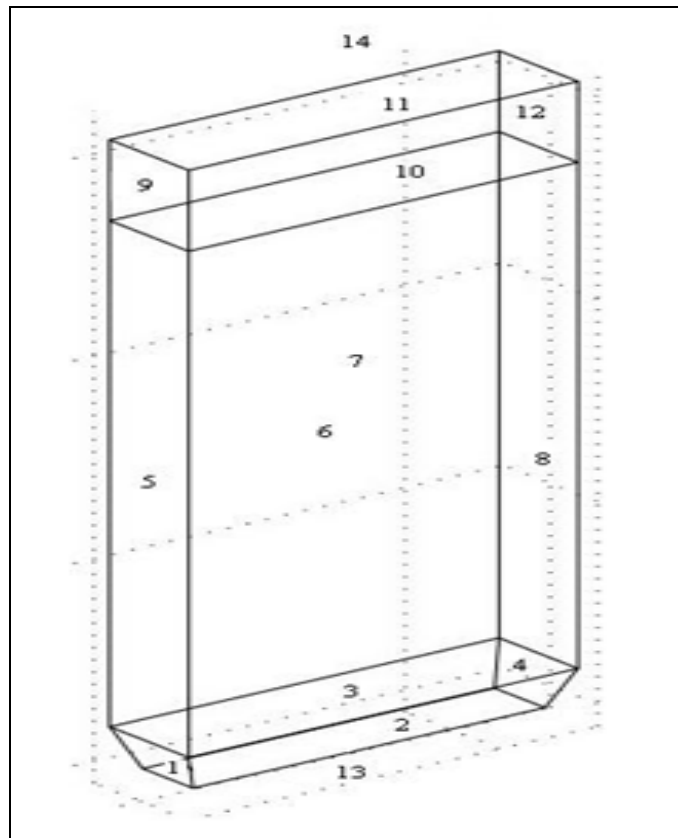
Molde de 40 cm de altura y h=150



Condiciones de frontera	Calor liberado del lingote (W)	% Calor liberado por área del lingote	% de distribución de calor por sección
Molde			
12	8270.66	83.36	8.78
11	30801.93		32.68
10	30938.55		32.83
9	8551.96		9.07
Cuerpo			
8	1338.17	15.87	1.42
7	6118.84		6.49
6	6078.92		6.45
5	1416.27		1.50
Fondo			
4	66.70	0.77	0.07
3	295.95		0.31
2	296.15		0.31
1	66.68		0.07
TOTAL	94240.78	100	100

(12) **Comparación entre moldes y flujo de agua**

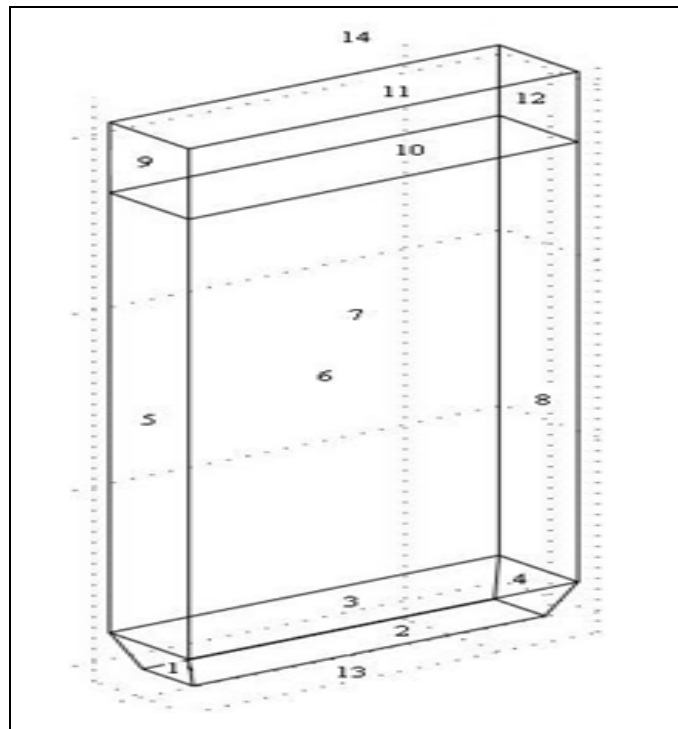
Molde de 40 cm de altura y h=300



Condiciones de frontera	Calor liberado del lingote (W)	% Calor liberado por área del lingote	% de distribución de calor por sección
Molde			
12	13045.47	90.45	9.27
11	50160.09		35.66
10	50433.39		35.85
9	13601.90		9.67
Cuerpo			
8	195.00	9.15	0.14
7	5771.68		4.10
6	5700.45		4.05
5	1208.59		0.86
Fondo			
4	50.90	0.39	0.04
3	225.88		0.16
2	226.03		0.16
1	50.89		0.04
TOTAL	140670.27	100	100

(12) Comparación entre moldes y flujo de agua

Molde de 40 cm de altura y h=1000



Condiciones de frontera	Calor liberado del lingote (W)	% Calor liberado por área del lingote	% de distribución de calor por sección
Molde			
12	22590.76	95.53	9.13
11	94459.31		38.18
10	95035.39		38.42
9	24223.01		9.79
Cuerpo			
8	623.60	4.37	0.25
7	4786.63		1.93
6	4639.86		1.88
5	761.34		0.31
Fondo			
4	23.55	0.10	0.01
3	104.48		0.04
2	104.55		0.04
1	23.54		0.01
TOTAL	247376.02	100	100

A QUIEN CORRESPONDA:

Se hace constar que los C: Dr. David Jaramillo Vigueras, Dr. Gabriel Plascencia Barrera y el M. en C. José Claudio Cenobio Méndez García, realizaron el desarrollo tecnológico consistente en "**Análisis del Sistema de Colada Semicontinua para Aleaciones de Aluminio**".

Este estudio le será de utilidad a la empresa, ya que en el se proponen ahorros sustanciales de agua y energía, este proyecto fue concluido a satisfacción de la empresa.

Se extiende la presente a los cinco días del mes de octubre del año dos mil nueve, para los fines que a los interesados convengan.

ATENTAMENTE



ING. MARCO ANTONIO RUBIO GUZMAN
DIRECTOR DE OPERACIONES

Effect of process parameters on the microstructure of aluminum alloys obtained by semi continuous casting

Claudio Méndez*, César C. Sánchez*, Erik Salas*, Mitzi Ríos*, Gabriel Plascencia,
David Jaramillo

CIITEC – IPN

Cerrada Cecati s/n

México, 02250, D.F.

México

*Graduate student

Abstract

Aluminum alloys are widely processed by semi continuous casting either by direct chill or open mould casting. However, due to intrinsic complications of the casting process and the size of the processed ingots, it is difficult to evaluate or even predict the effect of process parameters such as cooling water flow rate or casting velocity on the microstructure of the cast ingots. In this paper we report some results from a laboratory scale built semi continuous machine. Results show that regardless of the casting parameters used, a fine equiaxed microstructure was obtained in every test.

Keywords: Aluminum alloys, Solidification, Semi continuous casting, Microstructure, Heat flow

INTRODUCTION

Semi continuous casting of aluminum (either DC or open mould) is a well established and robust technology used to produce aluminum alloy ingots of different sizes. Once the ingots are obtained, they are sent for further processing steps such as rolling, heat treating, forging among others.

It is desirable to be able to control and predict the microstructure of the ingots as they are cast. This issue becomes more relevant if the physical properties of the products to be manufactured from these ingots must meet a given set of standards.

Due to the size of the ingots, any sort of analysis on either the microstructures or the thermal history of the metal results very expensive and most times impractical to be conducted thoroughly in the cast shop [1, 2].

As pointed out [2-5], cooling systems are largely responsible for the quality of the solidified ingot. Cooling of the ingots is achieved by two cooling systems. The primary cooling system is located in the casting mould itself. The mould has a cavity between its walls so cooling water is passed through. This cooling system is responsible for removing the latent heat of solidification from the melt, so the liquid-solid transformation starts to take place within the mould; in addition, this cooling system removes the sensible heat from the liquid phase. The second cooling system consists of water falling from the lower end of the mould. In the bottom of the mould cavity some holes are drilled alongside the length of the mould so water falls from it in such a way that a water curtain wets the ingot as it is formed and it is also responsible for removing the sensible heat from the already solidified ingot. This secondary cooling system completes the solidification of the processed ingot and also it cools down the metal.

From the description given above, it is evident that the solidification and therefore the final properties of the alloy cast in this way, strongly depends on parameters such as water flowrate, casting velocity and the geometry of the ingot [6]. Additionally, it is expected that the chemical composition of the casting alloy will also influence such process parameters.

In this work we have built a laboratory scale open mould casting machine to simulate operational conditions in the plant. The aim of the project is to evaluate the microstructure of the ingots produced in this machine and relate them to the cooling conditions applied in plant.

