



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**“Determinación de los Coeficientes de Transferencia de Calor Arena Sílica -  
Aluminio 319, en el Proceso de Fundición Nematik”**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERA QUÍMICA METALÚRGICA**

**PRESENTA:**

**CASTILLO MÜLLER ITZEL**



**México, D.F.**

**Junio del 2011**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE:**           **Profesor: JOSÉ ALEJANDRO GARCÍA HINOJOSA**

**VOCAL:**                   **Profesor: CARLOS GONZALEZ RIVERA**

**SECRETARIO:**           **Profesor: ARTURO JUÁREZ HERNÁNDEZ**

**1er. SUPLENTE:**       **Profesor: JOSÉ BERNARDO HERNÁNDEZ MORALES**

**2° SUPLENTE:**           **Profesor: MARCO AURELIO RAMÍREZ ARGAEZ**

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

**NEMAK S.A. DE C.V., MONTERREY, NUEVO LEÓN**

**ASESOR DEL TEMA:**

**ARTURO JUÁREZ HERNANDEZ** \_\_\_\_\_

**SUPERVISOR TÉCNICO:**

**ALEJANDRO ESCUDERO GARCÍA** \_\_\_\_\_

**SUSTENTANTE:**

**CASTILLO MÜLLER ITZEL** \_\_\_\_\_

## **Dedicatoria**

A mi madre, por ser la persona tan maravillosa que es, llena de amor y bondad. Gracias por darme la vida, respetar y apoyarme en cada decisión.

A mi padre, por darme la vida y permitirme dedicarle cada alegría y enseñanza en esta vida.

A mi hermana, por ser esa amiga verdadera de quien se aprende y a quien se reprende. Gracias por ser tan diferente a mí y enriquecer mi existir con el tuyo.

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por permitirme concluir este ciclo.

Al Dr. Arturo Juárez Hernández, por haberme apoyado en el desarrollo de este proyecto.

Al Dr. Bernardo Hernández Morales, por su paciencia, confianza y sinceros consejos a lo largo de la carrera, en cada etapa y cada experiencia.

Al Dr. Marco Aurelio Ramírez Argáez y M en C Antonio Huerta por permitirme la realización del proyecto en Monterrey y apoyarme en el camino.

Al Dr. José Alejandro García Hinojosa y Dr. Carlos González por su apoyo en la revisión de este trabajo.

A la empresa Nemark S.A. de C.V., por brindarme las posibilidades de realizar este proyecto.

Al Dr. Carlos Esparza, por su apoyo en la realización del proyecto.

Al M en C Alejandro Escudero por su conocimiento y grandes enseñanzas.

A mis compañeros de CAE Héctor Posadas, Orlando Niño, Idalia Rodríguez, Karla López, Mario Núñez y Ángel Barboza, por compartir este tiempo en Nemark; de todos me llevo aprendizajes y buenos momentos.

A las personas de R&D quienes ayudaron amablemente a realizar las experimentaciones, sobre todos a Efrén Carrera y José Luis Tijerina.

A todas las amistades que me ayudaron a los trámites y demás detalles para la realización del presente trabajo. Primero empezaré por los de licenciatura Alicia, Fer e Hiram Gómez gracias a ustedes verdaderamente aprendí a disfrutar más la universidad, gracias por compartir excelentes momentos y por su grandísimo

apoyo, sin ustedes no habría examen profesional. Alejandro, Marco, Alan, Get, Víctor, José Luis, Morales, Mirna Reyes, Alicia Villaseñor, Laura, Víctor y Karim gracias por hacer más divertida la universidad. También en el tiempo que he pasado en Monterrey he hecho muy buenas amistades que han ayudado enormemente a la culminación de este trabajo, como lo son: José Ayala, Sergio Gallegos y nuevamente debo mencionar a José Luis Tijerina, gracias por su ayuda en verdad lo valoro muchísimo y espero sea el principio de grandes amistades.

A mis padrinos, Lupita y Carlos, por caminar a mi lado y nunca dejarme sola.

A Lolis y Alfredo, de quienes he aprendido tanto y no cabe duda que siga haciéndolo. Gracias por siempre ver por nosotras y todos los buenos momentos.

A mi tío Erich quien desde lejos siempre nos ha apoyado.

## Resumen

Actualmente la industria automotriz trabaja bajo altas normas de calidad, lo que obliga al mercado de la fundición a mejorar sus acabados superficiales y propiedades. Para mejorar las propiedades del material es necesario conocer los mecanismos controlantes dentro de la fundición, como lo son: la temperatura del metal vaciado y del molde, la rapidez del vaciado y la composición de la aleación, entre otras. Un factor de suma importancia para incrementar la calidad de las piezas fundidas es el coeficiente de transferencia de calor, porque nos indica la tasa a la cual la pieza perderá calor durante el proceso de solidificación. En este proceso de enfriamiento es cuándo llegan a generarse porosidades en la pieza, rechupes o microgrietas, que podemos prevenir al controlar la tasa de transferencia de calor. En el actual trabajo se presenta los resultados de la obtención de los coeficientes de transferencia de calor durante el proceso de fundición de una aleación Al 319 – molde de arena sílica. Primero se llevó a cabo la experimentación, donde se utilizaron 15 termopares ubicados en tres zonas: la pieza fundida, la interfase metal-arena y el molde de arena. Los resultados obtenidos se introdujeron en un módulo de simulación llamado Frontier del *software* Magma. Este módulo obtuvo mediante método inverso el coeficiente de transferencia respecto a la temperatura. Se obtuvo una alta correlación y se pudo reproducir la trayectoria de temperatura de los termopares durante la solidificación. Se concluyó que el coeficiente presenta un comportamiento constante hasta llegar a la formación del eutéctico y de la capa de aire en la interfase, en este instante el coeficiente decrece significativamente. Al completar la formación del eutéctico el coeficiente vuelve a incrementar su valor para posteriormente decrecer de forma estable, lo cual se demuestra con las curvas de enfriamiento obtenidas. El conocimiento de esta propiedad ayudará a obtener mejores correlaciones en futuras simulaciones de la empresa Nematik.

## CONTENIDO

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<b>Aluminio</b>	<b>1</b>
1.1.1	Aleaciones Al-Si	6
1.1.2	Aleaciones Al-Mg-Si	6
<b>1.2</b>	<b>El Aluminio en la Industria Automotriz</b>	<b>7</b>
1.2.1	Fundición de aleaciones de aluminio en moldeo a presión (Die Casting)	9
1.2.2	Fundición de aleaciones de aluminio para moldeo en arena	9
1.2.3	Fundición de aleaciones de aluminio para moldeo en molde permanente	10
1.2.4	Arena para fundiciones de Aluminio	10
<b>1.3</b>	<b>Ingeniería Actual</b>	<b>11</b>
<b>1.4</b>	<b>Solidificación</b>	<b>13</b>
1.4.1	Nucleación	13
1.4.2	Tamaño de grano	15
1.4.3	Interfase sólido- líquido	15
1.4.4	Rapidez de Enfriamiento	17
<b>1.5</b>	<b>Coefficiente de Transferencia de Calor</b>	<b>17</b>
<b>1.6</b>	<b>Método Inverso y Métodos Numéricos</b>	<b>19</b>
<b>1.7</b>	<b>Modelo Matemático</b>	<b>26</b>
<b>2</b>	<b>Hipótesis</b>	<b>29</b>
<b>3</b>	<b>Objetivos</b>	<b>29</b>
3.1	Objetivo General	29
3.2	Objetivos específicos	29
<b>4</b>	<b>Alcance</b>	<b>29</b>
<b>5</b>	<b>Metodología de Trabajo</b>	<b>30</b>
5.1	Fabricación del Casting	30
5.2	Obtención de las Historias Térmicas	31
5.3	Fabricación del molde en CAD	32
5.4	Simulación en Magma	33
5.4.1	Propiedades Termofísicas	36
5.4.2	Mallado	36
5.4.3	Módulo Frontier	38
<b>6</b>	<b>Resultados y Discusión</b>	<b>40</b>
6.1	Fabricación del Casting	40

<b>6.2</b>	<b>Obtención de las Historias Térmicas.....</b>	<b>42</b>
<b>6.3</b>	<b>Simulación en Magma.....</b>	<b>45</b>
6.3.1	Módulo Frontier.....	46
<b>7</b>	<b><i>Conclusiones</i>.....</b>	<b>56</b>
7.1	Conclusión General.....	56
7.2	Conclusiones Específicas.....	56
<b>8</b>	<b><i>Bibliografía</i>.....</b>	<b>58</b>

# 1 Introducción

## 1.1 Aluminio.

El Aluminio es un elemento metálico y nunca se encuentra en forma libre en la naturaleza. Se halla ampliamente distribuido en casi todas las rocas, por ejemplo las ígneas, que contienen aluminio en forma de mineral alúmino-silicato. Cuando estos minerales se disuelven, según las condiciones químicas, es posible precipitar el aluminio en forma de arcillas minerales, hidróxidos de Aluminio o ambos. Bajo estas condiciones se forman las bauxitas que sirven de materia prima fundamental en la producción de aluminio.

La obtención de aluminio suele ser mediante el proceso Hall-Héroult creado en 1886, en donde se reduce electrolíticamente la alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) disuelta en criolita. La industria del aluminio creció a partir de este momento. Dentro de sus primeras aplicaciones se encontró en marcos de espejos. Posteriormente sus aplicaciones se extendieron de tal manera que cualquier aspecto de la vida actual está directa o indirectamente afectado por él.

Las propiedades del aluminio que lo hacen tan atractivo son: apariencia, ligereza, maquinabilidad, buenas propiedades físicas, mecánicas y anticorrosivas, posee alta conductividad eléctrica y térmica, así como gran reflectividad. Es un material dúctil y maleable.

El aluminio tiene una densidad de  $2.6984 \text{ g/cm}^3$  a  $20^\circ\text{C}$ , aproximadamente un tercio de la del acero ( $8.53 \text{ g/cm}^3$ ). Muestra gran resistencia a la corrosión, incluso en ambientes salinos [1].

Su aplicación en la construcción representa el mercado más grande de la industria del aluminio. Lo podemos encontrar en puertas, cerraduras, ventanas, pantallas, boquillas y canales de desagüe. El transporte constituye el segundo gran mercado. Muchos aviones comerciales y militares están hechos casi en su totalidad de aluminio. En la industria aeroespacial, el aluminio también se encuentra en motores de aeroplanos, estructuras, cubiertas, trenes de aterrizaje e interiores; cerca de 80% del peso del avión es de Aluminio.

En las aplicaciones eléctricas, los alambres y cables de aluminio son los productos principales. Se encuentra en el hogar en forma de utensilios de cocina, papel de aluminio, herramientas, aparatos portátiles, acondicionadores de aire, congeladores, refrigeradores, y en equipo deportivo como esquís y raquetas de tenis. Existen cientos de aplicaciones químicas del aluminio y sus compuestos. El aluminio en polvo se usa en pinturas, combustible para cohetes, explosivos y como reductor químico [2].

El aluminio, como material necesario para todas las aplicaciones antes mencionadas, se encuentra clasificado. La clasificación hecha por ASM (American Society of Metals) [3] para las aleaciones base aluminio es la siguiente:

**Tabla 1. Serie de aleaciones de Al**

<b>Serie</b>	<b>Componente</b>
<b>1xxx</b>	Al > 99%
<b>2xxx</b>	Cu
<b>3xxx</b>	Mn
<b>4xxx</b>	Si
<b>5xxx</b>	Mg
<b>6xxx</b>	Mg+Si
<b>7xxx</b>	Zn+Cr/Mn/Cu
<b>8xxx</b>	Sn
<b>9xxx</b>	No usadas o Futuras Aleaciones

En el caso de las aleaciones vaciadas la AA (Asociación del Aluminio) se hace la siguiente designación:

**Tabla 2. Serie de aleaciones de Al vaciadas**

Serie	Componente
1xx.x	Al > 99%
2xx.x	Cu
3xx.x	Si+Cu/Mg
4xx.x	Si
5xx.x	Mg
6xx.x	No usada
7xx.x	Zn
8xx.x	Sn
9xx.x	No usadas o Futuras Aleaciones

En la designación 1xx.x, el segundo y tercer dígito indican el contenido mínimo de aluminio. En todas las aleaciones vaciadas, el cuarto dígito a la derecha del punto decimal, indica la forma de producto:

**Tabla 3. Complemento serie de aleaciones de al vaciadas**

Designación	Forma de producto
0	Pieza vaciada
1	Lingote estándar
2	Lingote con composiciones cercanas a la de los lingotes estándar

Cuando existen variaciones en los límites de composición que son muy pequeños como para requerir un cambio en la designación numérica, se indica con una letra que precede al número entero (319A, 319B, 319C, etc.).

Los elementos de aleación tienen influencia sobre las propiedades físicas, mecánicas y metalúrgicas en el aluminio antes y después del tratamiento térmico, la Tabla 2 se indican los principales efectos de los elementos de aleación, que estarán en función de su concentración y combinación con otros elementos y el tratamiento del metal [1].

**Tabla 4. Comportamiento de los elementos aleantes comunes en el aluminio.**

<b>Elemento</b>	<b>Beneficia (Aumenta)</b>	<b>En exceso (Disminuye)</b>
<b>Silicio</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La resistencia a la corrosión.</li> <li>• La resistencia al desgaste.</li> <li>• La dureza.</li> <li>• La fluidez.</li> <li>• La resistencia a la tensión</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ductilidad.</li> <li>• La maquinabilidad.</li> <li>• La conductividad eléctrica y térmica.</li> <li>• La contracción o rechupe.</li> </ul>
<b>Cobre</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La resistencia mecánica.</li> <li>• La dureza.</li> <li>• La maquinabilidad.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La fluidez.</li> </ul>
<b>Magnesio</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La resistencia mecánica.</li> <li>• La dureza.</li> <li>• La maquinabilidad.</li> <li>• La ductiidad.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El efecto de la contracción.</li> <li>• Formación de escoria e inclusión de óxidos.</li> </ul>
<b>Manganeso</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La duración de los moldes.</li> <li>• Resistencia mecánica a elevadas temperaturas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La fluidez.</li> </ul>
<b>Hierro</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El efecto de contracción, el fierro es considerado como impurezas en las aleaciones de aluminio, cuando sobrepasa el 0.30 % porque en ausencia del magnesio, forma agujas muy largas y quebradizas, debilitando la estructura.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La resistencia mecánica.</li> <li>• La ductilidad.</li> </ul>
<b>Boro</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Como refinador de grano.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Atacando el molde.</li> </ul>
<b>Titanio</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Como refinador de grano.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sedimentándose.</li> </ul>
<b>Estroncio</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modifica el silicio eutéctico.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Produciendo segregaciones.</li> </ul>

El hierro es la impureza más común en el aluminio. Presenta alta solubilidad en estado líquido y baja en estado sólido. Se presenta comúnmente como intermetálico secundario. Reduce el tamaño de grano y en aleaciones Al-Ni-Cu aumenta la resistencia a altas temperaturas.

El silicio es la segunda mayor impureza, después del Fe en aluminio comercial y reduce la posibilidad de fractura por fatiga, da junto con Mg el intermetálico  $Mg_2Si$ , el cual, hace de la aleación una aleación tratable térmicamente, sin embargo solo es en concentraciones del 0.5% al 4%.

El aluminio utilizado a nivel mundial parte de dos fuentes principales:

- Primario: producción directa de la mena.
- Reciclado: metal recuperado de escorias o material reciclado, también llamado recuperación secundaria.

Pasos para realizar el reciclaje:

- Triturado y eliminación de impurezas del aluminio.
- Lavado y secado para eliminar restos orgánicos y humedad.
- Se introducen las virutas de aluminio en un horno, donde se funde el aluminio y se forman lingotes de aluminio o láminas.
- Fabricación de nuevos productos.

En su mayoría los productos fabricados de aluminio son por medio de fundición y de extrusión. Respecto a piezas por fundición, la industria automotriz es quien ha ocupado el mayor mercado, mientras que respecto a la extrusión son varias industrias, dada la maleabilidad del metal [6].

Es importante señalar que hoy en día el aluminio es el metal con mayor reciclaje en el mundo. Tiene un ciclo de vida largo, lo cual lo hace económica y ecológicamente una excelente alternativa.

De las series mostradas anteriormente, la serie 3xx (aleaciones aluminio-silicio) es, por mucho, la más utilizada para fundición. Tienen características, tales como

buena fluidez, buena resistencia a la corrosión, además de ser fácilmente soldadas y maquinadas. Algunas de las aleaciones más usadas para estas necesidades son las mencionadas a continuación [3, 4].