EXPERIMENTAL

Apparatus description

A semi-continuous casting machine was built in our laboratory. The caster essentially consisted of a frame made from low carbon steel. The transmission mechanism consisted of a pulley connected to a couple of lead screws through a series of gears; this mechanism was welded to the caster structure. The pulley was connected by means of a rubber band to a 220 V three phase motor which in turn was controlled with a frequency changing device. Such device allowed for changing the casting speed as well as the direction of the casting plate motion (upwards or downwards). Apart from the mechanical elements of the caster, a copper mould was used to form the aluminum bars, this mould is a cylinder with 5 cm in diameter, 15 cm in length and thickness of 2 mm. The mould was mounted into a low carbon steel jacket. The jacket is a hollow cylinder with 10 cm in length and 15 cm in inner diameter. In addition, two water ports were added to the jacket, one for the entrance of cooling water and the second for removing it. Water was introduced into the jacket at different flow rates. Below the mould/jacket assembly, a metallic support base was placed; under this base a secondary cooling system was added. The secondary cooling system consisted of a 7.5 cm in diameter ring made of copper pipe with inner diameter of 6.4 mm;

seven holes (0.08 cm in diameter) were drilled on the inner surface of the copper ring so water could be sprayed over to the surface of the aluminum bars as they were casted. [Figure 1A](#) shows a photograph of the casting machine, while [Figure 1B](#) shows a couple of detailed images of the mould.

The casting machine was instrumented with a couple of flowmeters, one for the entrance of water into the jacket, and the second one for the water outlet; the first flowmeter was attached to a valve, so the water inlet flow rate was controlled. A third flowmeter was used to measure the water inlet to the secondary cooling; this flowrate was not controlled. The temperature of the water at the entrance and outlet of the cooling jacket was continuously recorded by means of two k-type thermocouples placed on each port. The thermocouples were connected to a data acquisition system which in turn was hooked to a PC. A third thermocouple was placed into the bottom end of the mould before the metal was cast. This thermocouple measured and registered the temperature of the aluminum as it solidified while passing through the mould and the secondary cooling system. Finally a fourth thermocouple was placed into the crucible in which the aluminum was melted. Temperature data from each thermocouple was recorded every second. To melt the aluminum, an induction furnace was used.

Test description

The tests conducted consisted on melting aluminum alloys from the 1100, 3004 and 332.0 T5 series in an induction furnace. The metal was placed into a graphite crucible. Once melted, the aluminum was poured into the mould when the melt reached a temperature of $695\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$. In the case of the 332.0 T5 casting, the metal was poured at $600\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$. The chemical composition was not modified, since the metal used in this research is from the aluminum alloys mentioned before and whose nominal [7] and actual chemical composition are shown in Table 1.

Before starting the motor to move the caster plate, nearly 0.5 cm of aluminum was allowed to solidify in the mould and then the plate was allowed to move downwards at a predefined casting speed. As the plate moved downwards, the aluminum kept filling the mould. The caster was stopped when the metal left the mould from its lower end completely solidified.

A total of 10 tests were conducted in the apparatus shown in Figure 1A and B. Table 2 summarizes the different tests conducted. Once the bars were obtained, they were cut into halves alongside its axis; one half of the bar was initially macro etched for visual inspection. Once macro etched, the half was cut into 5 sections equally sized, taking only 3 of them (beginning, centre and end of the casting). These three sections were prepared for microscopic examination using common metallographic procedures. The second half of the bar was kept as a reference material.

RESULTS AND DISCUSSION

Cooling rates

Figures 2A and 2B, show plots of temperature vs time for the different bars cast. It is clear from Figure 2A and 2B that samples from the 1100 alloy cooled at practically the same rate in spite of being cooled under different conditions, with exception of bar 8. The anomalous behaviour exhibited by bar 8 at the beginning of the casting can be attributed to some motion of the thermocouple, since in this particular test, we placed the thermocouple after we started pouring the aluminum (in the other tests, we first placed the thermocouple and then poured the melt). However, it is evident that towards the end of the casting, this bar cooled at a rate similar to the other bars.

For bars 9 and 10, there is a significant difference between their cooling rates. In the case of bar 9 (alloy 3004), the cooling rate is fairly similar than those shown by bars 1 to 8. On

average, the bars from the 1100 alloy cooled at $-1567\text{ }^{\circ}\text{C min}^{-1}$, while bar 9 exhibited in just one test a cooling rate of $-1827\text{ }^{\circ}\text{C min}^{-1}$.

In the case of the 332.0 T5 alloy (bar 10), it cools at a rate considerably slower than the other two alloys. This can be attributed to the high silicon content of 8.6 wt%. The eutectic in Al-Si alloys occurs at $577\text{ }^{\circ}\text{C}$ and 12.6 wt% Si. Since composition of this alloy is close to the eutectic transformation, it requires less energy to solidify, hence the slower heat removal rate. Another feature that can be appreciated in the cooling curve of ingot 10 is that the liquid-solid transformation is evident at the beginning of the curve. Such transformation cannot be observed in the cooling curves for bars 1 to 9 as clearly as it is for test 10.

Figure 3, shows the first derivative of temperature respect of time for bars 10 and 9; it is evident from this figure the liquid-solid transformation for bar 10(Al-Si alloy), whereas for bar 9 (alloy 3004) such phase change is not as notorious.

The cooling rates estimated for the different experiments are shown in Table 3. In view of these values, it is possible to say with exception of test 10, that under experimental conditions, the casting of alloys 1100 and 3004 practically occurs under steady state conditions, i.e., $\frac{\partial T}{\partial t} = \text{constant}$. With this assumption, it is possible to describe the heat transfer during the solidification of an ingot in a continuous or semi-continuous machine in just one dimension, since the z coordinate can be related to the casting velocity through the casting time. For instance, in the case of cylindrical coordinates which is our case, heat form the melt is removed solely by the radial coordinate whereas the heat removed in the z direction is negligible. This issue will be addressed in one of the following sections.

Effect of casting velocity.

Tests 1 to 5 were conducted with constant cooling water inlet flowrate at 9.5 L min^{-1} ; in these experiments, the casting velocity was gradually increased from $8.1\text{ to }42\text{ cm min}^{-1}$. By

casting at a faster rate, the residence time of the aluminum within the mould decreases. Consequently, when the casting velocity is increased, the water temperature at the cooling water outlet has to increase proportionally. Figures 3A and 3B, as well as Table 4, show such effect.

It was also observed that the cooling water outlet temperature increment does not correlate directly with the casting velocity. The maximum outlet temperature recorded is 24 °C when casting at 12.5 and 42.0 cm min⁻¹. In the case of casting the aluminum at 24 cm min⁻¹, the maximum water outlet temperature reaches 20°C, while when casting at 17 cm min⁻¹, the water outlet temperature increases up to 18 °C. Casting at 8.1 cm min⁻¹, results in an increment of the cooling water up to 13 °C. Similarly, the values of the recorded average temperature increments show a similar increasing trend.

The scatter in the data shown in Figure 3A and 3B can be attributed to the water flow turbulence in the cooling jacket.

Effect of cooling water flowrate.

Another set of tests was designed to evaluate the effect of the water flowrate in the mould under a fixed casting velocity. These tests were conducted at casting velocities of 24 and 42 cm min⁻¹, **only the 1100 alloy was used in these tests**. The cooling water inlet flowrate was increased from 2 to 9.5 L min⁻¹. Results from these experiments are shown in Figures 4A and 4B respectively.

Figure 4A shows the data recorded for casting the 1100 aluminum alloy at 24 cm min⁻¹; it is evident from this figure that by increasing the cooling water flowrate, the temperature of the water at the outlet port decreases quite dramatically. As more water is passed through the cooling jacket, it is more difficult to heat up this larger volume of water with the heat

extracted from the molten metal first and then during the cooling of the resulting bar. In addition, as more water is used for cooling purposes, the faster it needs to leave the jacket, therefore, the more unlikely that the water could absorb the heat coming out of the aluminum. This behaviour is also observed in the bars cast at 42 cm min^{-1} (Figure 4B). By increasing the casting velocity it can be seen in Figure 4B that the increase in the outlet temperature does not change significantly with respect of casting at 24 cm min^{-1} .

Effect of chemical composition

The effect of chemical composition is illustrated in Figure 6. It can be seen in this figure that the cooling water temperature heats up to $25 \text{ }^\circ\text{C}$ regardless of the cast alloy. This effect can be attributed to the similar masses employed in the casting of these alloys. The fact that the cooling water reaches a similar temperature for the different tests means that the amount of heat released by either alloy during its solidification is essentially the same. In the case of the 332.0 T5 alloy; which has the lower aluminum content and melting point of the different alloys tested; its data shows that the heat removed by the cooling water is basically the same as that released by the alloys with higher aluminum content. This particular result is important in terms of the heat balance. The 332.0 T5 alloy is an Al-Si alloy whose composition nears the eutectic temperature at $577 \text{ }^\circ\text{C}$, this means that this alloy has to be cast at least at $600 \text{ }^\circ\text{C}$; by comparison, the 3004 alloy contains 96 wt% Al and its melting point is in the vicinity of $660 \text{ }^\circ\text{C}$, thus this alloy is cast at least at $680 \text{ }^\circ\text{C}$. This means that there is a casting temperature difference of minimum 80°C between these alloys and hence much more energy has to be supplied to the 3004 alloy in order to melt and pour properly. However, the data obtained shows that the same amount of energy is delivered by both alloys. Unfortunately, the lack of data on latent heat of solidification and heat capacity of the 332.0 T5 complicates a proper heat balance of this alloy; making it difficult for a direct comparison with the heat balance for alloy 3004.

Heat balance

The amount of heat absorbed by the cooling water within the mould was estimated by means of the equation:

$$q_{water} = \dot{Q}_{water} \cdot \rho_{water} \cdot C_{p_{water}} \cdot \Delta T_{water} \cdot t_{casting} \quad (1)$$

where q_{water} is the amount of energy removed from the molten aluminum by the cooling water (J), \dot{Q}_{water} is the cooling water flowrate ($L \text{ min}^{-1}$), ρ_{water} is the density of water (1000 kg m^{-3}), $C_{p_{water}}$ is the heat capacity of water ($4180 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$), ΔT_{water} is the cooling water temperature difference between the inlet and outlet ports (K) and $t_{casting}$ is the time in which the casting proceeded (min).

This amount of energy removed by the cooling water has to be equivalent to that released by the molten aluminum as it solidifies. To account for the heat lost by the aluminum it is necessary to assume both the 1100 and 3004 alloys as pure aluminum. Unfortunately, this assumption cannot be done for the 332.0 T5 alloy considering its actual aluminum content.

The heat lost by the melt is divided in terms of the latent heat of solidification and the sensible heat lost from the pouring temperature to that of the phase change. This amount of energy is given by:

$$q_{Al} = q_{latent} + q_{sensible} \quad (2)$$

and

$$q_{latent} = m_{cast} \cdot \Delta H_{solidification}^o \quad (3)$$

$$q_{sensible} = \frac{m_{cast}}{27} \cdot \int_{T_p}^{T_{mp}} C_{p_{Al,l}} \cdot dT \quad (4)$$

Where $\Delta H^{\circ}_{\text{solidification}}$ is the latent heat of solidification of aluminum ($3.91 \times 10^5 \text{ J kg}^{-1}$), m_{cast} is the mass of the bar casted (kg), $C_{p\text{Al, l}}$ is the heat capacity of the liquid aluminum ($31.748 \text{ J mole}^{-1} \text{ K}^{-1}$), T_{mp} is the melting point of the aluminum (K) and T_p is the pouring temperature (K). Thermophysical data used in equations (1), (3) and (4) were taken from literature [8, 9].

For the 332.0 T5 alloy, the lack of thermophysical data for made impossible to conduct a proper heat balance, although by using the heat capacity and heat of solidification of pure aluminum and multiplying them by the mass fraction of aluminum, the heat balance for bar 10 was approximated; such balance is shown in Table 3, and it seems to work out favourably. Additionally, it is evident from Table 3 that the heat balance within the mould is fulfilled satisfactorily. The difference between the heat extracted from the water and that released by the aluminum can be explained in terms of the sensible heat from the solidification temperature of the metal to the temperature of the bar as it is removed from the casting machine which not always was the same; therefore that heat contribution was not accounted for.

Macrostructural evaluation

Once cast, the bars were prepared for metallographic evaluation. A homogeneous structure was found all over the sections. No indication of columnar grain growth was detected. Only equiaxed grains were observed all along the samples obtained.

Figure 7A, shows a picture of the macroetch on the 1100 aluminum alloy after being solidified in our casting machine (Test 1); whereas Figure 7B shows an image from the same aluminum alloy solidified in a permanent iron mould. Figure 7A only shows randomly oriented equiaxed grains with almost the same mean size; on the other hand,

Figure 7B shows the presence of columnar and equiaxed grains. The presence of the columnar grains near the ingot ends is evident; while at the ingot centre and edges, equiaxed grains have developed. The columnar grains also depict the heat flow during solidification in the permanent mould. As expected, heat transfer in the iron mould is more complex than that in the continuous casting machine. In addition, columnar growth is also expected to occur in this kind of solidification due to localized thermal and compositional gradients.

The presence of only equiaxed grains in Figure 7A confirms the fast heat extraction already described. Additionally, the macrostructural features observed in this figure also indicates that the metal presented little resistance to heat removal in the radial direction. Since aluminum has a relatively high thermal conductivity, plus the action of the cooling flowrate, allows for rapid and homogeneous solidification by means of a uniform solidification front advancing from the bar centre towards the mould wall. All bars cast in our casting machine showed the same structural features, i.e. homogeneous equiaxed grains randomly distributed all over the bars.

Microstructural evaluation

Figures 8A to 8E show microstructures of bars from the different alloys studied. Equiaxed grains with dendritic morphology are observed in all cases. For alloy 1100 (Figures 8A to 8C), a finer microstructure was obtained at the edge of the samples when compared with the coarser structure observed at its centre. This fact is attributed to the effect of the volume of water used to cool down the melt. The finer microstructure at the edge of the sample and the coarser one at its centre is also observed in alloy 3004 (Figure 8D) and alloy 332.0 T5 (Figure 8E).

In the samples from alloy 1100 it can be noticed that as the water flow decreases, the structure at the edge of the samples is not as fine as those shown by bars cooled with a

larger volume of water. Additionally, the process parameters do not seem to affect the microstructure of the different alloys cast. This is evident from the microstructural characteristics (grain size and distribution) of the three alloys despite the difference in chemical composition.

In case of the casting velocity, this parameter seems to be second to the rate of cooling, since there is no significant difference in the structural features of the bars cast at different velocities. This may indicate that the rate of cooling is the most important process parameter in the semicontinuous casting of these alloys.

In this work, nearly pure aluminum (alloys 1100 and 3004) and a nearly eutectic alloy (332.0 T5) were used, therefore a well defined liquid – solid interface was expected; thus solidification should take place at a very well established temperature or over a narrow temperature interval. As the solid fraction grows within the mould, the more difficult it becomes for the liquid to flow away. Then, if solidification takes place as fast as our measurements indicate, the more difficult it becomes to develop localized compositional gradients. Furthermore, the relatively high thermal conductivity of aluminum and the high water flowrates employed to solidify the metal enhance the heat transfer which occurs in the radial direction, thus limiting the formation of thermal gradients within the mould yet providing a solid metal shell able to withstand the metallostatic pressure of the melt in the mould. These observations are in agreement with those by Raiszadeh and Esfahani [10].

Shabestari and Malekan [11] have shown that by increasing the cooling rate, all microstructural features of a metal are refined as it solidifies; the addition of a chill enhances the refinement of dendrite structure.

Further questions regarding as to where the solidification front exists may arise as the metal is cast, so it becomes more difficult to establish a smooth phase transformation [12].

CONCLUSIONS

Experimental work has been conducted to establish the relationship between process parameters and microstructural features in aluminum bars from different alloys processed by semi continuous casting. It has been found that water cooling flowrate is the most important factor that determines the final microstructure of the cast material.

In every case a fine microstructure was found, finer at the edge of the samples cast and coarser at their centre. This type of structure reveals that the aluminum does not present a significant thermal resistance during its solidification, thus allowing the formation of equiaxed grains all over the alloy matrix while avoiding the growth of dendrites.

Although the results obtained in this work are positive in terms of predicting the mechanical properties of the alloys processed in the laboratory, still, there is not a clear manner to extrapolate directly our results to ingots cast at a larger size.

ACKNOWLEDGEMENTS

Financial support from SIP-IPN grant 20090504 is greatly appreciated. Thanks are also due to Dept. of Metallurgy UASLP for sharing their facilities with us.