### **1.1.1 Aleaciones Al-Si.**

Son las aleaciones de más importancia para piezas fundidas, tienen alta fluidez, por lo que es fácil de alimentar los moldes con ella. Además el Si no reduce la resistencia a la corrosión del Al puro. El diagrama de fases es un eutéctico.

Las aleaciones más importantes son la 443 (5.3% Si) y la 413 (12% Si). Las partículas del eutéctico Al-Si es modificado al agregar Na, Sr o P en pequeña proporciones, alrededor de 0.025%, y refina el Si primario así por ejemplo al agregar Na a una aleación de 7% Si, la UTS (Tensión Última) pasa de 6 a 10%, y al refinar el Si, el Na mejora la alimentación del aluminio en el molde.

### **1.1.2 Aleaciones Al-Mg-Si.**

Se puede aumentar la resistencia mecánica de las Al-Si, si se agrega 0.35% Mg. El Mg produce un envejecimiento por precipitación. En estas aleaciones hay que disminuir su contenido de hierro, ya que éste forma agujas de  $Fe_2Si_2Al_9$ , porque el Fe reduce drásticamente la ductilidad de 14% a 1% y la UTS (Tensión Última) de 213.75 a 75.85 MPa.

Estas aleaciones son vaciadas tanto en moldes de arena como metálicos. Son utilizadas preferentemente para producir piezas automotrices, entre otras aplicaciones. La aleación 319 se obtiene a partir de reciclaje y es utilizada, por ejemplo, para producir pistones y múltiples de admisión. Las aleaciones 356 y 357 se utilizan en aplicaciones automotrices y aeronáuticas. Diversas partes automotrices, como rines y cilindros maestros de frenado, son realizadas con aleación 356.0. Por otro lado, la aleación hipereutéctica 390.0 se ha comenzado a

utilizar en monoblocks de motores automotrices a través de procesos de fundición de alta presión.

## **1.2 El Aluminio en la Industria Automotriz.**

La industria automotriz es un campo de continuo desarrollo ingenieril, el gran mercado existente genera que las compañías busquen innovar y mantenerse a la vanguardia, de igual manera la presente circunstancia ambiental los hace buscar procesos eficientes y selección de materiales para no afectar al ambiente. Uno de los cambios más importantes que ha generado la industria automotriz es la sustitución del hierro gris en la manufactura de motores de combustión por aluminio. La sustitución no se ha limitado a las cabezas de pistones, sino que se ha extendido al cuerpo del motor y se estudia la posibilidad de eliminar las camisas de las cámaras de combustión (Esparza Jaime, 2005). Esta mejora no sólo ayuda a hacer más ligero el automóvil, sino que al mismo tiempo reduce la producción de CO<sub>2</sub> por auto y al ser un material fácilmente reciclable, presenta una mayor viabilidad.

En los automóviles, el aluminio aparece en interiores y exteriores como molduras, parrillas, llantas (rines), acondicionadores de aire, transmisiones automáticas y algunos radiadores, bloques de motor y paneles de carrocería. Se encuentra también en carrocerías, ruedas formadas para camiones, vagones, contenedores de carga y señales de carretera, división de carriles y alumbrado. Uno de los casos más exitosos ha sido la sustitución de hierro gris en la manufactura de motores de combustión. Esta sustitución va desde las cabezas de los pistones hasta la extensión del cuerpo del motor y se estudia la posibilidad de eliminar las camisas de las cámaras de combustión, esta industria se encuentra entre las más desarrolladas, gracias a la apertura de los mercados y la imposición de normas y estándares de fabricación y desempeño cada vez mayores.

Las aleaciones empleadas en la industria automotriz deben asegurar buenas propiedades mecánicas. El aluminio ha sido adoptado por la industria automotriz como el material preferido. Con su ligereza ayuda al óptimo desempeño del vehículo, su maleabilidad da la oportunidad de brindar gran variedad de acabados y su alta conductividad térmica favorece el proceso de combustión, permitiendo el ahorro de combustible. El uso de este metal reduce ruido y vibración, además, el aluminio absorbe energía cinética, lo cual, evita que en un accidente la reciban los pasajeros. El aluminio no se oxida como el acero; significa que los vehículos, en zonas climatológicas de gran humedad tendrán una vida más larga. Los autos con cuerpo de aluminio duran tres o cuatro veces más que los que tienen un chasis de acero y permite reciclarlo favoreciendo el reciclaje.

Esta familia de aleaciones proporciona una buena combinación de costo, resistencia mecánica y resistencia a la corrosión, junto con la alta fluidez requerida para facilitar el moldeo. Por mencionar algunos, la aleación 319 (6% Si-3.5 % Cu) se usa para hacer las cabezas de cilindros, cajas de combustión interna, así como en otras partes que requieren alta presión y resistencia moderada. La aleación 336 (12% Si-1.0% Cu-2.5%Ni y 1.0% Mg) se usa para pistones, extractores, poleas, pues entre otros componentes se requiere resistencia a altas temperaturas, un bajo coeficiente de expansión térmica y buena resistencia al desgaste. La aleación 356 y A356 (7% Si-0.3% Mg) se usa para hacer las cajas de transmisiones bloques cilíndricos de enfriamiento y otras partes que requieren alta resistencia a la corrosión y presión a altas temperaturas. La aleación 390 y A390 (17% Si- 4.5% Cu y 0.6% Mg) se usan para hacer blocks, cuatro-ciclos, bombas, frenos y otros, prácticamente todas las partes de un auto, resulta fácil reciclarlo y supone un gran ahorro tanto de energía, como de materias primas. El aluminio que se recupera conserva gran parte de sus propiedades, pudiendo repetir el proceso cuantas veces se quiera [5].

Las piezas de Aluminio de uso automotriz que se obtienen principalmente por fundición, son aleaciones de Al-Si-Cu. Son principalmente componentes que requieren resistencia a abrasivos, bajo coeficiente de expansión térmica, resistencia a altas temperaturas y resistencia al desgaste. (Edmund Isakov, 2008)

A continuación se presenta los procesos de fundición típicas en la industria automotriz:

### **1.2.1 Fundición de aleaciones de aluminio en moldeo a presión (Die Casting).**

Las aleaciones de aluminio para moldeo a presión son especialmente adecuadas para la producción de grandes cantidades de piezas relativamente pequeñas. Con el moldeo a presión es posible producir piezas con buen acabado superficial manteniendo tolerancias cerradas.

Es excelente para la fabricación de piezas de espesores delgados, que requieran de buena resistencia, utilizadas ampliamente para cubiertas de transmisión, depósitos de aceite, bombas, tapas de marcha.

### **1.2.2 Fundición de aleaciones de aluminio para moldeo en arena.**

En el moldeo en arena el molde se forma sobre un patrón con arena apisonada mezclada con un aglutinante apropiado, después el patrón es retirado dejando la cavidad donde se hará el vaciado. Cuando la fundición tiene cavidades internas se usan también corazones de arena.

El metal fundido es vaciado dentro del molde y después que se ha solidificado es destruido para extraer la fundición. Este tipo de vaciado se utiliza cuando la producción de piezas es pequeña, o con producción de piezas con corazones complejos.

Las principales ventajas de la fundición en arena son su bajo costo en equipo y gran versatilidad, ya que pueden utilizarse una gran variedad de aleaciones, formas y tamaños, mientras que las desventajas son la baja precisión dimensional, pobre acabado superficial y baja resistencia como resultado de enfriamiento lento.

Dentro de las aleaciones usadas comúnmente en arena, podemos mencionar las aleaciones 356, 319 y 443. Se usa para la fabricación de piezas cajas de transmisión, accesorios y carcasas para bombas de automotores.

### **1.2.3 Fundición de aleaciones de aluminio para moldeo en molde permanente.**

Al igual que el moldeo a presión, el moldeo en molde permanente es adecuado para la producción de alto volumen. Las fundiciones en molde permanente son típicamente más grandes que las de Die Casting.

El peso máximo de fundiciones en molde permanente es de alrededor de 10 Kg. Aunque no es raro ver piezas mucho más grandes cuando el costo del maquinado y equipo de fundición se justifican por la calidad requerida por la fundición.

Las fundiciones en molde permanente son alimentadas por gravedad y la velocidad de vaciado es relativamente baja. Este tipo de fundiciones presentan excelentes propiedades mecánicas, que pueden ser mejoradas por tratamiento térmico. Algunas aleaciones usadas para fundición en molde permanente son: 319, 332 y 356.

### **1.2.4 Arena para fundiciones de Aluminio.**

En los moldes semi-permanente para las fundiciones se suele usar arena sílica. Esta es arena mezclada con agua de vidrio ( $\text{NaO.nSiO}_2.m\text{H}_2\text{O}$ ) y puede ser

endurecida con CO<sub>2</sub> transformando la arena en un molde sólido, que pudiese ser usado nuevamente si no se quemara dicha arena.

### 1.3 Ingeniería Actual.

Hoy en día la ingeniería ha avanzado de tal manera que la experimentación no es suficiente ni eficiente para la industria. Esta necesidad ha llevado al uso de la Ingeniería Asistida por Computadoras, comúnmente denominado CAE, por sus siglas en inglés (Computer-Aided Engineering).

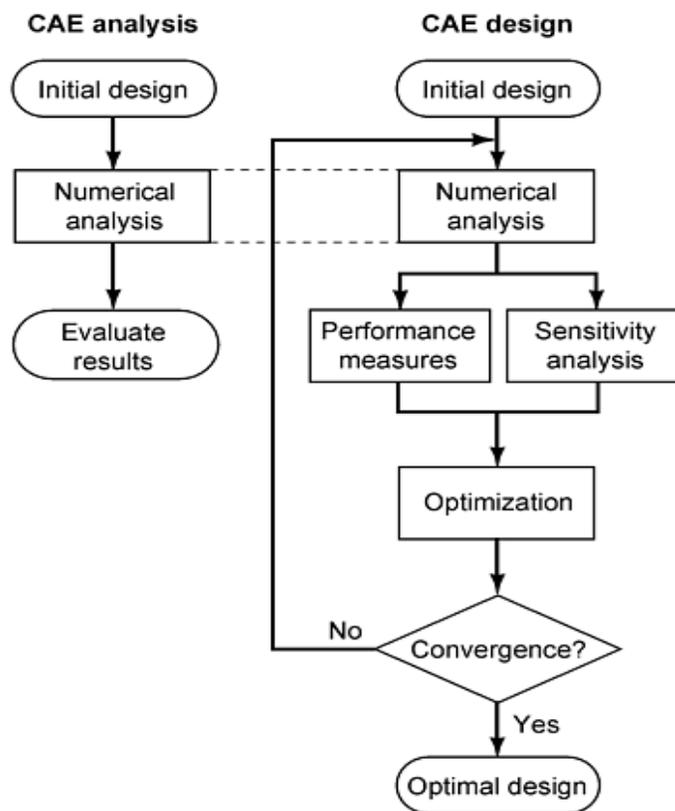


Figura 1. Análisis y diseño de los procesos desarrollados en CAE [6].

En la Fig. 1 podemos observar un diagrama de flujo del análisis y diseño de proceso que efectúa CAE. El objetivo es conseguir la optimización del proceso y

satisfacer al cliente (compañías). Se puede ver la importancia del análisis numérico, procedimiento que brinda los parámetros sobre las mejoras.

De tal manera que las compañías puedan prosperar es necesario generar nuevos procesos y tener las herramientas necesarias para proveer un mejor producto al consumidor, bajo esta filosofía se genera el Desarrollo Integral de Producto, Integrated Product Development IPD, es la responsable de unir las estaciones CAE, con Diseño Asistido por Computadoras (CAD) y Manufactura Asistida por Computadoras (CAM). A partir de esta estructura organizacional de la ingeniería ha crecido el uso de *software* como herramienta para el modelado de procesos con mayor precisión.

En la actualidad se cuenta con varios modelos y *softwares* de solidificación, los cuales requieren del conocimiento de las propiedades del sistema; en específica las de la aleación utilizada y las de transferencia de energía entre el metal y el molde. Dada esta situación se han llevado a cabo muchos experimentos que nos permiten conocer el coeficiente de transferencia de calor del sistema, en la mayoría de los casos se plantea un problema unidireccional, dado que en la bibliografía encontrada la determinación experimental de coeficiente de transferencia de calor es específica del sistema en el cuál se trabajó ésta sólo debe tomarse como una referencia dentro del modelado [7].

El modelado del coeficiente de transferencia de energía se puede obtener de varias maneras, todos son métodos inversos. Se obtienen soluciones analíticas por medio de métodos numéricos, sin embargo en la actualidad se determinan con ayuda de programas de cómputo especializados. Existen diferentes formas de solución del método inverso, lo que dependerá del *software* a utilizar. En el caso del área de fundición suele ocuparse *software* como Procast y Magma; ambos *software* tienen una sección para ejecutar esta clase de iteraciones, la diferencia

radica en que uno se basa en elemento finito mientras el otro en diferencias finitas, éste último es el caso de Magma cuyo modulo es denominado MagmaFrontier [8].

## **1.4 Solidificación.**

La mayoría de los productos metálicos parten de un estado líquido hacia uno sólido. Este proceso de solidificación por el cual pasan las piezas, es fundamental porque es donde se generan los posibles defectos de la pieza, tales como: porosidades, micro-grietas, inclusiones no metálicas, segregación de elementos de aleación, formas heterogéneas de grano o rechupes.

El control de la calidad de las piezas depende de muchas variables como la nucleación, tamaño de grano, comportamiento de la interfase sólido-líquido, la rapidez de enfriamiento, distribución del soluto y elementos aleantes.

### **1.4.1 Nucleación.**

La transformación de líquido a sólido se puede dividir en dos etapas: la nucleación de la fase sólida en la líquida y dos el crecimiento de los núcleos conforme descende la temperatura. La coexistencia de las fases durante la solidificación y la relación rapidez de nucleación y crecimiento determinará la forma y el tamaño de los granos sólidos.

En los procesos mencionados encontramos dos significantes resistencias: la formación de una superficie entre el líquido y el sólido; y el ordenamiento de los átomos en el sólido en formación.

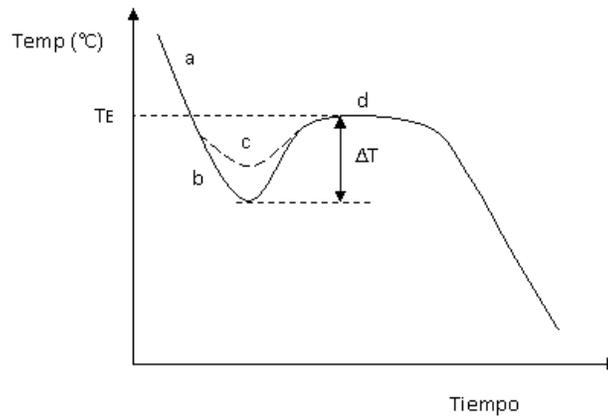
Existen dos tipos de nucleaciones:

- La Nucleación Homogénea: ocurre cuando no hay sustratos en el interior de la fase líquida. Por tanto cuando el líquido se enfría lentamente por debajo de su temperatura de equilibrio, se genera un núcleo cuyo radio crítico está

formado por un cierto número de átomos. Cuando el tamaño crítico es alcanzado, el núcleo crece por la adición continua de átomos.

- La Nucleación Heterogénea: ocurre cuando existen objetos especiales denominados sustratos en el interior de la fase líquida, los cuales ayudan a la formación de núcleos.

Las anteriores resistencias a la nucleación exigen un sobre-enfriamiento para que se inicie el proceso de solidificación; el sobre-enfriamiento será mayor para una nucleación homogénea, es decir, aquella por la cual se forma un núcleo en el seno mismo del líquido. Por otra parte, la nucleación heterogénea está caracterizada por la formación de núcleos sobre superficies sólidas existentes como paredes del molde o partículas sólidas en suspensión. El diagrama Temperatura (T) v/s tiempo (t) tendrá la siguiente forma para la solidificación de un metal puro:



**Figura 2. Curva típica de enfriamiento para un metal puro.**

Una característica importante de la cristalización de los sólidos es que a presión constante poseen una temperatura característica de equilibrio sólido / líquido,  $T_E$ . Solamente a esta temperatura existe el equilibrio, por lo tanto, podemos decir que las energías libres del sólido y del líquido son iguales.

En la Figura 2 podemos ver que el líquido es enfriado hasta  $T_E$ , corresponde a la zona a, el líquido debe ser sobre-enfriado en una cantidad  $\Delta T$  para comenzar la nucleación. El  $\Delta T$  será mayor para nucleación homogénea, (Curva b), que para nucleación heterogénea, (Curva c) y si continúa el crecimiento de los núcleos, se eleva la temperatura hasta  $T_E$ , producto del calor latente de solidificación, y de esta manera se mantiene constante esta temperatura. Cuando la solidificación termina y ya no hay más calor latente entregado al sistema, la temperatura de sólido comienza a descender, zona d.

### **1.4.2 Tamaño de grano.**

La nucleación es un fenómeno dado en las fronteras de grano o en las zonas con mayor energía libre, es decir, las más inestables. Por esta razón los llamados refinadores de grano están basados en la nucleación heterogénea.

El refinador agregado a la fase líquida provee de sustratos los cuales facilitan la nucleación heterogénea. Los núcleos formados en las paredes del molde inducen la generación de granos más grandes en comparación con los granos formados por la adición de un agente nucleante.

Realizar una refinación de grano ayuda a mejorar la distribución de defectos como impurezas, porosidad y fases duras; también mejora la respuesta de la pieza a esfuerzos desarrollados en una dirección preferencial.

### **1.4.3 Interfase sólido- líquido.**

La microestructura final de una pieza es el resultado del proceso de crecimiento durante el enfriamiento, es decir, del gradiente de temperatura en la interfase. El crecimiento de la fase sólida ocurre por transferencia de átomos individuales provenientes de la fase líquida. Durante la transferencia de átomos del líquido al sólido existen tres etapas que pueden controlar al proceso, son:

- Transporte de átomos desde el líquido a la interfase sólido –líquido.

- La adhesión del átomo a la interfase, sólido – líquido, con una cierta cantidad de energía liberada.
- Movimiento del átomo por difusión superficial a un sitio de la interfase, sólido–líquido, que sea consistente con la estructura cristalina del sólido.

Durante el crecimiento de la interfase sólido–líquido, dos procesos atómicos son posibles:

- Fusión: Que implica el abandono de átomos de la fase líquida hacia la fase sólida.
- Enfriamiento: Etapa durante la cual, los átomos de la fase líquida se incorporan al sólido. Los átomos en la fase líquida se encuentran a una energía más alta con respecto a la del sólido, esta diferencia la marca el calor latente que se libera durante el enfriamiento.

Para producir solidificación es necesario sobre-enfriar el líquido bajo la temperatura de fusión; al formarse una cierta cantidad de sólido se expulsa calor latente, el cual, eleva la temperatura de la interfase sólido–líquido produciéndose alguna de las siguientes situaciones:

- Gradiente positivo de temperatura delante de la interfase sólido–líquido. Cuando se tiene un gradiente de temperatura positivo el calor debe ser extraído por el sólido. El movimiento de la interfase es controlado por la cantidad de calor removido a través del sólido. Además la interfase debe ser isotérmica y moverse con velocidad uniforme. Si una protuberancia de sólido avanza hacia el líquido ésta se encuentra con líquido sobrecalentado y se disuelve. Se produce así un crecimiento con una interfase de forma plana o redondeada, pero sin protuberancias.
- Gradiente negativo de temperatura delante de la interfase sólido–líquido. Cuando se tiene un gradiente de temperatura negativo el calor puede ser extraído tanto por el sólido como por el líquido, por lo tanto, el movimiento

de la interfase no es controlado por la cantidad de calor removido a través del sólido. Al desencadenarse el proceso de solidificación se desprende calor latente que eleva la temperatura de la interfase sólido-líquido, de esta manera es posible que delante de la interfase se genere un gradiente negativo de temperatura. Si una protuberancia sólida avanza, se encontrará con líquido sobre-enfriado y ésta tenderá a crecer aún más hacia el interior del líquido. Por lo tanto, la interfase sólido-líquido avanzará con protuberancias puntiagudas llamadas dendritas (forma de árbol), de esto se deduce que la interfase plana es inestable en este caso [9].

#### **1.4.4 Rapidez de Enfriamiento**

La rapidez de enfriamiento en una fundición está condicionada por:

- La temperatura de vaciada; y
- La cantidad de calor producido durante la solidificación, es decir, el calor latente de transformación.

Una forma fácil de predecir como solidificará la pieza es mediante el número de Biot (Bi). Cuando el número de Biot es grande, el calor es transferido rápido desde el metal hasta el molde, pero toma más tiempo en alcanzar la pared del molde desde el seno del fluido, produciendo un alto gradiente de temperaturas en la pieza fundida y un gradiente pequeño en la interfase. Cuando el número de Biot es pequeño, la transferencia de calor del borde del casting es mayor que la transferencia de calor del metal al molde, produciendo una gran diferencia de temperaturas a lo largo de la interfase y un gradiente grande de temperatura en la pieza fundida [9].

#### **1.5 Coeficiente de Transferencia de Calor.**

El análisis del coeficiente de transferencia en la interfase se basa en la siguiente ecuación:

$$q = -h(T_{Metal} - T_{Molde})$$

Donde  $q$  es el flujo de calor,  $T_{Metal}$  es la temperatura sobre la superficie del metal,  $T_{Molde}$  es la temperatura sobre la superficie del molde en contacto con el metal, y  $h$  es el coeficiente interfacial de transferencia de calor. Esta ecuación no explica el mecanismo de transferencia de calor por convección mas bien define el coeficiente convectivo de transferencia de calor.

El mecanismo el cual, transfiere calor del metal fundido al molde o al chill es convección, en el caso de metales con bajos puntos de fusión puede despreciarse la contribución de transferencia por radiación. La variabilidad de los valores del coeficiente se debe a varios factores; siendo el “gap” de aire en la interfase entre el metal y el molde la que los afecta de forma más importante. En una publicación de 1985 Ho y Pehlke describen la transferencia de calor en la interfase como una función del espacio que existe entre el metal y el molde [10].

De acuerdo a investigaciones sabemos que inicialmente durante la solidificación se forma una pequeña capa de metal solidificado en contacto con la arena, mientras mayor sea el espesor solidificado, menos determinante será el coeficiente en el sistema, para esta transferencia. El coeficiente ( $h$ ) no es una característica constante del medio fluido; por el contrario, depende en una forma complicada de muchas variables, que comprenden las propiedades del fluido ( $k$ ,  $\rho$ ,  $\mu$ ,  $C_p$ ), la geometría del sistema, la velocidad de flujo, la diferencia de temperaturas y la distribución de temperatura en la superficie [11].

La transferencia de calor ocurre a través de los picos de las superficies rugosas del metal, al igual que por medio del aire contenido en los huecos entre las áreas de contacto; un incremento en la superficie rugosa del metal produce un decremento en el coeficiente de transferencia.

Conforme avanza la solidificación existen momentos de expansión y contracción de los metales, en el caso del chill, esto modificará las áreas de contacto, generando así una burbuja de aire. Dicha burbuja de aire, conocida como air gap, impedirá el libre flujo de energía ocasionando una reducción en el coeficiente de transferencia, determinando así su valor. También se sabe que un incremento en la temperatura del metal resulta en un incremento en el coeficiente.

La determinación del coeficiente de energía durante esas etapas del proceso de solidificación es de especial interés industrial, ya que es el responsable que termine la pieza con un buen acabado y de los defectos superficiales, así como las propiedades de dicha. Mediante el control efectivo del coeficiente o en su defecto el entendimiento de su modificación durante el proceso, podemos hacer mejoras tanto en reducción de costos como en eficiencia del proceso. Dada esta observación existen varios *softwares* que ayudan a la simulación de los procesos y así poder predecir el comportamiento del coeficiente [12, 13].

## **1.6 Método Inverso y Métodos Numéricos.**

Para introducir el método inverso debemos conocer que se estudia un problema físico y las observaciones obtenidas a partir de él. El procedimiento para atacarlo es el siguiente:

- Parametrización del sistema (inductivo).
- Modelado directo (inductivo).
- Modelado inverso (deductivo).

Lo más importante en un problema inverso es la distribución de probabilidades del modelo. El problema inverso será entonces resuelto mediante el conjunto de métodos (numéricos o analíticos) usados para extraer información útil de nuestro

entorno a partir de medidas físicas bajo cierta distribución de probabilidades. La información útil vendrá especificada como valores numéricos de alguna propiedad de este entorno. Estas propiedades serán los parámetros del modelo. El problema inverso contrasta con el problema directo, donde se predicen los resultados a partir de los parámetros dados, condiciones iniciales y condiciones a la frontera [14].

La teoría del problema inverso en su sentido más amplio ha sido desarrollada por los investigadores que trabajan con métodos geofísicos. La razón es que dichos investigadores tratan de entender el interior de la Tierra sólo a partir de datos obtenidos desde la superficie. Sin embargo, el problema inverso aparece en muchas otras ramas de las ciencias físicas, como pueden ser la tomografía médica, el procesado de imagen, la ingeniería o el ajuste de curvas, entre otras.

Éste tipo de soluciones se refieren a utilizar observaciones o suposiciones para aproximarse hacia una solución exacta, esto, mediante la exhaustiva caracterización del problema de estudio.

Las principales dificultades que podemos encontrar para la solución de dichos, son (Tarantola, 2005):

1. Falta de consistencia entre los datos obtenidos en cada iteración y los parámetros utilizados para el modelo.
2. No encontrar los parámetros exactos del modelo, lo que obligaría a una investigación prácticamente infinita de datos.

Un problema inverso típico consta de:

- a) Un modelo matemático (serie de datos).
- b) Parámetros conocidos.
- c) Una relación entre las observaciones y los posibles resultados.

Los algoritmos iterativos pueden tener problemas de convergencia. Los algoritmos de un sólo paso son un caso particular donde sólo se realiza la primera iteración. Los problemas que se resuelven con éste método son en general aquellos cuya solución no depende continuamente de los mismos parámetros (condiciones de frontera móvil), dónde la solución puede no existir, no es única o no es dependiente de otro variable en todo el dominio de la función. Según los estudios la existencia y unicidad pueden ser restaurada mediante aproximaciones [14].

El desarrollo del método inverso se basa principalmente en el análisis estadístico ya que a partir de los datos del espacio del modelo y las consiguientes iteraciones se predecirá que panorama es más viable a seguir.

Para el análisis de problemas de transferencia de calor, un adecuado arreglo de ecuaciones es determinante para describir el fenómeno físico. En este caso la ecuación que rige el proceso de interés está dada por la ecuación general de conducción de calor.

Con las condiciones de frontera, condiciones iniciales, y propiedades termofísicas de los materiales, es posible obtener una distribución de temperaturas en todo el sistema. Sin embargo, si una de las propiedades termofísicas del material es desconocida, es posible calcular dicha propiedad desconocida mediante un esquema inverso [15].

Debido a la no-linealidad de los problemas inversos en la conducción de calor, en particular durante la solidificación del metal, los métodos numéricos son generalmente requeridos para su solución [11].

Todas las medidas físicas están sujetas a cierta incertidumbre. Por lo que el resultado del acto de medir no es simplemente un valor observado sino un estado de información, denominado  $d$ , adquirido a partir de algunos parámetros observados.

En cuanto a los datos obtenidos, se puede definir un mallado en el espacio del modelo y construir sobre él puntos de análisis. Según el análisis que se requiera puede ser en función de un volumen, de un área o de un plano. Esto sólo aumentara o disminuirá la complejidad de las ecuaciones.

Para obtener la solución de un problema mediante un método numérico se siguen los pasos genéricos: generación de la geometría, discretización del sistema, selección del tipo de volumen, asignación de las propiedades del material o materiales, condiciones frontera, y solución del conjunto de ecuaciones.

La descripción del problema se lleva a cabo mediante un balance de energía, con una ecuación diferencial parcial (EDP) o mejor dicho un grupo de ellas, ya que al discretizar el problema tendremos en cada nodo una ecuación.

Los métodos de aproximación analítica son una solución de EDP, proporcionan frecuentemente información útil acerca del comportamiento de la solución en valores críticos de la variable dependiente, pero tienden a ser más difíciles de aplicar que los métodos numéricos. Por otro lado los métodos numéricos resuelven estas ecuaciones. Los métodos más usados en la actualidad por su facilidad de implementación en programas computacionales son: método de elemento finito y método de diferencias finitas. Ambos métodos son herramientas de análisis importantes ya que permiten obtener soluciones aproximadas de una amplia variedad de problemas. La premisa básica es que una región de solución puede ser modelada analíticamente reemplazándola con un arreglo de elementos

discretos. Esto permite reducir un número infinito de incógnitas del problema a uno con un número finito de incógnitas.

Los métodos del elemento finito y el de diferencias finitas son técnicas numéricas para resolver problemas que se pueden describir por EDP. Diferencias finitas se basa en expansiones en serie de Taylor a partir de las cuales se transforma una ecuación diferencial en ecuaciones algebraicas, disminuyendo el grado de dificultad de las ecuaciones a tratar. Estas ecuaciones algebraicas se iteran hasta llegar a un número tal de iteraciones que den un resultado parecido haciendo que el error sea mínimo; hasta este punto se puede decir que se habrá obtenido una solución. Su mayor diferencia radica en las geometrías posibles a desarrollar, por una parte elemento finito puede atacar geometrías de gran complejidad dado que su geometría base es triangular; por otro lado diferencias finitas cuenta con el cuadrado como elemento base, lo que hace el mallado menos fino en geometrías complejas.

Los métodos numéricos en su mayoría presentan un error de truncamiento que se refiere al error generado en cada iteración, por este error será más confiable un mallado fino, ya que incrementando las zonas nodales disminuiríamos el error de cada paso iterativo, sin embargo aumentamos el tiempo de cálculo. También es importante cuidar los intervalos de tiempo utilizados. Al tratarse de un método explícito el delta de tiempo tendrá un mínimo que se debe respetar, sino las ecuaciones se vuelven inconsistentes; mientras que si es un método implícito se puede ocupar cualquier delta de tiempo sin restricción alguna.

Un método explícito (o Hermitiano) tomará como referencia (pivote) los valores siguientes, también se hace referencia a ellos como hacia adelante, por ejemplo los nodos  $\Delta t + t$ ; mientras que los implícitos toman como datos pivote los actuales, es decir en el nodo  $t$ , también llamados hacia atrás. En el caso de estos métodos

es importante tomar en cuenta las propiedades a utilizar, ya que estas podrían cambiar según otras variables, como tiempo o temperatura. Los esquemas implícitos tienen como ventaja el mayor orden de aproximación frente a un equivalente explícito. Por otro lado exigen resolver un sistema de ecuaciones intermedio, es decir, más ecuaciones.

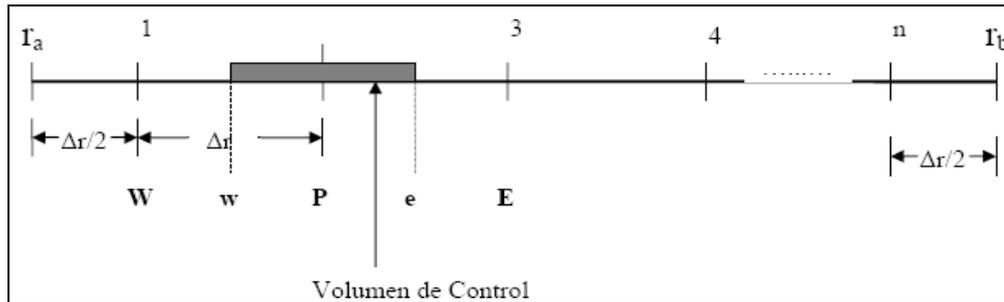
Dentro de las ecuaciones obtenidas es importante cumplir con un buen entendimiento de los algoritmos numéricos de solución. Tres conceptos matemáticos son útiles en la determinación del éxito o fracaso de tales algoritmos: consistencia, convergencia y estabilidad, que se explican a continuación:

- **Consistencia:** Una ecuación discreta se dice consistente con la ecuación diferencial que le da origen si el error tiende a cero cuando los incrementos del tiempo y el espacio tienden a cero independientemente del modo como lo hacen.
- **Convergencia:** La solución de una ecuación discreta es convergente si tiende a la solución del sistema diferencial en cada nodo de la malla cuando los incrementos del tiempo y el espacio tienden a cero.
- **Estabilidad:** Un esquema numérico es estable si los errores introducidos en una iteración no se amplifican según va transcurriendo el cálculo.

De los primeros estudios en la rama ingenieril, está presente el trabajo de Beck, quien muestra un algoritmo donde, se iteran las temperaturas para llegar a una buena aproximación (Beck, 1975) [11]. En este estudio se creó un modelo matemático de resolución de método inverso, el cual, es bastante referenciado dentro de la literatura.