REFERENCES

1. M.W. Meredith, J. Worth, J.M. Brown and R.G. Hamerton, 'Light Metals 2003', San Diego, USA, March 2003, TMS, 1111 – 1118.
2. C. Méndez, C.C. Sánchez, G. Plascencia, M. A. Rubio and D. Jaramillo, 'Light Metals 2010', Seattle, USA, February 2010, TMS, 715 – 719.
3. S. Hamer, 'Light Metals 2010', Seattle, USA, February 2010, TMS, 709 – 714.
4. L.I. Kiss, T. Meenken, A. Charette, Y. Lefebvre and R. Lévesque, 'Light Metals 2003', San Diego, USA, March 2003, TMS, 829 – 834.
5. H.Sommerhofer and P. Sommerhofer, 'Light Metals 2006', San Antonio, USA, March 2006, TMS, 865 – 868.
6. F. Ni, G. Motoyasu, H. Soda and A. McLean, *Int. J. Cast. Met. Res.*, 2009, 22, 438 – 447.
7. ASM Metals Handbook Vol. 2 10th Edition 'Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials', Metals Park, USA, ASM International, 1990.
8. A. Bejan, 'Heat transfer', 1993, New York, Wiley.
9. A. Roine: 'Outokumpu HSC Chemistry V 6.0'.
10. R. Raiszadeh and H. Bartar Esfahani, *Int. J. Cast. Met. Res.*, 2010, 23, 264 – 270.
11. S.G. Shabestari and M. Malekan, *Can. Met. Q.*, 2005, 44(3), 305 – 312.
12. H. Soda, A. McLean and G. Motoyasu, *Int. J. Cast. Met. Res.*, 2005, 18, 163 – 173.

LIST OF TABLES

- Table 1. Chemical composition of the alloys used in this work
- Table 2. Cooling rates under different experimental conditions
- Table 3. Heat balance for each casting experiment

LIST OF FIGURES

- Figure 1. Experimental set up. (A) Picture of the assembled casting machine, (B) details of the mould.
- Figure 2. Cooling of aluminum bars under different experimental conditions (A) bars 1 to 5, (B) bars 6 to 10.
- Figure 3. First derivative of temperature with respect of time of the cooling data for bars 9 and 10.
- Figure 4. Effect of casting velocity on cooling water temperature increase. (A) Casting at 8.1, 12.5 and 17.0 cm min⁻¹, with water flowrate of 9.5 L min⁻¹. (B) Casting at 24.0 and 42.0 cm min⁻¹, with water flowrate of 9.5 L min⁻¹.
- Figure 5. Effect of water flowrate on cooling water temperature increase. (A) Casting at 24.0 cm min⁻¹. (B) Casting at 42.0 cm min⁻¹.
- Figure 6. Effect of chemical composition on the cooling of aluminum alloys (casting velocity 42 cm min⁻¹, cooling water flowrate 2 L min⁻¹).
- Figure 7. Macroetch on aluminum alloy 1100 solidified in (A) our laboratory semicontinuous casting machine (bar 1) and (B) permanent iron mould
- Figure 8. Micrographs showing microstructural features of (A) Bar 1, (B) bar 5, (C) bar 8, (D) bar 9 and (E) bar 10.

Table 1

Alloy	Composition	Si (wt%)	Fe (wt%)	Cu (wt%)	Mn (wt%)	Mg (wt%)	Zn (wt%)	Ti (wt%)	Al (wt%)
1100	Nominal	0.95 max		0.05	0.03		0.1		99.00
	<i>Measured</i>	0.27	0.41	0.08	0.05	0.04	0.1	0.03	99.00
3004	Nominal	0.30	0.70	0.25	1.00	1.00	0.25		96.00
	<i>Measured</i>	0.18	0.60	0.12	1.05	0.85	0.25		96.95
332.0 T5	Nominal	9.5	1.2	3.0	0.5	1.0	1.0	0.25	83.00
	<i>Measured</i>	8.63	0.57	2.35	0.1	0.88	0.49	0.035	86.4

Table 2

Test	Alloy	Cooling water flowrate (L min ⁻¹)	Cooling water flowrate in secondary (L min ⁻¹)	Casting temperature (°C)	Casting velocity (cm min ⁻¹)	Cooling rate (°C min ⁻¹)
1	1100	9.5	7.5	697	8.1	-1579
2	1100	9.5	7.5	690	12.5	-1538
3	1100	9.5	7.5	691	17.0	-1521
4	1100	9.5	7.5	693	24.0	-1510
5	1100	9.5	7.5	686	42.0	-1656
6	1100	5.0	7.5	688	24.0	-1585
7	1100	2.0	7.5	688	24.0	-1635
8	1100	2.0	7.5	685	42.0	-1513
9	3004	2.0	7.5	704	42.0	-1827
10	332.0 T5	2.0	8.5	504	42.0	-584

Table 3

Test	Cast bar weight (kg)	Casting time (min)	Heat released by aluminum (J)	Heat absorbed by cooling water (J)	Casting velocity (cm min ⁻¹)	Water inlet flowrate (L min ⁻¹)
1	0.94	1.00	3.68 x 10 ⁵	1.91 x 10 ⁵	8.1	9.5
2	0.64	0.70	2.50 x 10 ⁵	2.53 x 10 ⁵	12.5	9.5
3	0.78	0.90	3.05 x 10 ⁵	2.86 x 10 ⁵	17.0	9.5
4	0.90	0.81	3.52 x 10 ⁵	3.54 x 10 ⁵	24.0	9.5
5	0.44	0.35	1.72 x 10 ⁵	1.85 x 10 ⁵	42.0	9.5
6	0.86	1.07	3.40 x 10 ⁵	3.36 x 10 ⁵	24.0	5.0
7	0.90	1.83	3.52 x 10 ⁵	3.60 x 10 ⁵	24.0	2.0
8	0.92	1.20	3.60 x 10 ⁵	2.47 x 10 ⁵	42.0	2.0
9	0.34	0.85	1.33 x 10 ⁵	6.68 x 10 ⁴	42.0	2.0
10	0.48	1.20	7.87 x 10 ⁴	1.08 x 10 ⁵	42.0	2.0