Otra es la Técnica de Volumen de Control, ésta se basa en diferencias finitas y toma volúmenes sobre los cuales realiza el balance de energía. Es una práctica común colocar los volúmenes de control exteriores cerca del borde del dominio, en

cuyo caso las fronteras físicas coinciden con las fronteras del volumen de control. El método de los volúmenes finitos fue desarrollado originalmente como una formulación especial de las diferencias finitas. El primer paso en este método es dividir el dominio en volúmenes de control. Se toma un número  $n$  de nodos en el espacio comprendido entre  $r_a < r < r_b$ . Las fronteras o caras de los volúmenes de control están en el punto medio entre nodos adyacentes, así cada nodo está rodeado por un volumen de control. En la siguiente figura se puede observar el ciclo de iteración de cálculos que sigue este método, el cual hace que su solución requiera de un tiempo de cálculo largo; en este ejemplo se trata del tema a desarrollar en la presente tesis, un problema de transferencia de energía:



**Figura 3. Generación de malla (Volumen de Control), en un caso de transferencia de energía.**

En la Fig.4 podemos observar el ciclo de iteración de cálculos que sigue este método, el cual hace que su solución requiera de mayor tiempo.

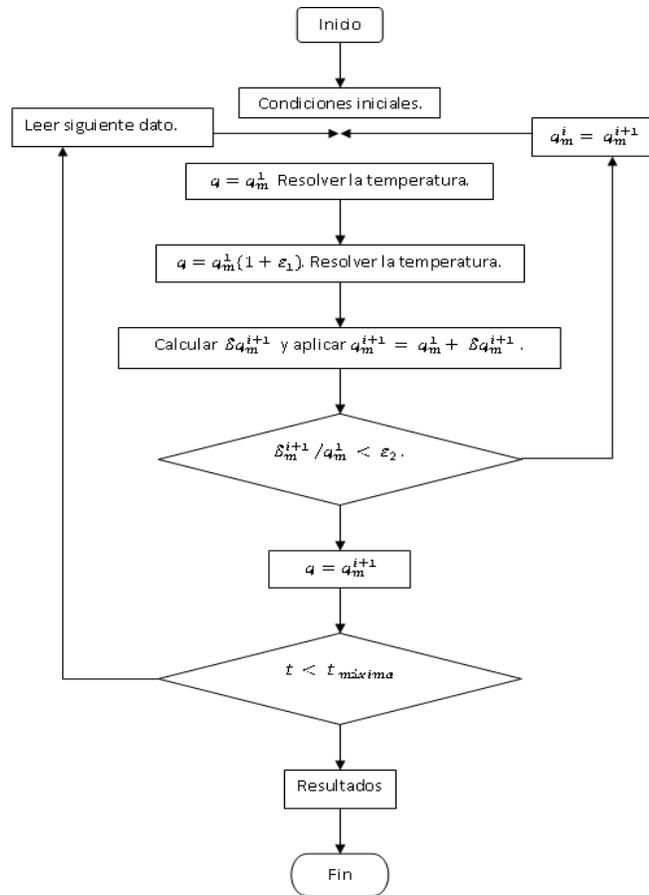


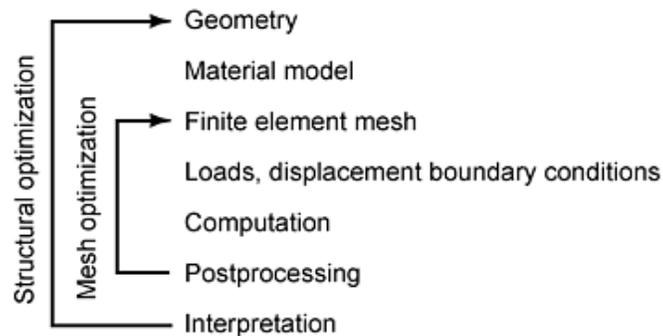
Figura 4. Diagrama de flujo para el algoritmo inverso de transferencia de calor [16].

### 1.7 Modelo Matemático.

Se trata de un problema de transferencia de energía siendo así la ecuación gobernante la ecuación general de transferencia de energía para un fluido newtoniano. Para su estudio se toma una solidificación unidireccional. También se consideran propiedades termofísicas variables, dado que es un sistema inestable. A continuación se presenta la Ecuación de Conservación de Energía, la cual, es la solución general del problema continuando con particularidades que condicionarán la solución exacta.

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \frac{\partial (\rho E u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial (\Sigma_{ij} u_j)}{\partial x_i} - \frac{\partial Q_j}{\partial x_j} + \rho F_i u_i$$

Se trata de una EDP su solución nos puede llevar a un problema de elemento finito, a continuación se representa un algoritmo para su solución Fig.5, donde podemos ver la importancia de la correcta definición del problema, sus condiciones de frontera, así como condición inicial. Los puntos anteriores son necesarios para un mallado preciso que brinde mejores resultados, además de ser indispensable para resolver el problema.



**Figura 5. Proceso típico de solución mediante elemento finito [3].**

En la Fig.5 se muestra la distribución de temperatura en la fundición y el molde. Como puede verse, existe una separación entre el metal y el molde debido a la contracción que sufre el primero. La solución analítica para esta situación es complicada. De hecho, es necesario realizar varias aproximaciones para poder obtenerla; entre ellas, que el molde sea suficientemente grande para ser considerado semi-infinito y que el flujo de calor se dé en una sola dirección. En las siguientes ecuaciones las propiedades termofísicas ( $k$ ,  $\rho$ ,  $C_P$ ) hacen referencia a las propiedades del metal solidificando.

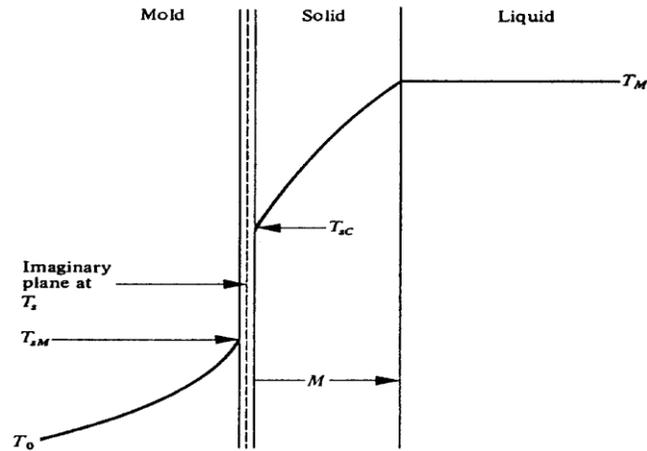


Figura 6. Representación esquemática de la interfase metal-molde durante la solidificación [6].

El flujo de calor que se extrae del metal solidificándose está dado por la primera ley de Fourier:

$$\vec{q} = -k_m \nabla T$$

Mientras que la ecuación de energía está dada por la segunda ley de Fourier:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_m \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

## **2 Hipótesis.**

Con el conocimiento del perfil de temperaturas en la interfase y dentro del molde podremos determinar las resistencias impuestas al libre flujo de calor durante la solidificación y así determinar el coeficiente de transferencia de energía experimental.

Los resultados obtenidos del coeficiente de transferencia calculados mediante el *software* deberán presentar una buena correlación. Para este fin se compararan las curvas experimentales con las curvas simuladas.

## **3 Objetivos.**

### **3.1 Objetivo General.**

- ❖ Determinar experimentalmente el coeficiente de transferencia de calor en una aleación de aluminio A-319, respecto a un molde de arena.

### **3.2 Objetivos específicos.**

- ❖ Construir un prototipo instrumentado que nos permita obtener el perfil térmico desde el inicio hasta el fin de la solidificación.
- ❖ Conocer la eficacia del módulo Frontier de Magma mediante una correlación.
- ❖ Comparar los resultados obtenidos mediante Magma en su módulo Frontier, con los valores experimentales.

## **4 Alcance.**

Aportar los resultados obtenidos a la base de datos de Nematik para posteriores simulaciones.

## 5 Metodología de Trabajo

### 5.1 Fabricación del Casting.

Para la determinación experimental del coeficiente de transferencia de energía, se registran las temperaturas durante la solidificación. Se utilizó una aleación base aluminio 319 y un horno de crisol, dónde se precalentó el metal hasta una temperatura de vaciado de 730°C, el baño metálico fue inyectado con Nitrógeno para eliminar el aire atrapado.

La elaboración del molde se llevó a cabo con arena sílica. Se utilizaron 15 termopares, tipo K (cromel/alumel; 270°C a 1372°C) en el primer experimento. Los termopares se conectaron a un adquisidor de datos, National Instruments SCXI-1000 y procesados con el *software* LabView2008. El *software* utilizado para el diseño fue Unigraphics NX3. El molde fue dividido en dos secciones por la línea de partición.

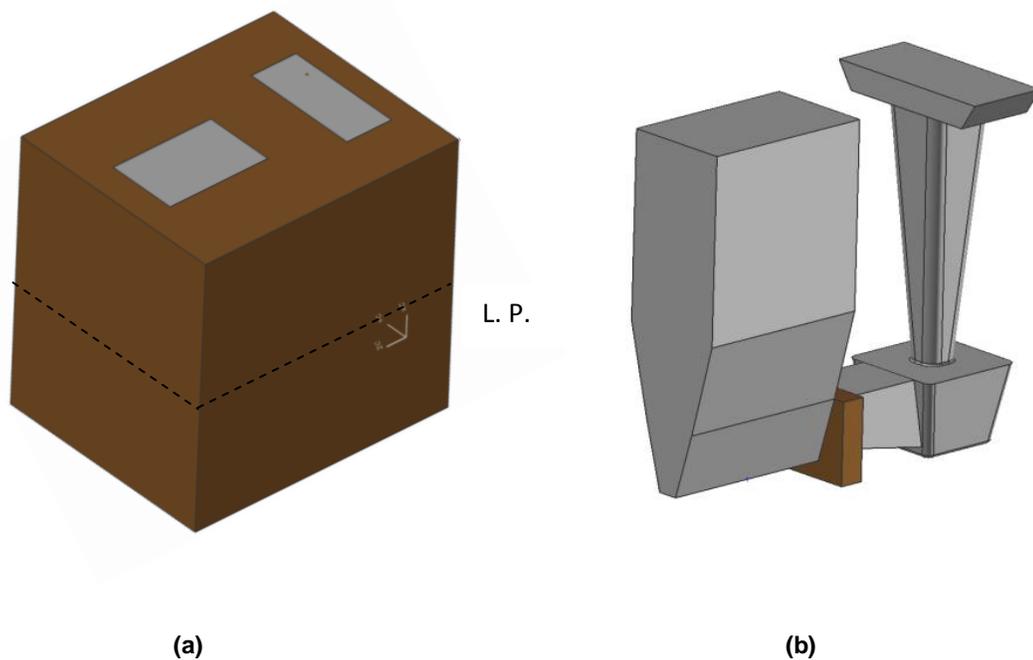
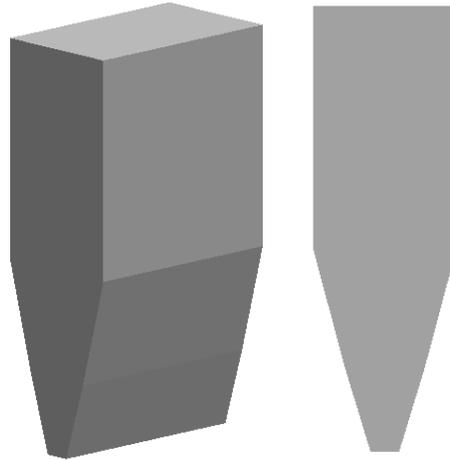


Figura 7. (a) Vista isométrica del Molde. (b) Vista isométrica de la cuña.

Se utilizó un filtro poroso de cerámico, para atrapar la escoria del metal durante el vaciado. La pieza obtenida fue un molde en forma de cuña que se muestra a continuación:



**Figura 8. Pieza fundida para el análisis térmico.**

## **5.2 Obtención de las Historias Térmicas.**

Para obtener la historia térmica del sistema de enfriamiento se realizaron una serie de perforaciones en el molde de arena sílica (en dirección perpendicular a la pieza fundida) a profundidades tales que los termopares quedaran cerca de la pieza. Se utilizaron 10 termopares, tipo K (cromel/alumel; 270°C a 1372°C) con calibre de una pulgada de diámetro. Los termopares se conectaron a un adquisidor de datos, National Instruments SCXI-1000 y fueron procesados con el *software* LabView2008. El *software* utilizado para el diseño geométrico fue Unigraphics NX3.

La posición de los termopares se especifica en las imágenes del CAD (Fig. 7 (a) y (b)). Como se puede observar se puso un termopar sobre la interfase, en el metal y otro en el molde, para así tener una representación de la zona de estudio en particular. La ubicación de estos tres termopares nos permitirá ver como se

transfiere la energía en la interfase, que es dónde se forma una burbuja de aire, la cual disminuye notablemente el coeficiente. Por esta característica se busca conocer al detalle esta zona del molde, se podría pretender ubicar más termopares, sin embargo a causa del ancho de los mismos no es posible. También se colocó uno en la copa del molde para registrar la temperatura del primer metal y poder conocer con mayor precisión la temperatura del metal al instante de entrar en el molde. Se colocaron otros termopares sobre la pieza a diferentes longitudes, registrando su enfriamiento. Estos últimos termopares son para tener una clara descripción de la curva de enfriamiento obtenida, es necesario obtener a detalle el cambio de temperaturas durante el enfriamiento.

Los datos obtenidos se contabilizaron hasta llegar a una temperatura de 100 °C a razón de 1 dato por segundo.

### 5.3 Fabricación del molde en CAD.

Para el uso del *software* a utilizar llamado Magma, es necesario tener la geometría en 3D. En esta geometría debe ir incluida la ubicación de los termopares para que el *software* tome en cuenta los llamados puntos de control y pueda realizar los cálculos correctamente y con la mayor precisión respecto al modelo físico.

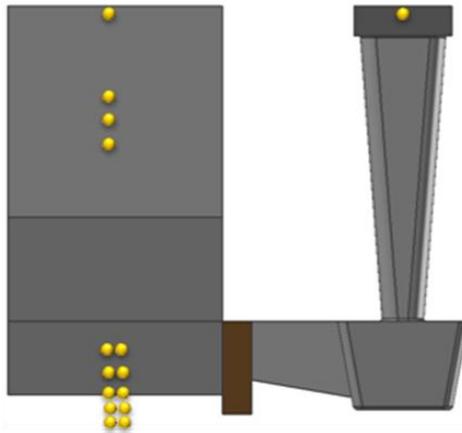


Figura 9. Molde y cuña con la ubicación de los termopares del experimento (puntos amarillos).

#### 5.4 Simulación en Magma.

El metal utilizado fue una aleación A-319. A continuación se presenta la composición estándar de esta aleación.

Tabla 5. Composición química estándar (% en peso) de un Aluminio 319.

	Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Zn	Ti	Ni	Trazas
Estándar	3.0-4.0	0.1	0.5	5.5-6.5	1	1	0.25	0.35	0.5

Se llevó a cabo el siguiente proceso en el que las paqueterías utilizadas generan la solución del método inverso.

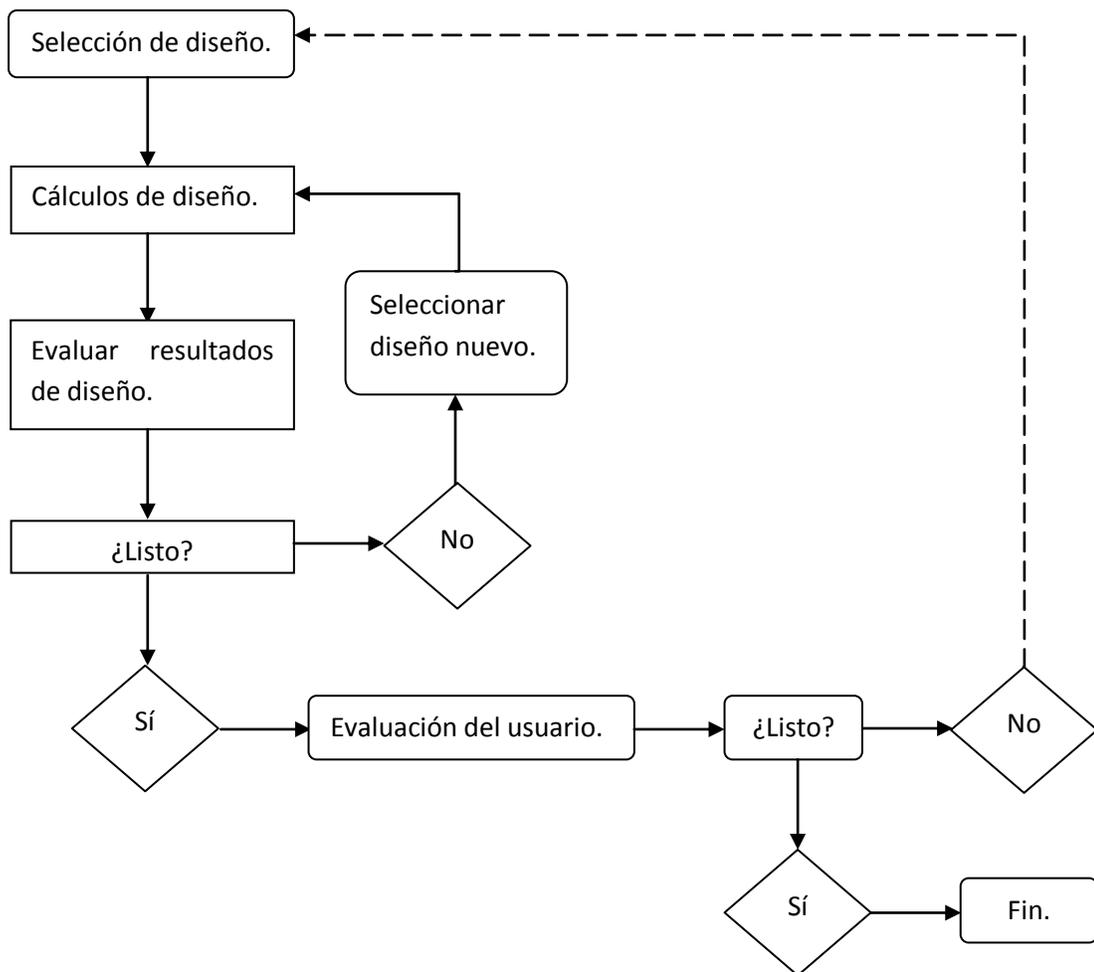


Figura 10. Diagrama de flujo para un proceso de optimización.

Para el uso del *software* es necesario preparar la pieza, esto se lleva a cabo, como se ha mencionado anteriormente, mediante el diseño en CAD. En este caso la figura se realizó en Unigraphics y se verificó en el preprocesador de Magma. Es necesario verificar la unión de las piezas, así como el tamaño de malla, en caso de ser diferente mallado para cada pieza. Todo debe quedar unido en orden que la simulación reconozca cada pieza sin problemas.

Magma resuelve las ecuaciones de conservación utilizando el método de diferencias finitas. Para definir un modelo se deben realizar los pasos siguientes:

1. Definir el problema.
2. Desarrollar la geometría del problema como modelos de CAD (incluyendo los moldes y la pieza).
3. Subir la geometría en el Preprocesador para verificar la unión de todas las piezas y definir volúmenes.
4. Asignar las propiedades del molde mediante el apartado de simulación.
5. Asignar las propiedades del fluido, en el apartado simulación.
6. Marcar la interfase fluido-molde y asignarle condiciones de frontera.
7. Definir condiciones de frontera (enfriamiento por convección natural, entrada de material).
8. Definir las condiciones iniciales.
9. Asignar las condiciones globales del problema.
10. Activar las ecuaciones y modelos a resolver.
11. Fijar las opciones de solución (p.e. tamaño del paso de tiempo, ajustes de convergencia, etc.)

12. Resolver el caso mediante Magma Frontier

13. Analizar los resultados en el Postprocesador.

Tabla 6. Módulos de MAGMA

Nombre del módulo	Descripción
<b>Preprocesador</b>	Se utiliza para fijar las condiciones de la simulación (propiedades de materiales, condiciones de frontera, ecuaciones a resolver). Permite mover la geometría del sistema y alinearla para generar una óptima simulación.
<b>Postprocesador</b>	Presenta las imágenes generadas, vistas y curvas. Permite mover la figura o cortarla y permite ir a otro tipo de resultados, como porosidad y fracción sólida, entre otros.
<b>Frontier</b>	Es el módulo más reciente de Magmasoft, da soluciones mediante método inverso a partir de diferencias finitas.

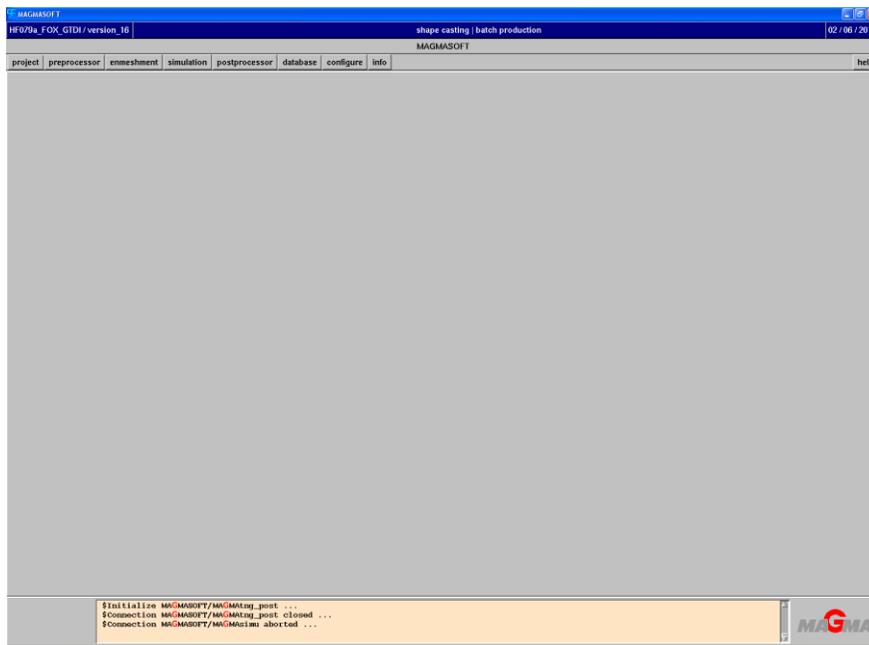


Figura 11. Estructura general de inicio de Magma.

### 5.4.1 Propiedades Termofísicas.

Para la simulación debemos contemplar la composición de la pieza fundida y las propiedades de dicha composición, para determinar las propiedades necesarias como: capacidad calorífica, densidad, módulo de Young y coeficiente de expansión térmica, entre otras, se usó un *software* llamado JMatPro. Las propiedades determinadas son en función de la temperatura por lo que se debe especificar la temperatura de vaciado. Este *software* tiene una gran base de datos de aleaciones de aluminio, se puso la composición de la aleación que se desea simular y exportamos hacia Magma los valores (.txt). En la siguiente figura se muestra la densidad en Magma, los valores del lado izquierdo y del derecho está el gráfico de densidad en función de la temperatura de la aleación.

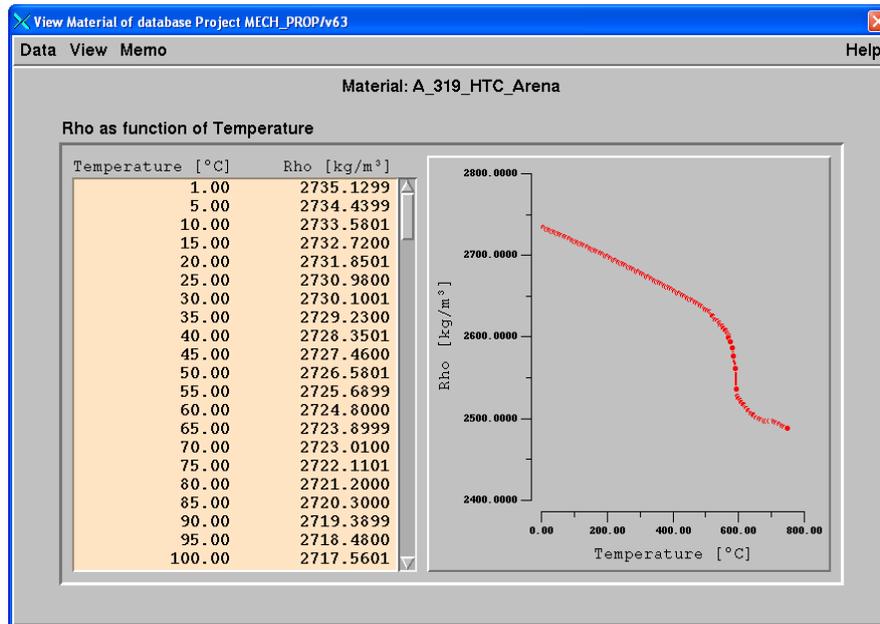


Figura 12. Propiedades en Magma, en este caso la densidad de la aleación 319.

Posteriormente se cargan todos los componentes especificados en la Fig. 7; tales como: colada, filtro, casting (wedge) y molde de arena.

### 5.4.2 Mallado.

A continuación se observan diferentes vistas del preprocesador.

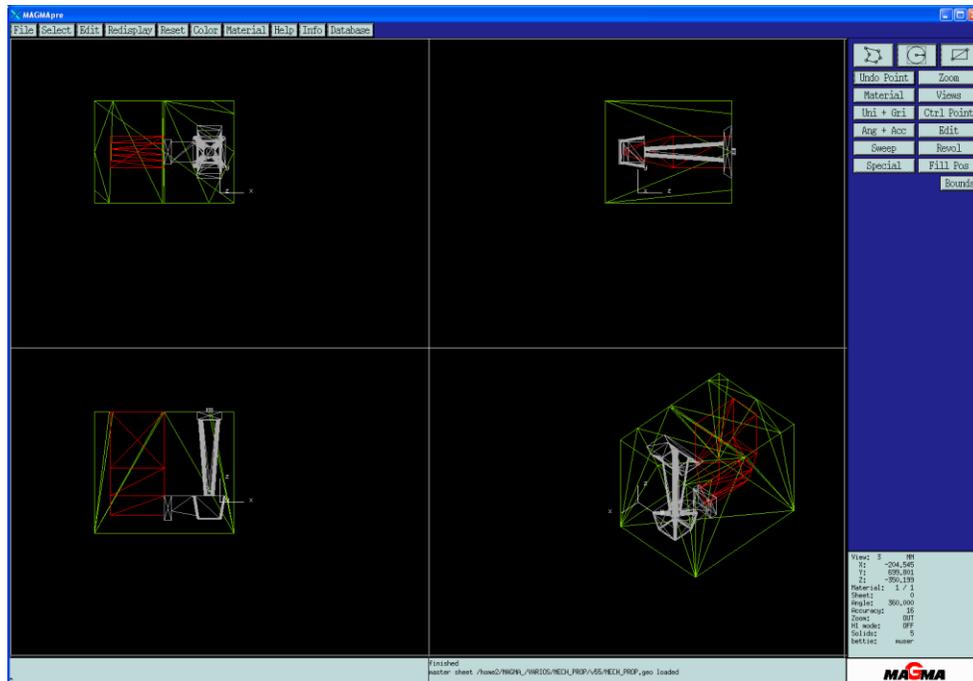
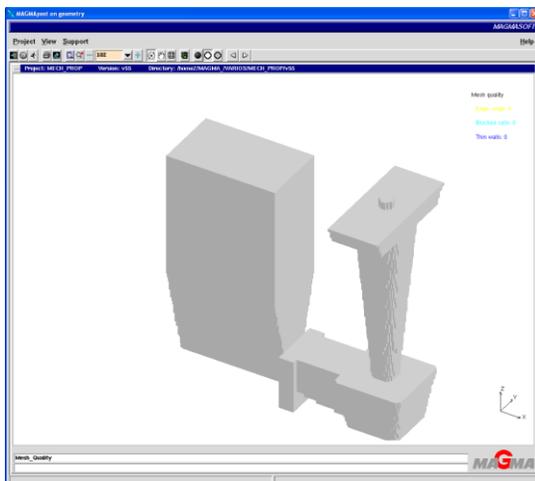
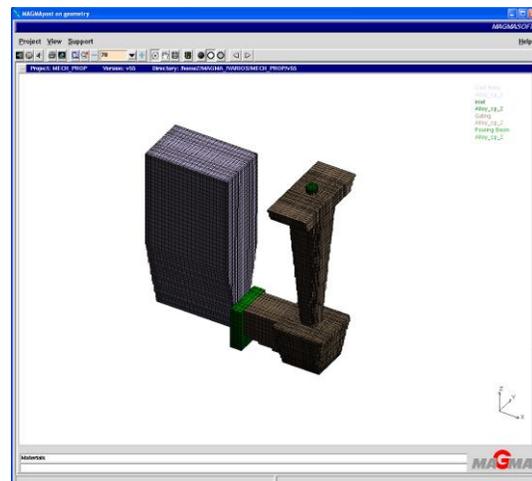


Figura 13. Preprocesador inicial de MAGMA, cuatro vistas: superior, costado, isométrica y de lado.

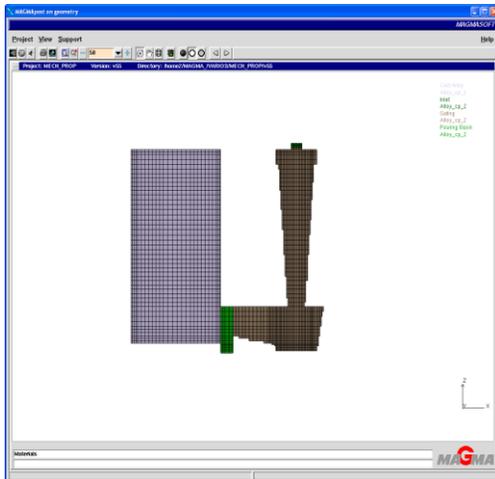
El tamaño de nodo (volumen de control) que se encontró óptimo según un análisis de sensibilidad fue de 404700, de los cuales del metal sólo son 64843.



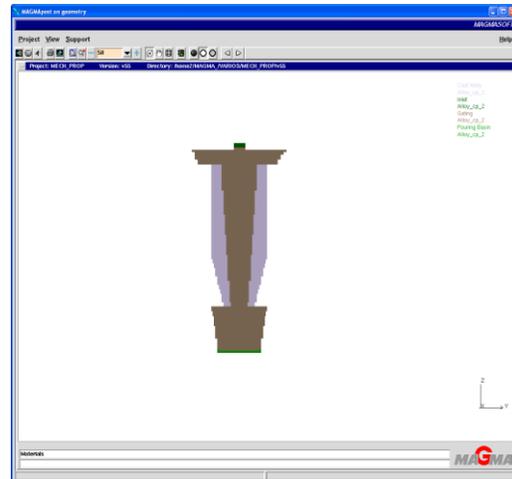
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 14. Diferentes vistas de la pieza: (a) Vista isométrica sin malla. (b) Vista isométrica mallada, (c) Vista de lado mallada, (d) Vista frontal mallada.

### 5.4.3 Módulo Frontier.

Este apartado nos ayudará a determinar los coeficientes de transferencia de energía. El *software* está basado en el método inverso. Esto quiere decir que necesitamos proporcionarle valores de entrada y de salida para que mediante aproximaciones llegue al valor más cercano de coeficiente que proporcione los valores experimentales obtenidos. Como valores de entrada fueron las temperaturas registradas en la experimentación, el tiempo de llenado y la temperatura de vaciado.

Para este apartado, se comienza tomando un coeficiente base del propio *software* o en este caso, uno utilizado actualmente para las simulaciones. Se corre una simulación con dicho coeficiente de transferencia y comparan resultados con los reales (mediante gráficas en Excel). Se espera gran diferencia en los valores de temperatura y esta diferencia deberá ser corregida mediante el módulo. Antes de subir la información a Frontier se corren simulaciones con el coeficiente base,

donde se modifica una sección de este coeficiente y otras modificando una sección del coeficiente, esto con el fin de acercar un poco los resultados. Posteriormente Frontier lo hará automáticamente en un menor tiempo de cálculo y con mayor precisión.

Para la simulación de Frontier se requiere delimitar rangos, uno superior y otro inferior, a partir de los cuales los resultados irán partiendo de un lado hacia otro hasta lograr un mejor acercamiento a los valores reales. El rango de análisis se va modificando simulación tras simulación en función de la correlación con los termopares analizados. Cada una de estas simulaciones arroja 32 diseños, de los cuales sólo sale el mejor y así sucesivamente hasta empalmar la curva simulada de temperaturas con las temperaturas reales.

La última correlación debe ser muy precisa, tal que queden empalmadas las temperaturas reales con las simuladas. En la fig.15 podemos observar un ejemplo de matriz de análisis, donde se determinan los diseños realizados, cada punto representa un diseño siendo los que presentan un mejor comportamiento los de color verde y los azules un comportamiento más alejado del real.