Figure 1A

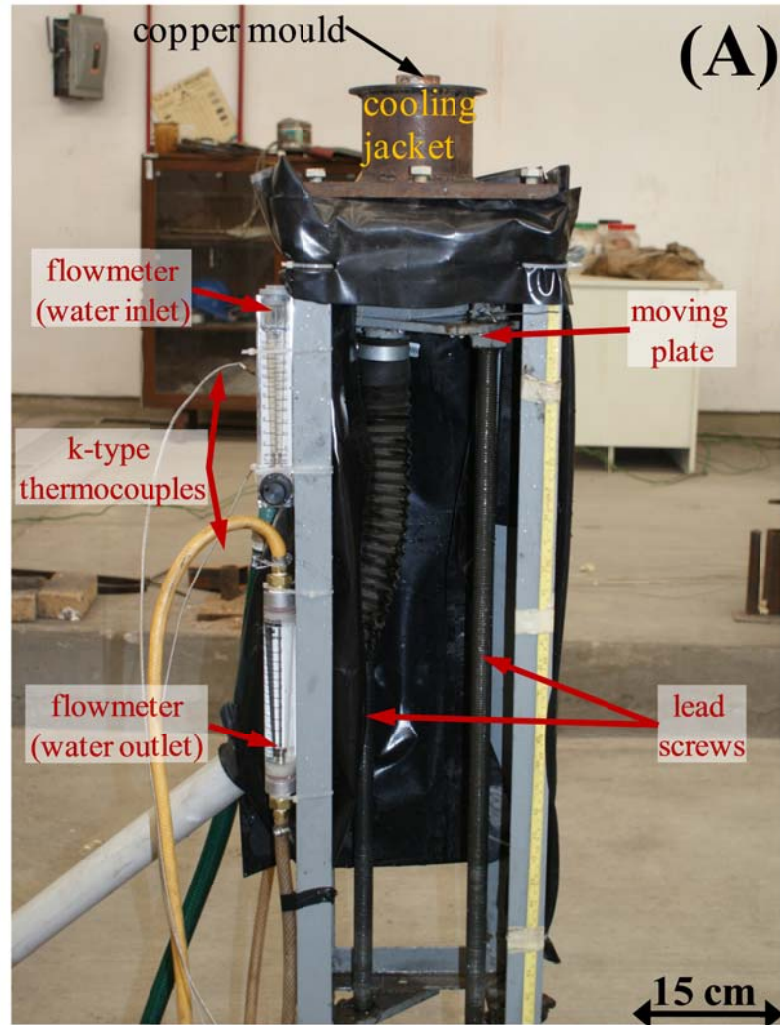


Figure 1B



Top view

Side view

Figure 2A

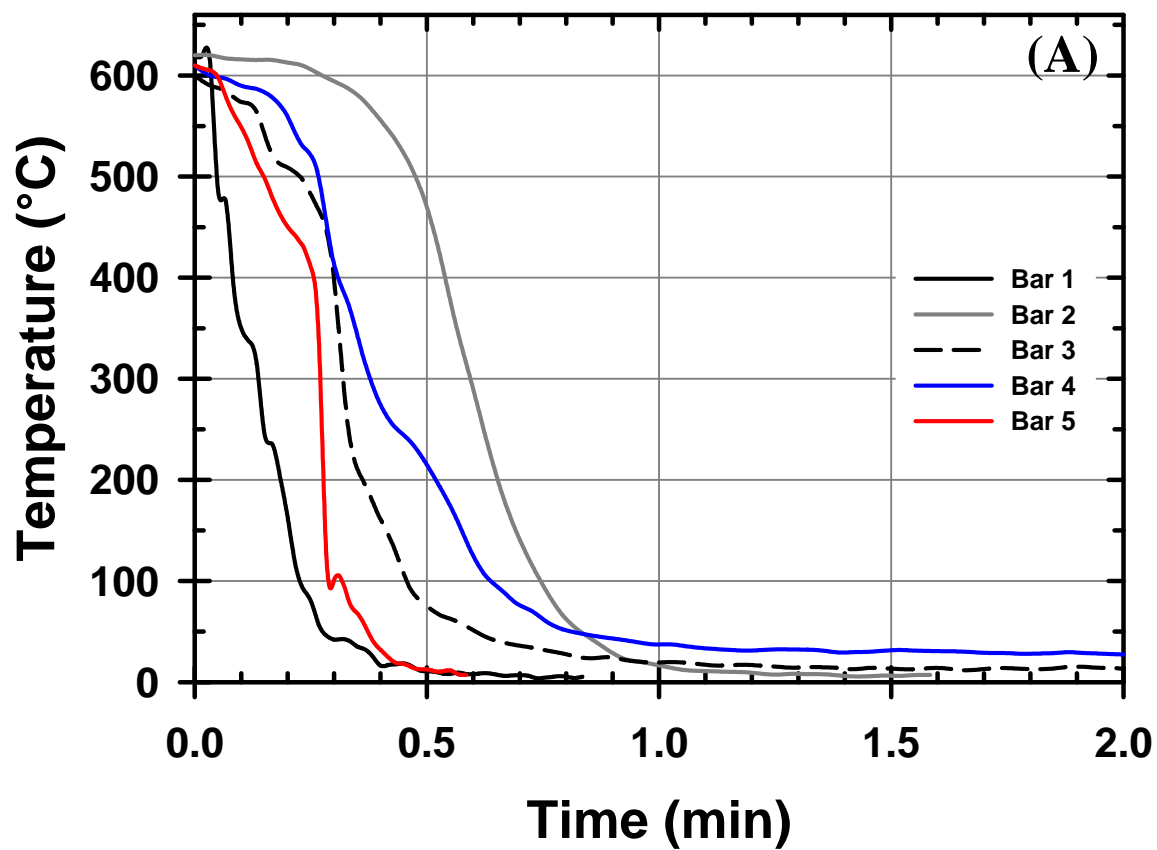


Figure 2B

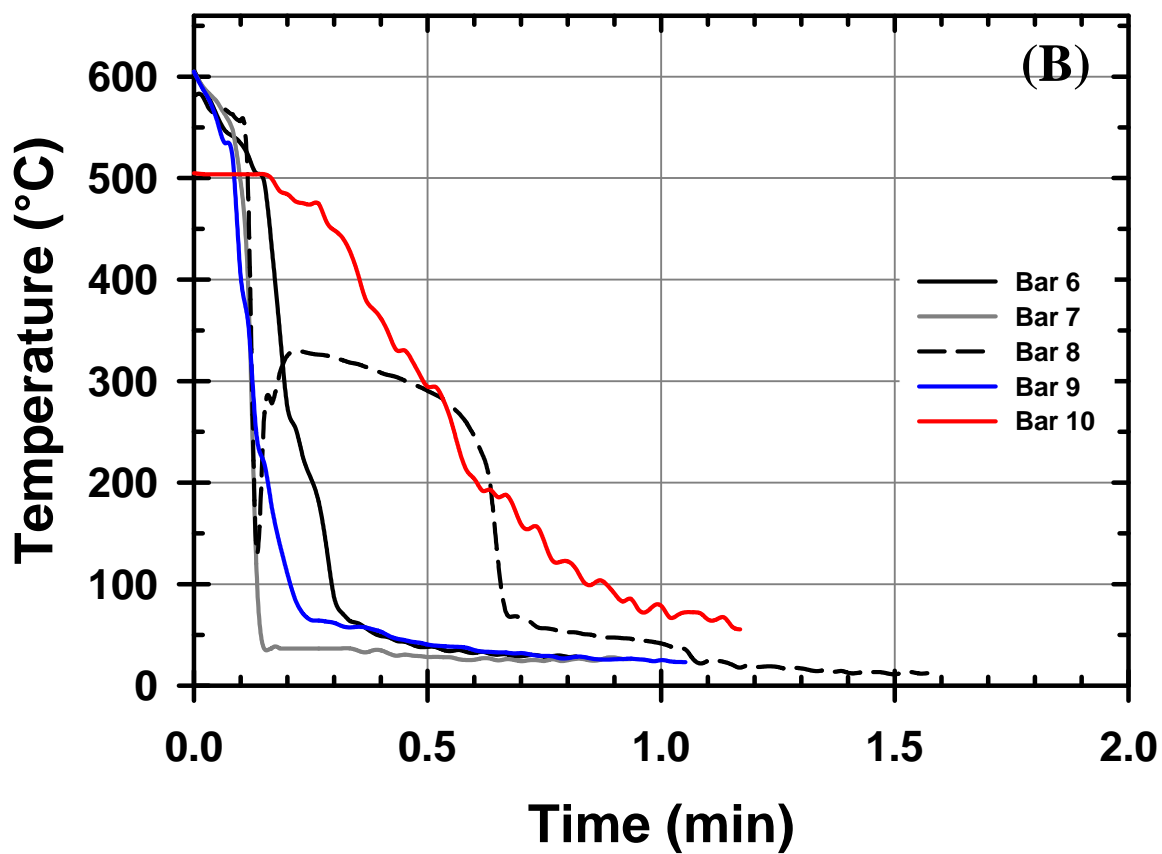


Figure 3