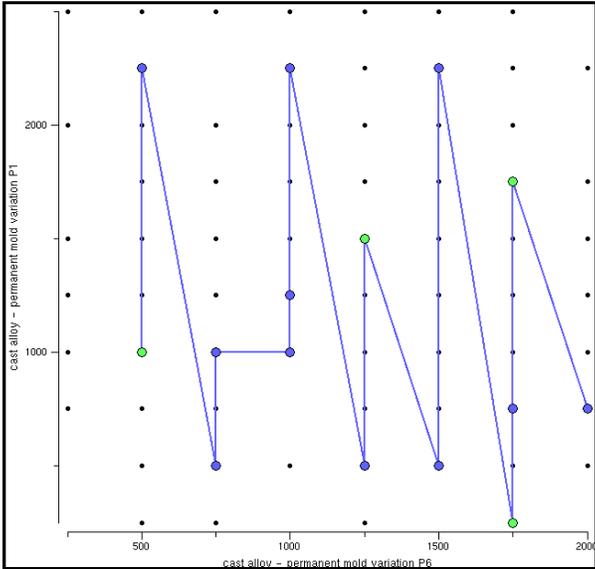


Figura 15. Ejemplo de matriz de análisis del módulo Frontier.

## 6 Resultados y Discusión.

### 6.1 Fabricación del Casting.

Las imágenes a continuación presentadas muestran el molde de arena instrumentado con los termopares. La ubicación del molde en la Fig. 16-a es debajo del horno, previo a la vaciada. Por otro lado la Fig. 16-b muestra el molde de arena vacío e instrumentado. En la Fig. 16-c y Fig.16-d se alcanza a observar el encogimiento del metal en la zona de la pieza resultado del cambio de densidades durante la transformación líquido sólido.



(a)



(b)



(c)



(d)

**Figura 16. Fotografías: (a) Horno de crisol y molde, (b) molde vacío, (c) molde con pieza vaciada de lado, (d) molde con pieza vaciada de frente.**

**Tabla 7. Composición química estándar (% en peso) de la aleación.**

	<b>Cu</b>	<b>Mg</b>	<b>Mn</b>	<b>Si</b>	<b>Fe</b>	<b>Zn</b>	<b>Ti</b>	<b>Ni</b>	<b>Trazas</b>
Estándar	3.0-4.0	0.1	0.5	5.5-6.5	1	1	0.25	0.35	0.5

El casting se pudo obtener con la geometría deseada. Se observa una fractura en el molde de arena durante en enfriamiento (Fig.16-d), debido al cambio de volumen del metal durante la solidificación. El encogimiento del metal puede causar fracturas en la misma pieza o en el molde de arena. Como la zona del metal que está en contacto con el molde es la que menos ha guardado calor es donde suele comenzar la solidificación. Conforme la nucleación se lleva a cabo, empieza el cambio de fase (líquido-sólido) de afuera hacia adentro. La grieta corre de la zona caliente a la fría por lo tanto se supone el proceso de nucleación pudo haber afectado, sin embargo la causa fue la expansión térmica de la arena durante el enfriamiento.

Se sabe que durante la solidificación del aluminio se generan varias reacciones exotérmicas con lo que se desprende gran cantidad de calor. Estas reacciones son causantes de las zonas de lento enfriamiento en la curva T vs. tiempo, al igual que el encogimiento de la pieza fundida Fig. 16-d ya que es la última zona en solidificar, esto a su vez puede generar otros defectos de fundición como es la porosidad, como se puede apreciar en las figuras 16-c y 16-d. Probablemente la pieza saldrá con fallas mecánicas, dada la presencia de porosidad. Esto sólo lo podríamos comprobar con pruebas adicionales a la pieza fundida, lo cual no es objetivo del presente trabajo.

La Fig.16 nos muestra el llenado del molde así como su enfriamiento. Para obtener esa simulación se ocupó el tiempo y el área experimental del llenado que fue de 42 segundos y 1700 cm<sup>2</sup> aproximadamente, y así determinar la velocidad de llenado, los resultados experimentales muestran algunas diferencias

significativas con los resultados de la simulación, por lo que aún se debió optimizar el modelo.

## 6.2 Obtención de las Historias Térmicas.

Para determinar estas historias térmicas se hizo la experimentación. De dicha experimentación se obtuvieron parámetros que posteriormente se utilizaron para la simulación, como: temperatura de vaciado, temperatura ambiente, tiempo de llenado, número de termopares y velocidad de llenado.

A continuación se presenta las curvas de enfriamiento obtenidas de todos los termopares. Como puede observarse el termopar 1 y 2 que son los que estuvieron al nivel del piso, detectaron un mínimo incremento de temperatura, los demás presentan un incremento de temperatura, ya fuese en mayor o menor proporción.

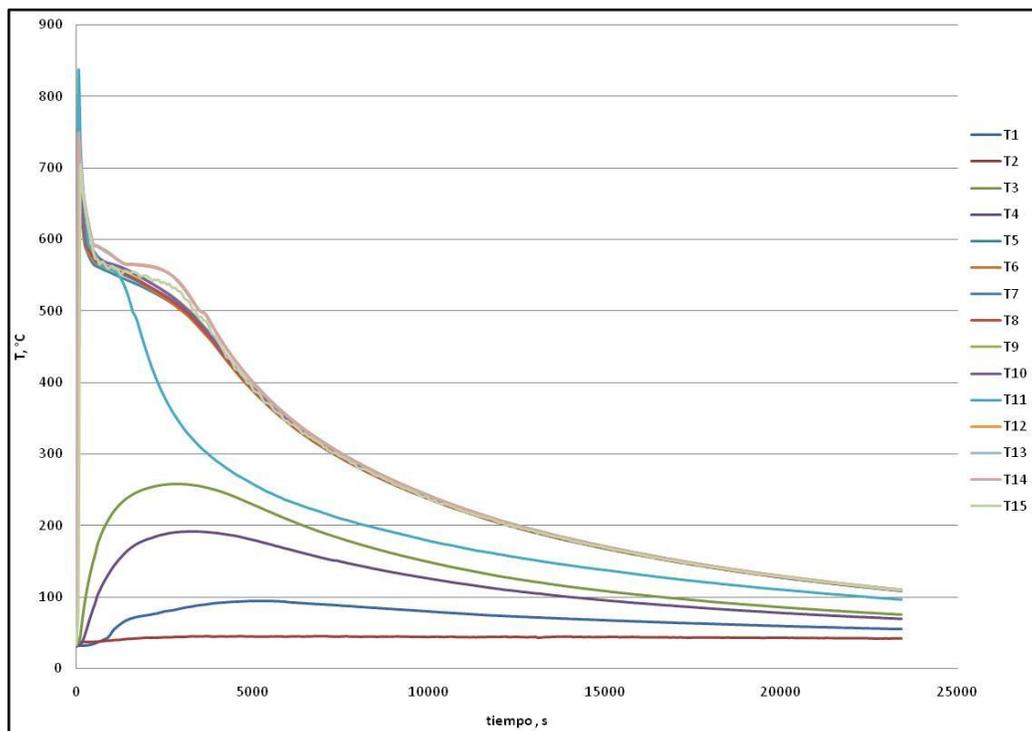
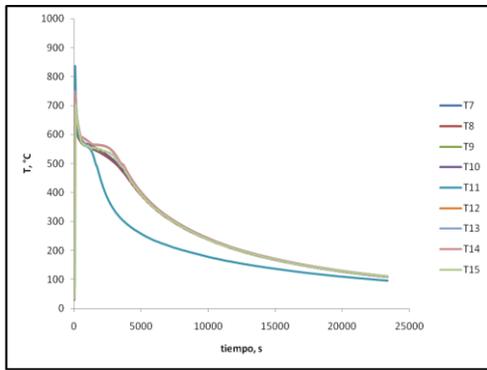
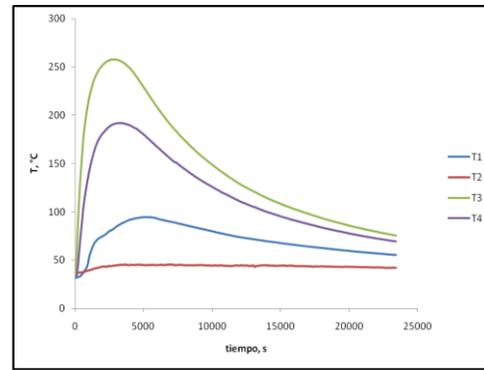


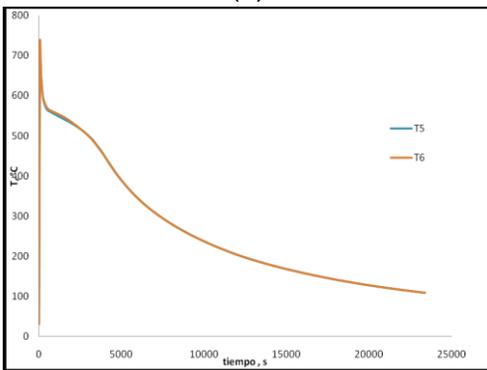
Figura 17. Curva de enfriamiento, T (°C) vs. Tiempo (s) para un Aluminio 319 en molde de arena.



(a)

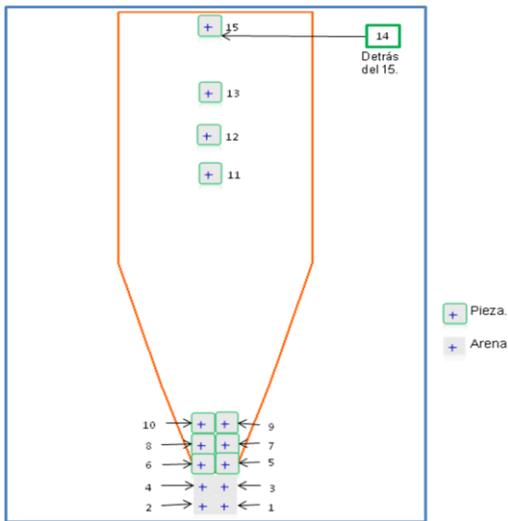


(b)

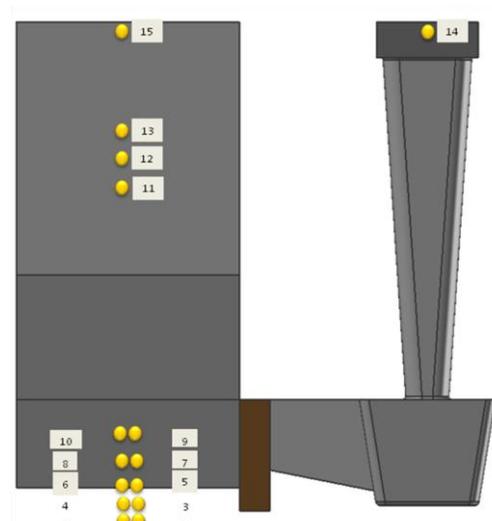


(c)

Figura 18. (a) Gráfico de los termopares cercanos a la interfase, (b) Gráfico de los termopares en la arena; y (c) Gráfico de los termopares en la pieza.



(a)



(b)

Figura 19. Ubicación de los termopares: (a) Vista frontal, (b) Vista lateral.

En la Fig. 17 vemos las historias térmicas de los 15 termopares. Es visible una falla en el termopar número 2, ya que no presenta aumento alguno en la temperatura lo que nos indica que no registro correctamente la lectura, su temperatura debió haber incrementado como el termopar 1 por la ubicación.

*Termopares ubicados en la pieza:* se observa como la serie de termopares del 7 al 15 alcanzan los valores máximos de temperatura, esto es de esperarse pues se encuentran dentro de la pieza fundida y en contacto con una gran masa de metal líquido (siendo ésta la última en solidificar) lo que permite conservar la mayor energía, elevando su temperatura en comparación con los demás termopares. Durante el enfriamiento se observa una meseta entre 500°C y 600°C, lo cual muestra la liberación del calor latente de solidificación. Las fluctuaciones presentes en alguno de estos termopares son debido a los precipitados de cada fase sólida como:  $\alpha$ -Al.

El termopar más alejado del aire es el 11, ubicado en la parte central de la pieza por lo que debiera ser de los últimos en solidificar. Sin embargo presenta una pendiente de enfriamiento pronunciada, este comportamiento podría deberse al calor latente, ya que se encuentra entre los termopares cercanos a la interfase y los termopares próximos a la superficie, también su abrupto enfriamiento pudiese deberse a un aumento en el coeficiente de transferencia en la primera hora y media del experimento, como puede observarse en la Fig.17.

Los siguientes termopares ubicados en la pieza fundida son los que van del 9 al 13, podemos observar su comportamiento en la Fig. 18 (c). Todos presentan el mismo perfil de enfriamiento por estar rodeados en una mayor cantidad de masa, enfriando por conducción, lo que hará que tarden más en equilibrar su temperatura. Los termopares 14 y 15 también están en una zona donde hay una

mayor masa de metal, sin embargo su ubicación es cercana al aire lo que puede ayudar a agilizar el enfriamiento. A pesar de estas circunstancias presentan el mismo enfriamiento que los demás termopares, pero sus lecturas presentan mucho ruido, lo que nos lleva a suponer que pueden existir errores en las lecturas de ambos termopares.

Los termopares del 7 al 8 están en la zona más angosta de la pieza por lo tanto se espera un enfriamiento más rápido. En la Fig.18 (c) vemos estos termopares y son los primeros en enfriar de todos los demás termopares ubicados en la pieza, con excepción del 11 cuyo comportamiento se analizó anteriormente.

*Termopares ubicados en la interfase metal molde:* Los termopares 5 y 6 por su ubicación son los que enfrían rápido, están exactamente en la interfase (Fig. 18 (a)) y es dónde se presupone una mayor transferencia de energía. Sin embargo este comportamiento es durante los primeros momentos, posteriormente las curvas de estos termopares se empatan con el enfriamiento en los termopares ubicados en la pieza. Este cambio de rapidez de enfriamiento puede deberse a una disminución en el coeficiente de transferencia causada, según otras investigaciones [8], a la presencia de una capa aislante de aire.

*Termopares ubicados dentro del molde de arena:* La otra serie de termopares del 4 al 1 presentan un perfil de temperaturas más bajo esto se esperaba porque se ubican en el molde de arena. Presentan un enfriamiento bastante homogéneo, mostrando el carácter aislante de la arena sílica, su temperatura desde un inicio no aumenta a más de 300°C como podemos ver en la Fig. 18 (b).

### **6.3 Simulación en Magma.**

Para la correlación se analizaron tres termopares del total de 15 colocados en la pieza. Como referencia se tomaron los termopares, 4 (ubicado en el molde), 5

(ubicado en la interfase) y 8 (ubicado en la pieza vaciada). Se eligieron dichos termopares para obtener una respuesta representativa del sistema. Los datos de estos termopares fueron comparados con los simulados en cada corrida. Dependiendo de estos resultados se determinaban los siguientes parámetros a modificar en el coeficiente.

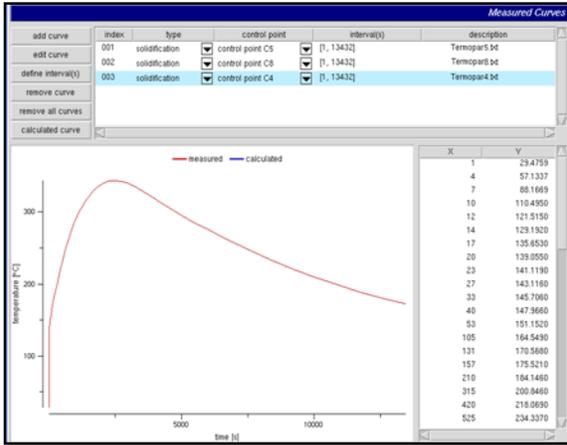
El termopar en contacto con el metal líquido fue el 8 y éste nos indica el aumento de temperatura en la pieza, cómo cambia el aluminio durante el cambio de fase y nos da cuenta de cómo la temperatura se mantiene al cambiar de líquido a sólido.

### **6.3.1 Módulo Frontier.**

El módulo Frontier de Magmasoft es el que lleva a cabo el cálculo utilizando el método inverso para la determinación del coeficiente. Esto se logra por medio de modelos matemáticos, como la suma de Riemann y la secuencia de Sobol.