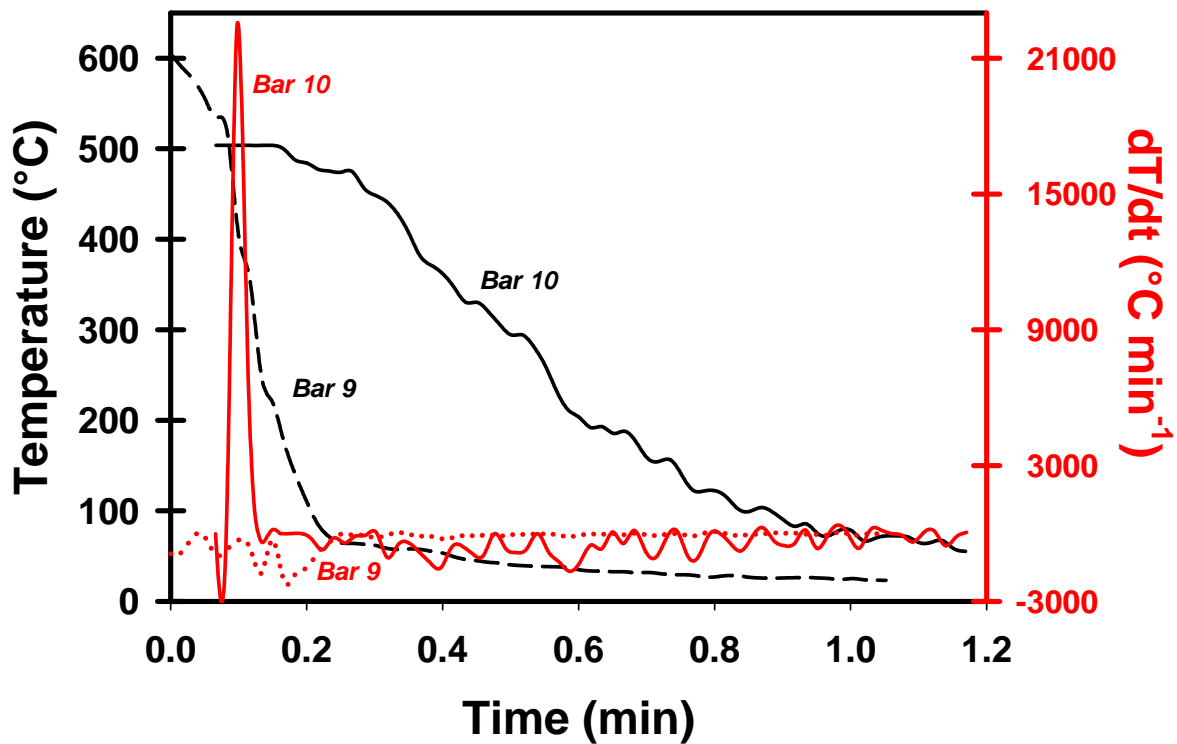


Figure 4A

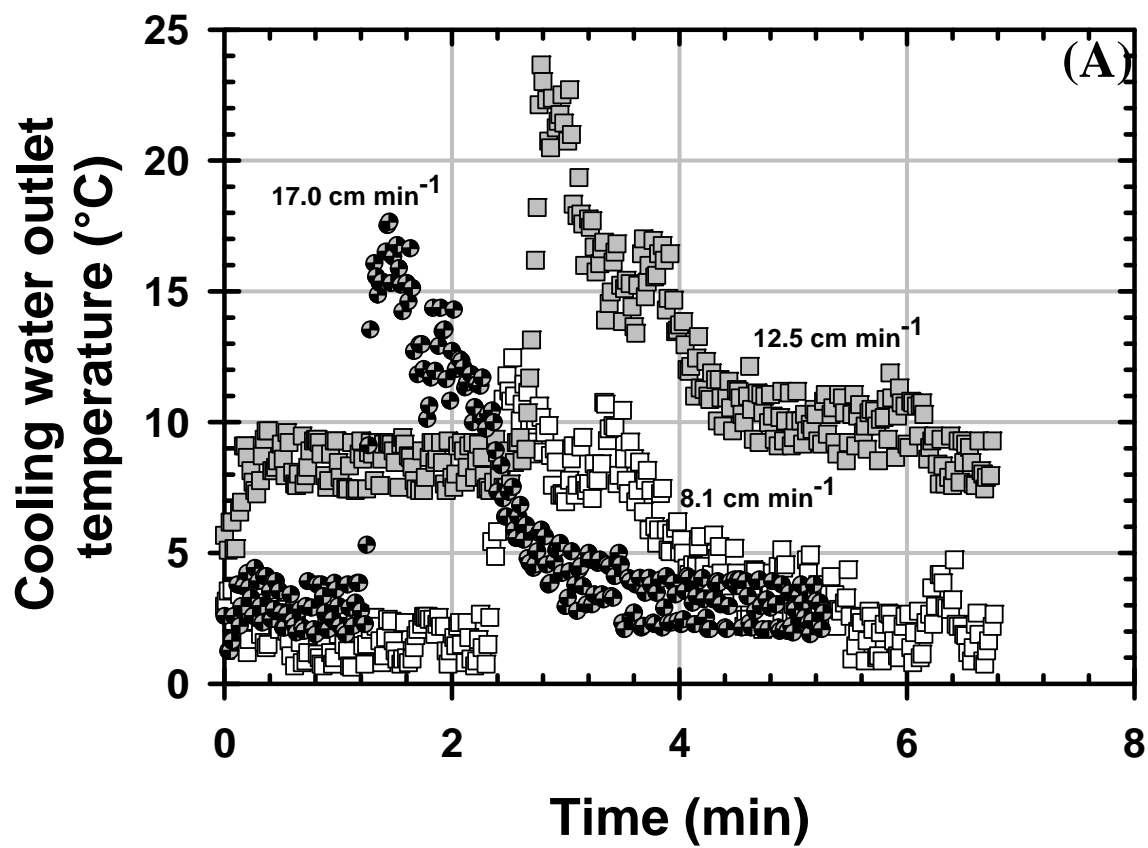


Figure 4B

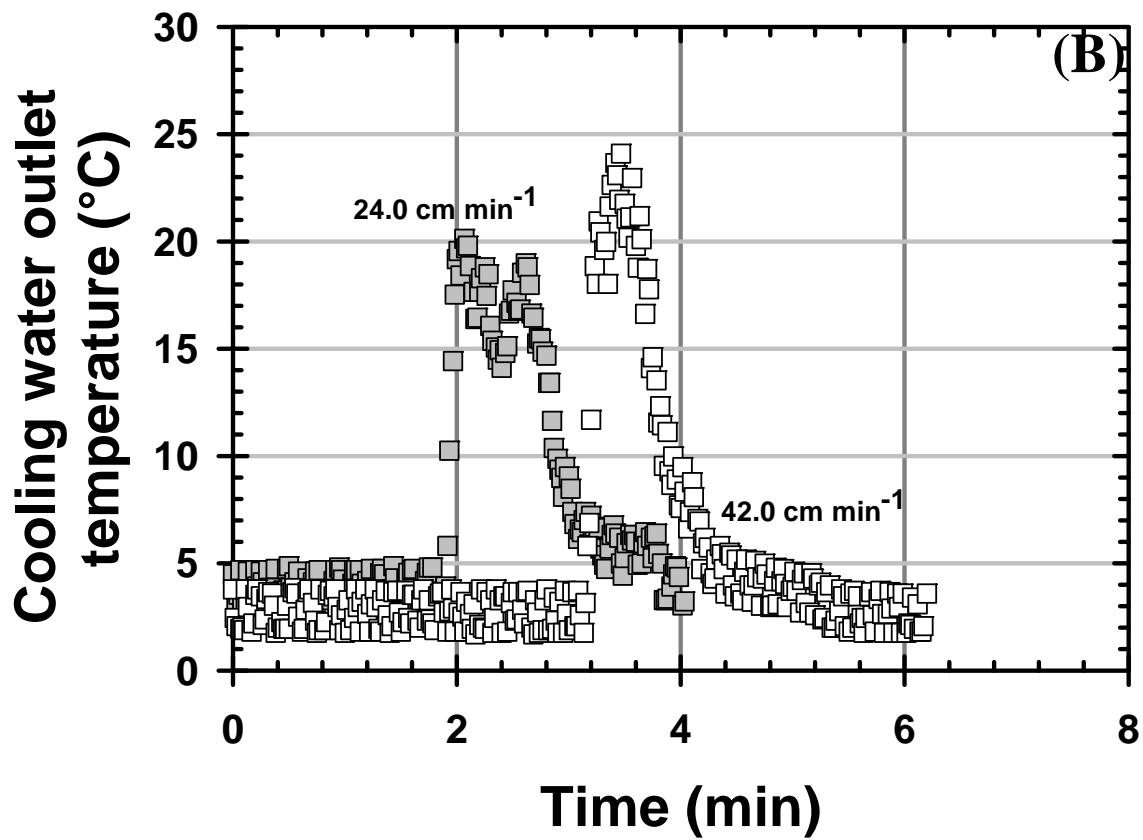


Figure 5A

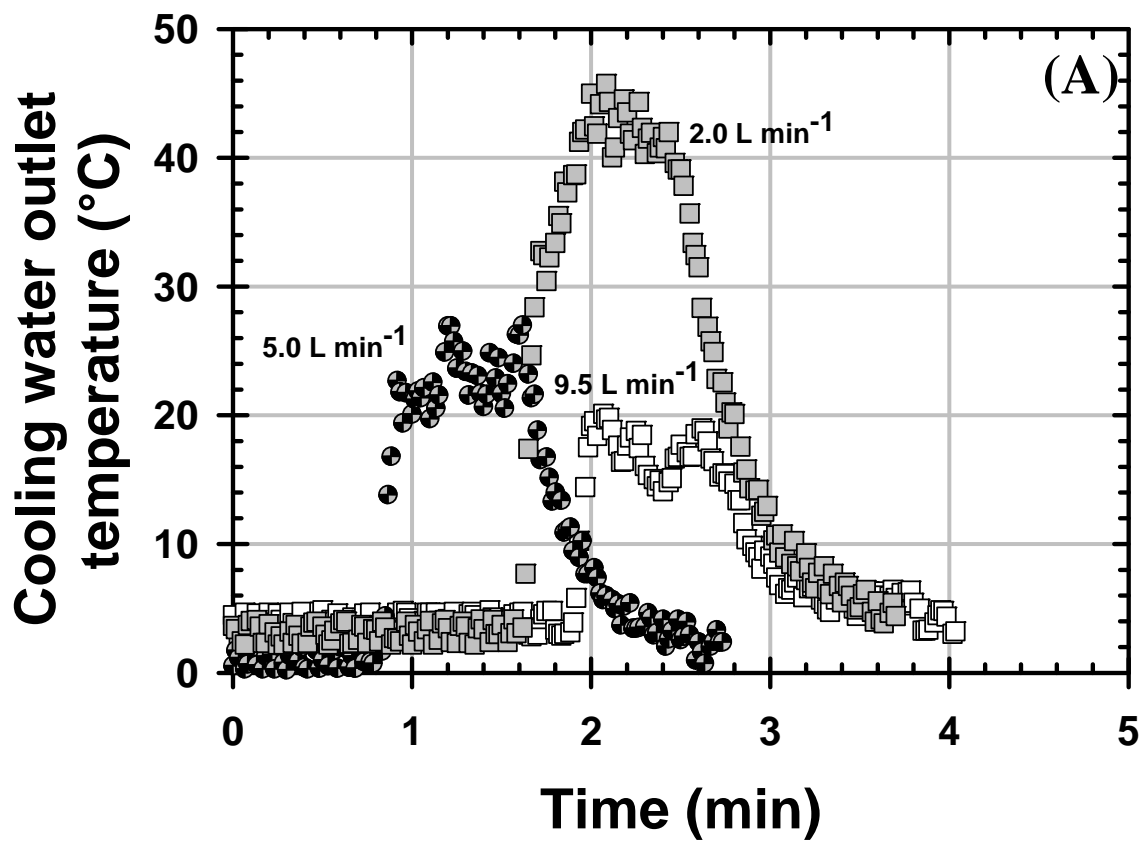


Figure 5B

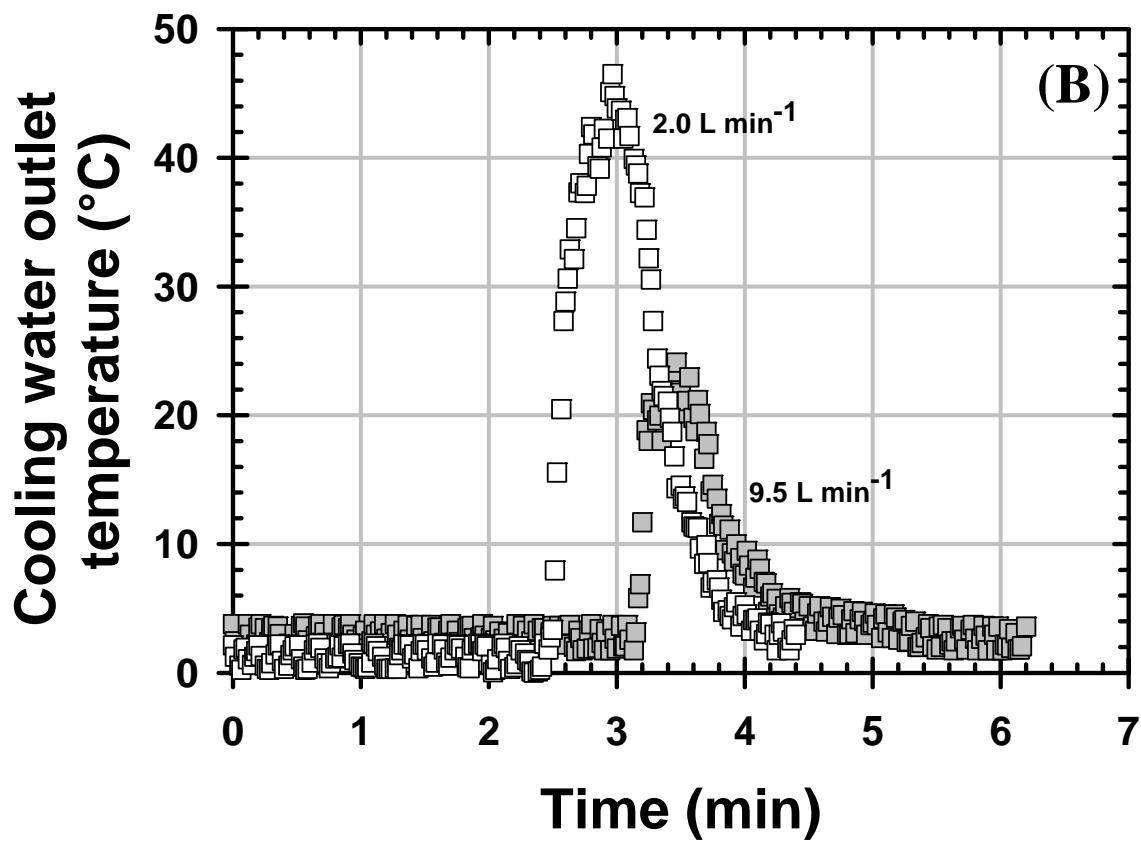