#### **6.3.1.1 Curvas de Enfriamiento.**

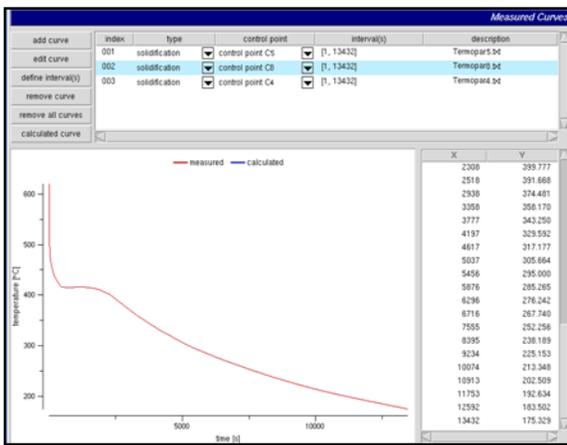
En la Fig. 20 se presentan las curvas de enfriamiento de los termopares de referencia según los datos experimentales introducidos al *software*, esto es los termopares 4, 5 y 8, las cuales servirán para validar los resultados experimentales.



(a)



(b)



(c)

**Figura 20. (a) Curva termopar 4 (ubicación arena); (b) Curva termopar 5 (ubicación interfase); (c) Curva termopar 8 (ubicación metal vaciado).**

El termopar en la pieza vaciada tiene un enfriamiento lento, mientras que el termopar en la arena un enfriamiento más rápido. El termopar en la interfase presenta un comportamiento intermedio.

### 6.3.1.2 Diseño del Experimento (Design of Experiment).

Name	Lower Limit	Upper Limit	Step
cast alloy - permanent mold variation P1 (constant)	1500	1500	0
cast alloy - permanent mold variation P2 (constant)	1501	1501	0
cast alloy - permanent mold variation P3	1500	4000	250
cast alloy - permanent mold variation P4	3000	9000	250
cast alloy - permanent mold variation P5	1500	4000	250
cast alloy - permanent mold variation P6	1500	4000	250
cast alloy - permanent mold variation P7	500	1500	100

**Figura 21. Variables de diseño.**

El número de variables se refiere al número de secciones en las que el *software* dividirá el coeficiente para generar una mejor aproximación. El número de variables de diseño utilizadas fueron 7, dos de éstas permanecieron constantes ya que presentaron poco variación después de un análisis de sensibilidad. En la Fig.21. se observa que los HTC P1 y P2 permanecieron constantes, mientras que los restantes fueron cambiando en diferentes rangos respecto a las temperaturas. El incremento de cada rango fue de 250 W/m<sup>2</sup>K en el caso de P3, P4, P5 y P6; en el caso de P7 el incremento fue de 100 W/m<sup>2</sup>K en un rango de 500 W/m<sup>2</sup>K a 1500 W/m<sup>2</sup>K.

Se usa un delta Riemann con el objetivo de definir el coeficiente de transferencia de calor que irá disminuyendo la distancia entre las curvas reales y aquellas arrojadas durante la simulación, hasta que sean prácticamente iguales y se obtenga la correlación esperada.

ID	cast alloy - permanent mold variation P1	cast alloy - permanent mold variation P2	cast alloy - permanent mold variation P3	cast alloy - permanent mold variation P4	cast alloy - permanent mold variation P5	cast alloy - permanent mold variation P6	cast alloy - permanent mold variation P7
0	1500	1501	2750	6000	2750	2750	1000
1	1500	1501	2250	4500	3500	3500	1300
2	1500	1501	3500	7500	2250	2250	800
3	1500	1501	1750	6750	1750	3750	600
4	1500	1501	3000	3750	3000	2500	1100
5	1500	1501	2500	8250	3750	1750	1400
6	1500	1501	3750	5250	2500	3000	900
7	1500	1501	3250	6500	3250	2000	700
8	1500	1501	2000	3500	2000	3250	1200
9	1500	1501	3750	8000	2500	3750	1400
10	1500	1501	2500	5000	3750	2500	900
11	1500	1501	3000	4250	3000	3500	600
12	1500	1501	1750	7250	1750	2250	1100
13	1500	1501	3500	5750	2250	1750	1300
14	1500	1501	2250	8750	3500	3000	800
15	1500	1501	2500	8000	1750	2750	900

**Figura 22. Diseños de experimentos respecto a los coeficientes utilizados.**

El tipo de diseño utilizado para la primera aproximación fue por medio de Secuencias de Sobol, obteniendo como resultado 16 diferentes diseños. En este diseño se utilizó un Algoritmo Genético Multi Objetivos (MOGA, por sus siglas en inglés) que posteriormente resultó en 48 diferentes diseños.

El número de diseños va en función del modelo matemático usado y las variables que éste involucra. En esta experimentación se sabe que tenemos siete variables HTC, de los cuales dos se tomaron constantes.

En la Fig.22 podemos observar que algunos valores de los HTC variables que se introdujeron en la simulación, para determinar en específico uno.

En la Fig.23 están los resultados de los termopares de referencia determinados a partir de los 48 diferentes diseños de experimentos. Se utilizan las siete variables declaradas con anterioridad.

ID	cast alloy - permanent mold variation P1	cast alloy - permanent	T5	T8	T4					
31	1500	1501	4000	3000	1500	1500	1500	21169.44	27777.01	117802
30	1500	1501	3750	3500	1500	1500	1400	21873.95	25973.07	120894.9
34	1500	1501	2500	3000	1750	3500	1200	22717.82	24860.45	120026.7
35	1500	1501	3000	3750	1750	3500	600	23737.56	23431.57	125503.6
8	1500	1501	2000	3500	2000	3250	1200	24103.78	23253.43	123284.2
29	1500	1501	2000	3500	2000	3250	1200	24103.78	23253.43	123284.2
46	1500	1501	2750	3750	2250	2750	900	24342.93	22684.43	126990
21	1500	1501	3250	4000	2000	1500	1300	24710.14	22863.39	128010.1
40	1500	1501	2750	3500	2250	3000	1100	24949.69	22730.09	127135
19	1500	1501	4000	4000	1750	3250	700	25178.9	22821.9	129821.8
41	1500	1501	2750	3750	2250	3000	1000	25405.71	22401.21	128602.4
36	1500	1501	2500	5000	1750	3500	600	25683.98	21702.7	130941.2
47	1500	1501	2500	5000	1750	3500	600	25683.98	21702.7	130941.2
33	1500	1501	2500	5000	1750	3500	900	25688.86	21700.85	130951.9
43	1500	1501	3000	3000	3500	3750	500	26358.1	21940.02	130818.7
45	1500	1501	1500	3000	3500	3500	1300	26545.53	22130.25	124859.4
22	1500	1501	3000	3750	3000	2500	600	26932.58	21774.99	132661.3
4	1500	1501	3000	3750	3000	2500	1100	26945.93	21770.09	132690.7
11	1500	1501	3000	4250	3000	3500	600	27324.1	21310.61	134845.7
18	1500	1501	1500	7000	1500	2500	700	27428.91	20463.57	133014.3
23	1500	1501	2750	7000	1500	2500	1100	27435.68	20790.98	137091.5
6	1500	1501	3750	5250	2500	3000	900	27886.29	21219.61	138191.6
39	1500	1501	2250	4500	3250	3000	1100	27918.87	20937.2	134499.6
12	1500	1501	1750	7250	1750	2250	1100	28169.03	20266.67	135855.8
27	1500	1501	2500	4250	3500	1750	1400	28175.68	21167.33	134903.7
13	1500	1501	3500	5750	2250	1750	1300	28238.55	21285.03	138331.8
16	1500	1501	1500	6750	1750	2750	900	28253.46	20423.73	134026.3
28	1500	1501	2750	5750	2500	3000	1000	28358.26	20795.43	138013.2
3	1500	1501	1750	6750	1750	3750	600	28450.83	20420.88	135794.3
1	1500	1501	2250	4500	3500	3500	1300	28574.8	20794.79	135775.6
17	1500	1501	2250	4500	3500	3500	1300	28574.8	20794.79	135775.6
24	1500	1501	2500	7000	1750	3500	1200	28660.96	20576.26	138918.3
37	1500	1501	2250	4000	4000	1750	1500	28731.21	21048.62	134824.5
25	1500	1501	2750	5250	3250	3000	1100	29021.32	20711.39	138967.7
0	1500	1501	2750	6000	2750	2750	1000	29051.22	20630.96	139653.5
10	1500	1501	2500	5000	3750	2500	900	29299.65	20617.11	138618.5
20	1500	1501	4000	8000	1750	3250	700	29485.18	20584.5	144085.2
38	1500	1501	2750	6000	2750	2000	1100	29516.98	20808.97	139948.6
2	1500	1501	3500	7500	2250	2250	800	29555.23	20570.62	143153.9
15	1500	1501	2500	8000	1750	2750	900	29616.68	20355.31	141413.7
44	1500	1501	2500	5000	3750	3750	500	29769.36	20572.04	139493.1
9	1500	1501	3750	8000	2500	3750	1400	30822.75	20411.17	146656.4
7	1500	1501	3250	6500	3250	2000	700	30973.45	20781.74	144286.4
42	1500	1501	3000	6500	3250	2000	1500	30983.68	20697.66	143808.9
26	1500	1501	1750	7250	2750	1500	1100	31090.41	20177.84	140125.9
32	1500	1501	2250	7250	3250	2750	900	31453.65	20118.65	143630.4
5	1500	1501	2500	8250	3750	1750	1400	33459.48	20395.25	148026.7
14	1500	1501	2250	8750	3500	3000	800	33534.39	20047.89	147949.5

Figura 23. Datos obtenidos de los diferentes coeficientes.

El experimento que resultó concordar más con los valores reales fue el 33. A partir del experimento 33 se realizaron las siguientes curvas, obteniendo una buena correlación.

<i>Sensitivity Analysis</i>			
design variables	T5	T6	T4
cast alloy - permanent mold variation P1 (constant)			
cast alloy - permanent mold variation P2 (constant)			
cast alloy - permanent mold variation P3	90%	95%	36%
cast alloy - permanent mold variation P4	100%	100%	100%
cast alloy - permanent mold variation P5	100%	98%	99%
cast alloy - permanent mold variation P6	46%	26%	43%
cast alloy - permanent mold variation P7	51%	82%	71%

**Figura 24. Tabla de porcentajes de correlación de cada termopar.**

### 6.3.1.3 Correlación.

Después de determinarse que el experimento 33 es la mejor aproximación, con ese HTC se confrontan con los resultados experimentales. En la Fig. 25 vemos que el termopar 4 queda con una muy buena aproximación respecto al experimental. La línea verde es la experimental, mientras que la azul es la determinada con los datos del diseño de experimento 33.

La Fig. 26 y Fig.27 corresponden al termopar 5 y 8 respectivamente. La curva roja corresponde a los datos experimentales y la azul a los simulados, con el HTC del diseño de experimento 33.

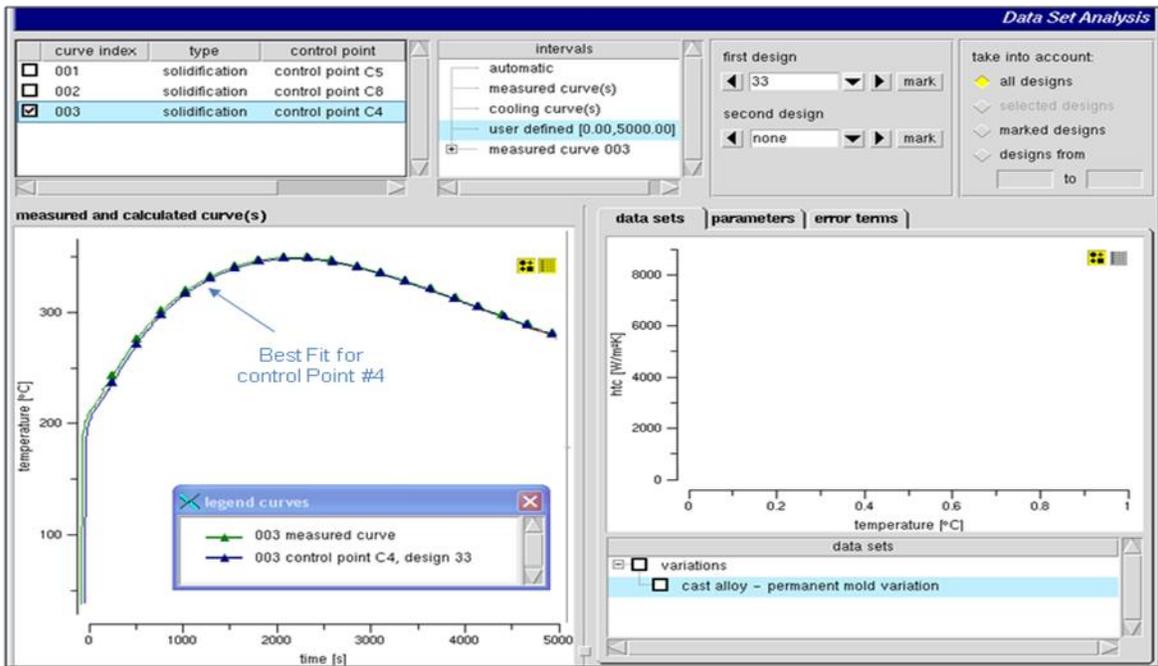


Figura 25. Comparativo termopar 4.

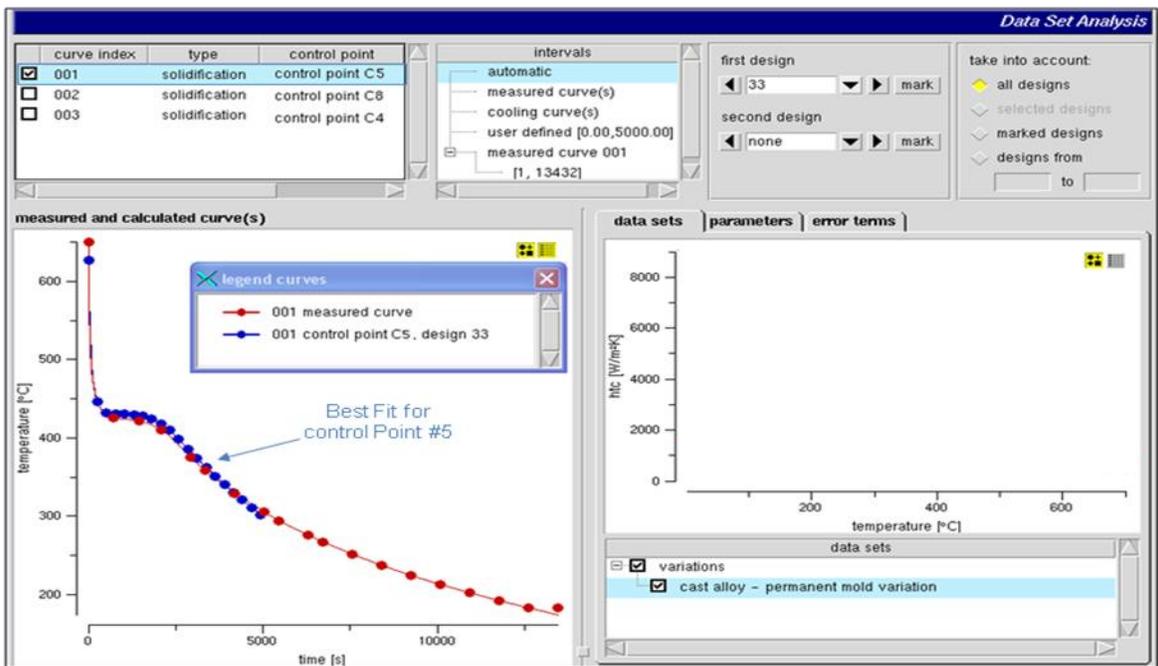


Figura 26. Comparativo termopar 5.