Figure 6

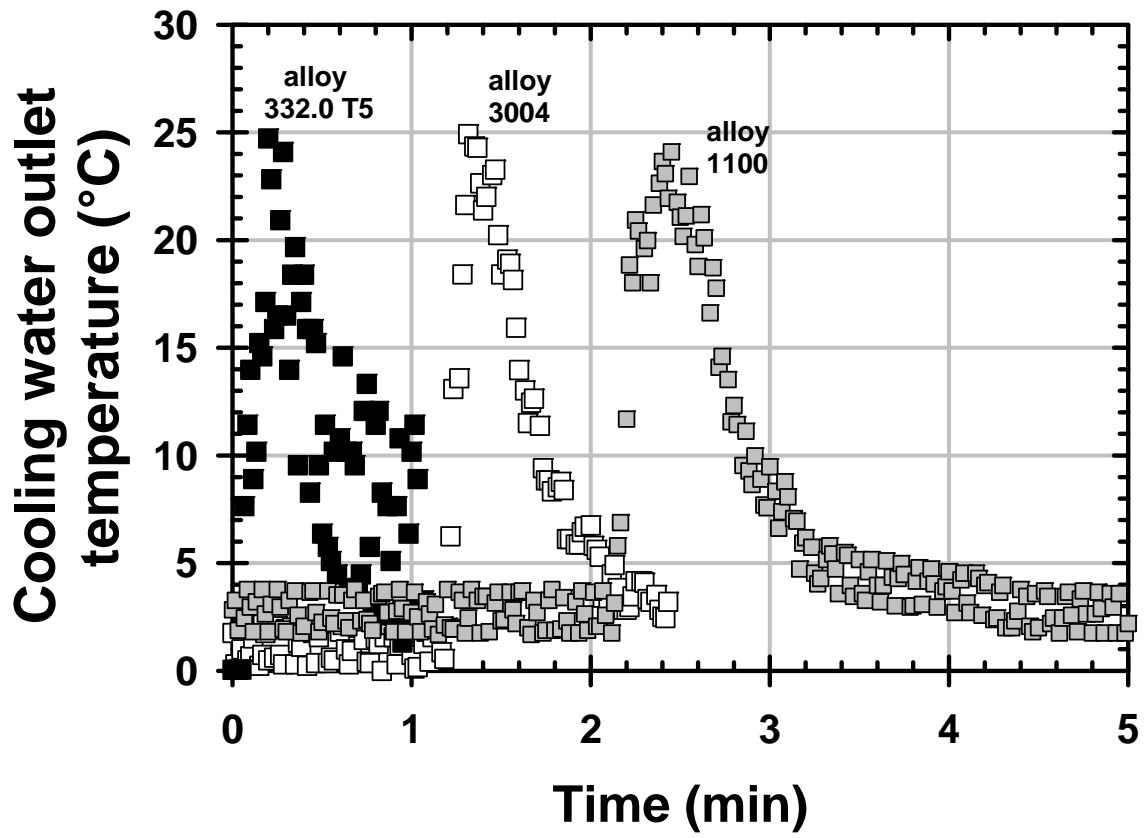


Figure 7

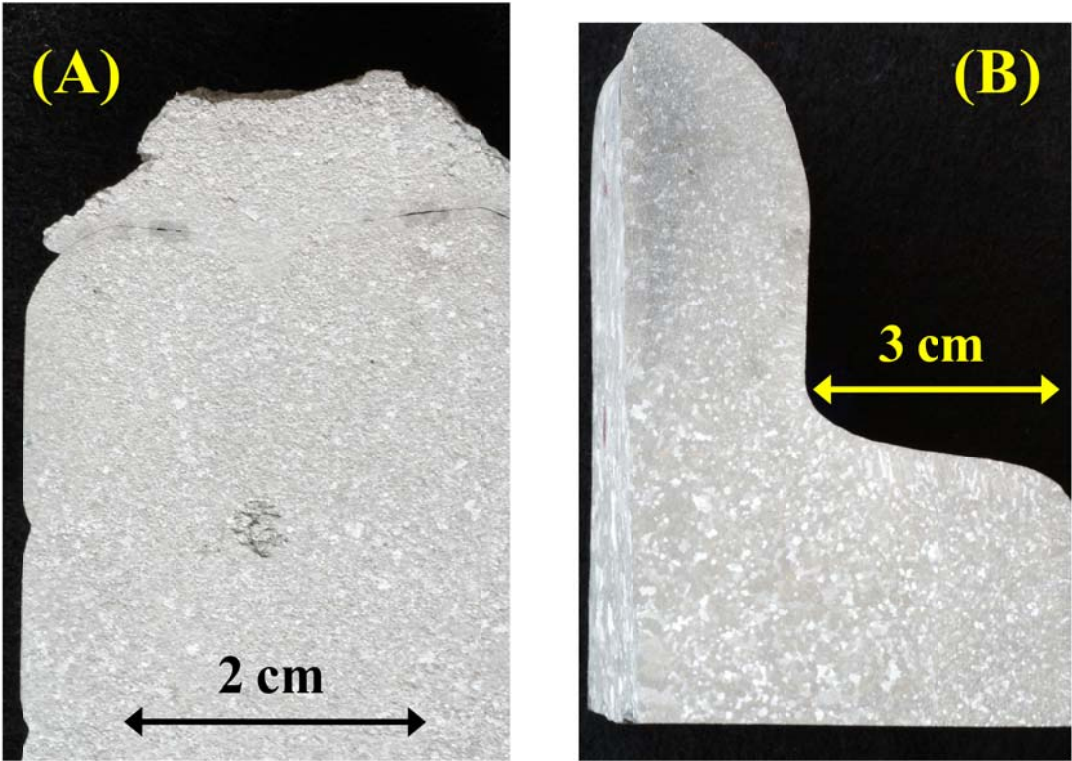


Figure 8A

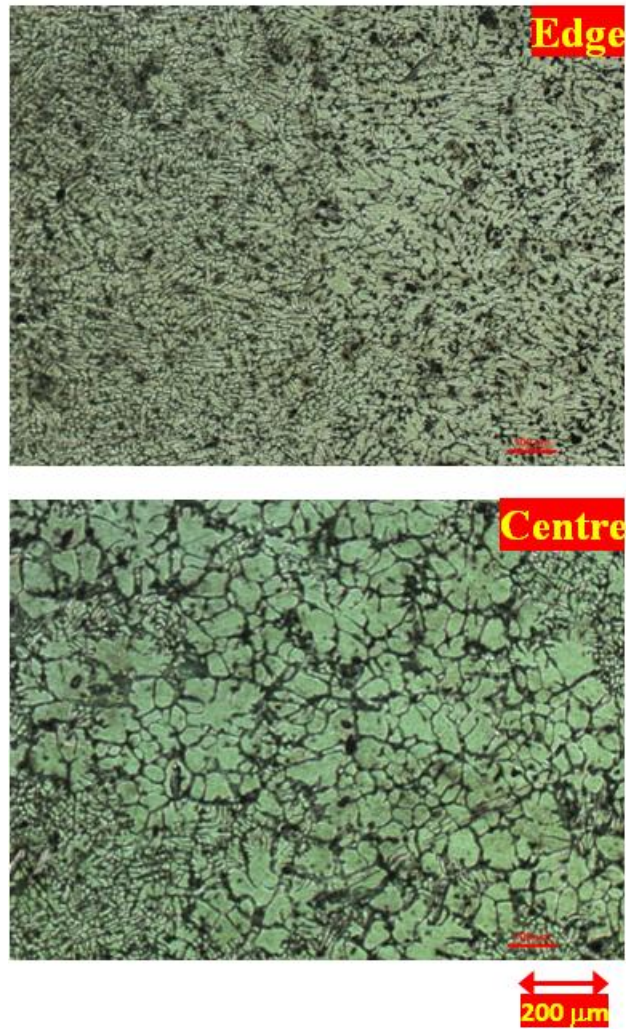
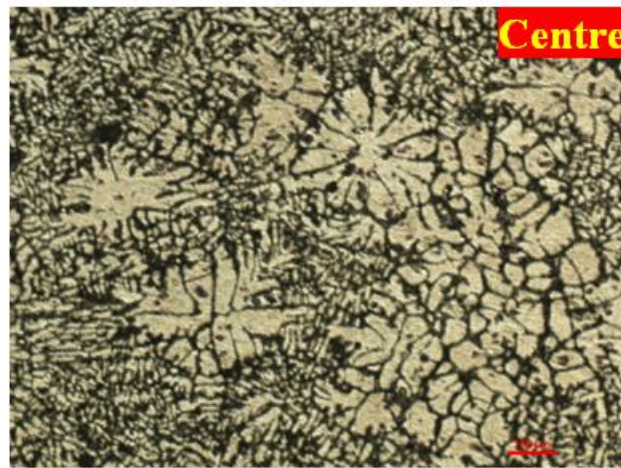