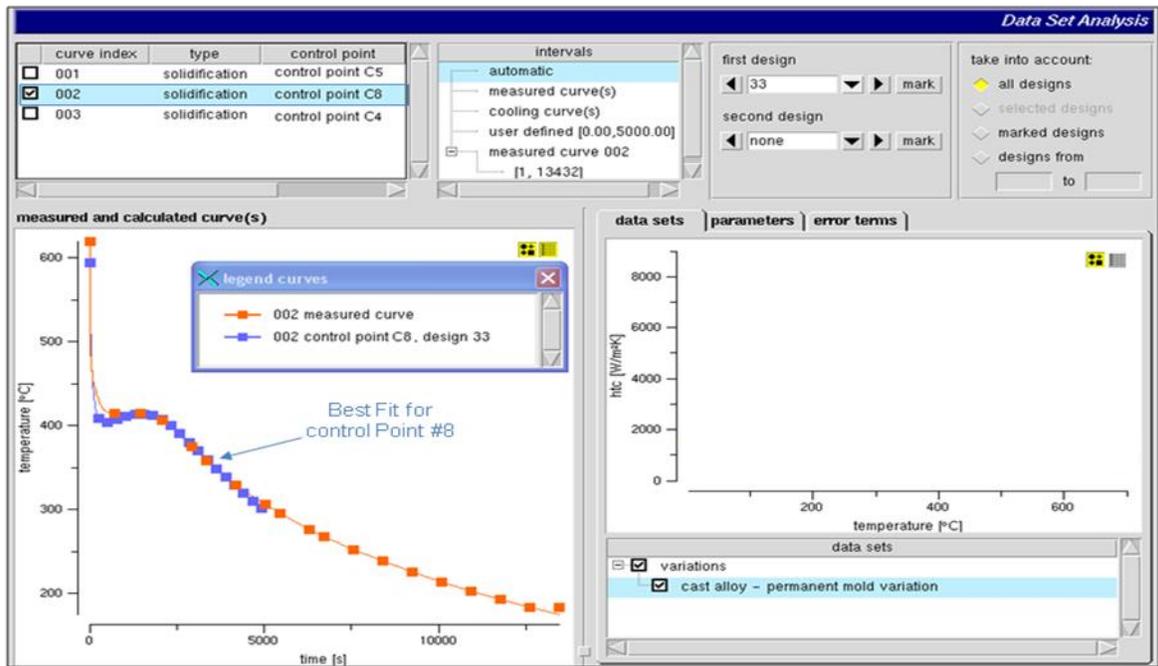


Figura 27. Comparativo termopar 8.

Como podemos ver se logró que las curvas de enfriamiento experimentales y las simuladas con MagmaFrontier tuvieran una muy buena correlación. De esta forma se obtuvo el HTC que será útil en simulaciones donde se aplique Al 319 con arena sílica.

Por razones de confidencialidad el valor de HTC no se presenta en esta trabajo, sin embargo es importante señalar que su comportamiento corresponde con la velocidad de enfriamiento observada experimentalmente; presenta una zona inicial con valores constantes desde temperatura ambiente hasta una temperatura aproximada de 500°C ( $T_E = 525$  °C), lo cual se observa en la curva de enfriamiento que presentan una velocidad de enfriamiento constante. Posteriormente el coeficiente aumenta hasta 600 °C, hasta llegar a un punto máximo cercano a 5000 W/m<sup>2</sup>K, disminuyendo hasta adoptar un valor cercano al de un inicio. Finalmente presenta otro aumento, el cual llega a valores aproximados de 3000 W/m<sup>2</sup>K a

temperaturas cercanas a las de fusión, donde se observa la mayor rapidez de enfriamiento en los termopares.

En los primeros momentos el coeficiente está gobernado por la cinética de solidificación, conservando un valor constante y posteriormente la conductividad térmica del sólido. La transferencia de calor se incrementa conforme la nucleación se lleva a cabo en la interfase sólido-líquido y este incremento del coeficiente se debe al proceso de solidificación existiendo mayor transferencia entre la masa del propio metal solidificado, decreciendo conforme solidifica el eutéctico Al-Si, presentando una liberación de calor latente de transformación. Estos resultados concuerdan con trabajos presentados en otra aleación 319 modificada, en el trabajo reportado por Velasco E. et al [17], donde concluyen que el coeficiente exhibe un incremento característico de la reacción correspondiente a la formación del eutéctico de aluminio y silicio, en nuestro caso  $T_E = 525$  °C. En este momento puede suponerse una modificación en la superficie de la interfase ya que se presenta cierta contracción en las secciones solidificada generando una capa de menor conductividad térmica (comúnmente llamada capa aislante o air gap). La formación de esta capa se debe a la contracción del sólido durante la solidificación, incrementando el carácter aislante y por ende disminuyendo el coeficiente [11, 18] Por otro lado ciertamente puede influir la presencia de Si disminuyendo la conductividad del Al por los precipitados formados. Los mayores valores del coeficiente se presentan cuando ocurre la formación de los primeros cristales solidificados y disminuye con la formación del eutéctico [19].

De los resultados obtenidos podemos observar que el coeficiente en la interfase depende de la cinética de solidificación, puesto que su valor se mantiene constante mientras la aleación se encuentra líquida, incrementando su valor tan pronto las dendritas de aluminio primario empiezan a crecer, reduciéndose al

momento de llevarse a cabo la transformación eutéctica, para finalmente tener un valor constante durante el enfriamiento de la fase líquida [20].

La reducción del coeficiente ha sido atribuida, en varios artículos, a la formación de la capa aislante a raíz del cambio de contacto entre el metal y el molde [15, 16]. La literatura nos muestra que esta es una etapa controlante en el proceso de solidificación, sin embargo también debemos contemplar las aportaciones de las superficies en contacto, las geometrías involucradas, la expansión térmica que puede sufrir el molde (comprometiendo el contacto), así como el comportamiento térmico del molde, como lo es el primer calentamiento al recibir el metal y el posterior enfriamiento [18].

## **7 Conclusiones.**

### **7.1 Conclusión General**

- Se determinó el coeficiente de transferencia de calor durante el proceso de solidificación entre la arena sílica y el Aluminio 319.

### **7.2 Conclusiones Específicas**

- Se construyó satisfactoriamente un prototipo instrumentado, donde se realizó el vaciado del casting.
- La geometría utilizada en el molde de arena hacen que la pieza presente una gran contracción en la parte superior debido al cambio de densidad sólido-líquido.
- Los termopares cercanos a la interfase metal-molde son los que se enfrían más rápido, debido a que se encuentran en una zona donde existen pérdidas de calor por conducción y por convección, además de tener inicialmente la diferencia de temperaturas más grande. Mientras que los termopares que se encuentran en centro geométrico de la pieza presentan el enfriamiento más lento debido a que están en contacto con una gran masa de metal y su enfriamiento es principalmente por convección del metal líquido y posteriormente por conducción.
- Se determinó el HTC y se encontró que es función de la temperatura debido a los fenómenos de recalcancia y los fenómenos que ocurren durante el proceso de solidificación que se presentan durante el proceso de solidificación.
- La validación del HTC del perfil de temperatura obtenido con el modulo Frontier y los resultados experimentales, son aceptables.

- El HTC obtenido es de gran utilidad ya que podrá utilizarse para posteriores simulaciones Aluminio 319- Arena sílica dentro de la base de datos de Nemak y así tener un mejor control del proceso dentro de planta.

## 8 Bibliografía

- [1] Handbook of Aluminum, Volume 1. Physical Metallurgy and Processes, Marcel Dekker AG, N.Y., USA, 2003.
- [2] Lenntech Agua residual & purificación del aire Holding B.V., 1998-2009, Tabla Periódica. Página visitada 19 mayo 2010; <http://www.lenntech.es/periodica/tabla-periodica.htm>
- [3] ASM Handbook; Vol. 2, Vol. 4, Vol. 15 and Vol. 20; ASM International; 9th Edition. December, 1997.
- [4] Marisa Di Sabatino and Lars Arnberg, Castability of Aluminium Alloys, Transactions of The Indian Institute of Metals, Vol. 62, Issues 4-5, August-October (2009).
- [5] Davies Geoff, Materials for Automobile Bodies, First Edition, Elsevier Ltd., Great Britain, 2003.
- [6] D.R. Poirier, G.H. Geiger. Transport Phenomena in Materials Processing. TMS 1994.
- [7] Joy A. Hines, Determination of Interfacial Heat-Transfer Boundary Conditions in an Aluminum Low-Pressure Permanent Mold Test Casting, Metallurgical and Materials Transactions B Volume 35b, pp. 299-311, (2000).

[8] MAGMA Documentation, User Manual, MAGMAsoft is registered trademark of MAGMA Giessereitechnologie GmbH, Aachen, Germany. Aluminum

[9] Bird R.B., Steward W.E. and Lightfoot E.N., Fenómenos de Transporte, Ed. Reverté, México, 2006.

[10] Ho, K. and Pehlke, R.D., Metal-Mold Interfacial Heat Transfer, Metallurgical Transactions B, Volume 16B, (1985).

[11] Beck J.V., Litkouhi B. and St. Clair C.R., Efficient Sequential Solution of the Nonlinear Inverse Heat Conduction Problem, Numerical Heat Transfer, Vol. 5, (1982).

[12] Zhi-Peng Guo, Shou-Mei Xiong, Bai-Cheng Liu, Mei Li, and John Allison, Effect of Process Parameters, Casting Thickness, and Alloy on the Interfacial Heat Transfer Coefficient in the High-Pressure Die-Casting Process, Volume 39A, Metallurgical and Materials Transactions, (2008).

[13] S. Bounds, G. Moran, K. Pericleous, M. Cross, and T.N. Croft, A Computational Model for Defect Prediction in Shape Castings Based on the Interaction of Free Surface Flow, Heat Transfer, and Solidification Phenomena, Metallurgical and Materials Transactions B Volume 31B, (2000).

[14] Tarantola Albert, Inverse Problem Theory and Methods for Model Parameter Estimation, SIAM, Society for Industrial and Applied Mathematics Philadelphia, Paris, France, 2005.

- [15] V. A. Kudinov And E. V. Stefanyuk, Heat Conduction and Heat Transfer in Technological Processes Analytical Solution Method for Heat Conduction Problems Based on the Introduction Of The Temperature Perturbation Front And Additional Boundary Conditions, Journal of Engineering Physics and Thermophysics, Vol. 82, No. 3, (2009).
- [16] Basil Coates and Stavros A. Argyropoulos, The Effects of Surface Roughness and Metal Temperature on the Heat-Transfer Coefficient at the Metal Mold Interface, Metallurgical and Materials Transactions B Volume 38B, (2007).
- [17] E. Velasco, J. Talamantes, S. Cano, S. Valtierra, J. F. Mojica, And R. Colás, Casting-Chill Interface Heat Transfer during Solidification of an Aluminum Alloy, Metallurgical Transactions B, Volume 30B, (1999).
- [18] Santos C. A., Quaresma J.M.V. and García A., Determination of transient interfacial heat transfer coefficients in chill mold castings, Journal of Alloys and Compounds, (2001).
- [19] Georgiev, G. and Ivanov, G., New Interactive And Automatic Optimization Procedures Offered Of The Recent Foundry Simulation Software, Institute of Metal Science, BAS, Sofia, Bulgaria,
- [20] R. Rajaraman and Æ R. Velraj, Comparison Of Interfacial Heat Transfer Coefficient Estimated By Two Different Techniques During Solidification Of Cylindrical Aluminum Alloy Casting (2006), Springer-Verlag 2007, Heat Mass Transfer (2008).

[21] C.P. Hallam and W.D. Griffiths, *A Model of the Interfacial Heat-Transfer Coefficient for the Aluminum Gravity Die-Casting Process*, Metallurgical and Materials Transactions B Volume 35b, August (2004).

[22] Ramesh K. Nayak and Suresh Sundarraj, *Selection of Initial Mold–Metal Interface Heat Transfer Coefficient Values In Casting Simulations—A Sensitivity Analysis*, Metallurgical and Materials Transactions B Volume 41b, (2010).

[23] Robert Vertnik, Janez Perko, Boidar Sarler, *Solution of Temperature Field in DC Cast Aluminium Alloy Billet by The Diffuse Approximate Method*, Materiali In Tehnologije 38, (2004).

[24] Tarantola, Albert. *Inverse Problem*. From MathWorld--A Wolfram Web Resource, created by Eric W. Weisstein. Página visitada 18 mayo 2010; <http://mathworld.wolfram.com/InverseProblem.html>

[25] Campbell John, *Castings*, Second Edition, Butterworth Heinemann, Great Britain, 2003.

## Lista de Figuras

FIGURA 1. ANÁLISIS Y DISEÑO DE LOS PROCESOS DESARROLLADOS EN CAE [6].....	11
FIGURA 2. CURVA TÍPICA DE ENFRIAMIENTO PARA UN METAL PURO. ....	14
FIGURA 3. GENERACIÓN DE MALLA (VOLUMEN DE CONTROL), EN UN CASO DE TRANSFERENCIA DE ENERGÍA. .....	25
FIGURA 4. DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL ALGORITMO INVERSO DE TRANSFERENCIA DE CALOR [16]. ....	26
FIGURA 5. PROCESO TÍPICO DE SOLUCIÓN MEDIANTE ELEMENTO FINITO [3]. ....	27
FIGURA 6. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LA INTERFASE METAL-MOLDE DURANTE LA SOLIDIFICACIÓN [6].....	28
FIGURA 7. (A) VISTA ISOMÉTRICA DEL MOLDE. (B) VISTA ISOMÉTRICA DE LA CUÑA. ....	30
FIGURA 8. PIEZA FUNDIDA PARA EL ANÁLISIS TÉRMICO. ....	31
FIGURA 9. MOLDE Y CUÑA CON LA UBICACIÓN DE LOS TERMOPARES DEL EXPERIMENTO (PUNTOS AMARILLOS). ....	32
FIGURA 10. DIAGRAMA DE FLUJO PARA UN PROCESO DE OPTIMIZACIÓN. ....	33
FIGURA 11. ESTRUCTURA GENERAL DE INICIO DE MAGMA. ....	35
FIGURA 12. PROPIEDADES EN MAGMA, EN ESTE CASO LA DENSIDAD DE LA ALEACIÓN 319. ....	36
FIGURA 13. PREPROCESADOR INICIAL DE MAGMA, CUATRO VISTAS: SUPERIOR, COSTADO, ISOMÉTRICA Y DE LADO. ....	37
FIGURA 14. DIFERENTES VISTAS DE LA PIEZA: (A) VISTA ISOMÉTRICA SIN MALLA. (B) VISTA ISOMÉTRICA MALLADA, (C) VISTA DE LADO MALLADA, (D) VISTA FRONTAL MALLADA. ....	38
FIGURA 15. EJEMPLO DE MATRIZ DE ANÁLISIS DEL MÓDULO FRONTIER. ....	39
FIGURA 16. FOTOGRAFÍAS: (A) HORNO DE CRISOL Y MOLDE, (B) MOLDE VACÍO, (C) MOLDE CON PIEZA VACIADA DE LADO, (D) MOLDE CON PIEZA VACIADA DE FRENTE. ....	40
FIGURA 17. CURVA DE ENFRIAMIENTO, T (°C) VS. TIEMPO (S) PARA UN ALUMINIO 319 EN MOLDE DE ARENA. .....	42
FIGURA 18. (A) GRÁFICO DE LOS TERMOPARES CERCANOS A LA INTERFASE, (B) GRÁFICO DE LOS TERMOPARES EN LA ARENA; Y (C) GRÁFICO DE LOS TERMOPARES EN LA PIEZA. ....	43
FIGURA 19. UBICACIÓN DE LOS TERMOPARES: (A) VISTA FRONTAL, (B) VISTA LATERAL. ....	43
FIGURA 20. (A) CURVA TERMOPAR 4 (UBICACIÓN ARENA); (B) CURVA TERMOPAR 5 (UBICACIÓN INTERFASE); (C) CURVA TERMOPAR 8 (UBICACIÓN METAL VACIADO). ....	47
FIGURA 21. VARIABLES DE DISEÑO. ....	48
FIGURA 22. DISEÑOS DE EXPERIMENTOS RESPECTO A LOS COEFICIENTES UTILIZADOS. ....	49
FIGURA 23. DATOS OBTENIDOS DE LOS DIFERENTES COEFICIENTES. ....	50
FIGURA 24. TABLA DE PORCENTAJES DE CORRELACIÓN DE CADA TERMOPAR. ....	51
FIGURA 25. COMPARATIVO TERMOPAR 4. ....	52
FIGURA 26. COMPARATIVO TERMOPAR 5. ....	52
FIGURA 27. COMPARATIVO TERMOPAR 8. ....	53

## Lista de Tablas

TABLA 1. SERIE DE ALEACIONES DE AL.....	2
TABLA 2. SERIE DE ALEACIONES DE AL VACIADAS .....	3
TABLA 3. COMPLEMENTO SERIE DE ALEACIONES DE AL VACIADAS .....	3
TABLA 4. COMPORTAMIENTO DE LOS ELEMENTOS ALEANTES COMUNES EN EL ALUMINIO.....	4
TABLA 5. COMPOSICIÓN QUÍMICA ESTÁNDAR (% EN PESO) DE UN ALUMINIO 319. ....	33
TABLA 6. MÓDULOS DE MAGMA .....	35
TABLA 7. COMPOSICIÓN QUÍMICA ESTÁNDAR (% EN PESO) DE LA ALEACIÓN. ....	41