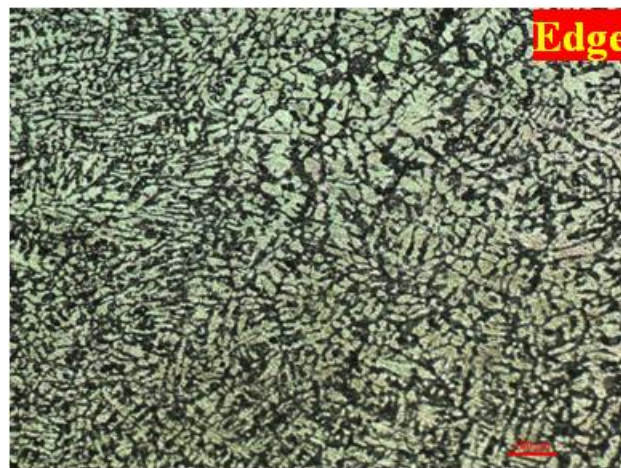


Figure 8B



200 μm

Figure 8C



Figure 8D

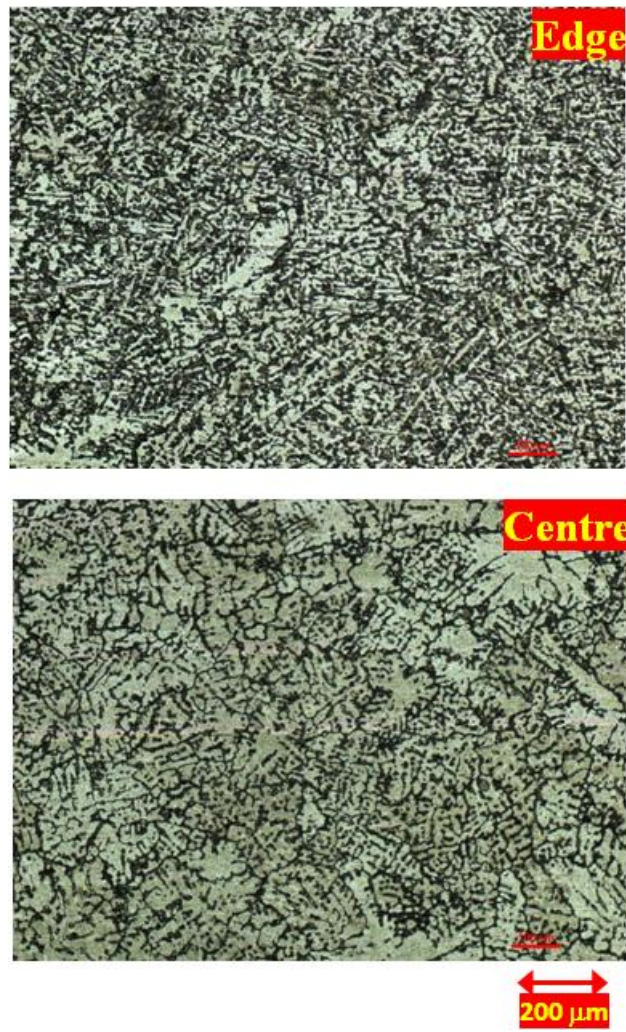
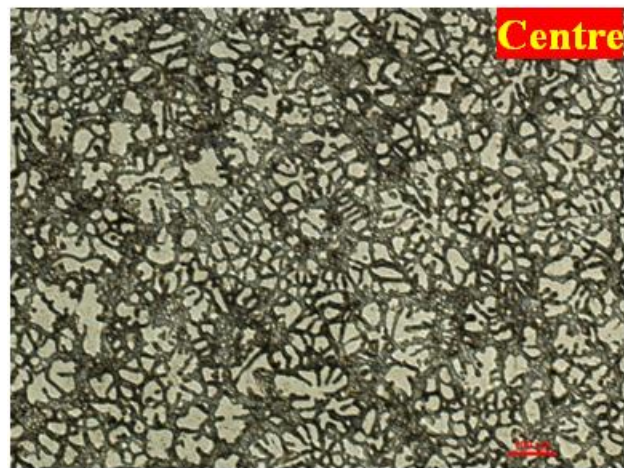
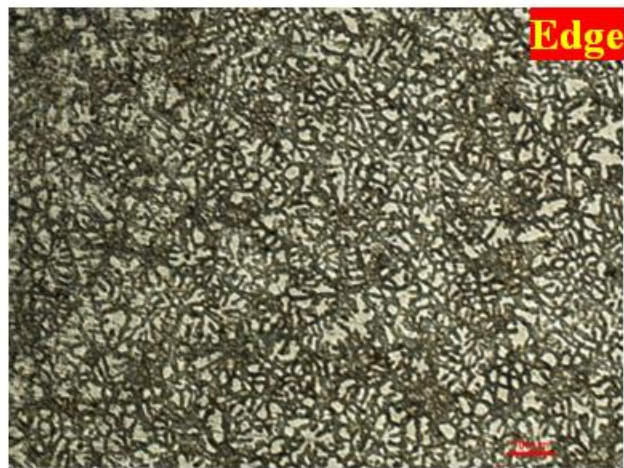


Figure 8E



200 μm

