

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



RELACIÓN DE LA ESTRUCTURA RESINA-ARENA  
EN LA CALIDAD SUPERFICIAL DE FUNDICIONES  
DE ALUMINIO PURO

**TESIS**

QUE PRESENTA  
EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS  
DE LA INGENIERÍA MECÁNICA CON ESPECIALIDAD  
EN MATERIALES

ROMÁN JABIR NAVA QUINTERO

CD. UNIVERSITARIA

MARZO 2008

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis "Relación de las propiedades del sistema resina-arena con la superficie del molde" realizada por el Ing. Román Jabir Nava Quintero, con matrícula 813722, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con especialidad en Materiales.

El comité de tesis

---

Asesor  
Dr. Ubaldo Ortiz Méndez

---

Revisor  
Dr. Enrique López Cuellar

---

Revisor  
Dra. Oxana Vasilievna  
Kharissova

---

Vo. Bo.  
Dr. Guadalupe Alán Castillo  
Rodríguez  
División de Estudios de Postgrado

San Nicolás de los Garza, N.L. noviembre de 2007.

## **Dedicatoria**

A mi Padre, por su amor, ejemplo y  
dedicación a nosotros.

## Resumen

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo relacionar cuantitativamente el estado de las superficies de fundiciones de aluminio con el comportamiento térmico y químico de un tipo de resina que se utilice para la fabricación de moldes y corazones de arena. Se busca correlacionar la rugosidad, los defectos de la superficie y el tamaño de grano en las superficies con el tipo de arena, temperatura y tiempo en los cuales se lleva a cabo la fabricación de moldes y corazones. En particular se investigará la resina Furano mezclada con arena sílica. El estado de las superficies de las fundiciones de aluminio se caracterizará mediante el análisis de imágenes y rugosimetría con perfilómetro.

## Prólogo

Las potencias industriales en la fundición de metales controlan arriba del 85% del mercado mundial dejando a las pequeñas y medianas fundiciones un mercado de alta competitividad donde aquellos que invierten en la calidad de sus productos tomarán ventaja ante sus oponentes, esta regla no sólo aplica para las empresas de baja escala, si no que se extiende a todos los niveles y mercados mundiales, es aquí donde la investigación juega un rol importante dentro de la industria, ayudando a mejorar los procesos existentes y creando nuevos métodos de fabricación para la obtención de productos de bajo costo y alta calidad.

Las fundiciones han invertido mucho dinero en entender los mecanismos de fusión y solidificación, así como, el control de las propiedades químicas y físicas de los metales antes y durante sus procesamiento utilizando: elementos aleantes, modificadores, refinadores de tamaño de grano y controlando las condiciones de proceso tales como las razones de calentamiento y enfriamiento. Sin embargo, se han olvidado un poco de la influencia que tiene los moldes de fabricación con cada una de estas variables.

En esta tesis se publican los resultados de algunas de las variables más importantes que existen en la preparación de los moldes para la fabricación de piezas de fundición y sus propiedades físicas, tales como: el tamaño de grano, la porosidad y la textura de las piezas. El entendimiento de estas variables nos

lleva a la posibilidad de establecer variables de control de proceso y a la reducción de pérdidas de producción.

E. Morales.

# Índice

Resumen	ii
Prólogo	lii
Capítulo 1. La Fundición hasta ahora	1
Capítulo 2. Arenas para Moldeo	5
2.1 Introducción	5
2.2 Arenas	6
2.2.1 Tipos de Arena	8
2.3 Propiedades de las arenas sintéticas	9
2.4 Procesos de resinas aglutinantes	11
2.5 Recuperación de la arena	14
Capítulo 3. Interacción Molde / Metal	15
3.1 Introducción	15
3.2 Defectos por penetración	17
3.2.1 Superficies rugosas	18
3.2.2 Burn-on	19
3.2.3 Burn-in	19
3.2.4 Penetración del metal	19
3.3 Mecanismos de Penetración	20
3.3.1 Presión metaloestática	21
3.3.2 Presión dinámica	22
3.3.3 Presión por explosión	22

Capítulo 4. Experimentación	24
4.1 Introducción	24
4.2 Diseño de experimentos	25
4.3 Experimentación	26
4.4 Selección del área de análisis	30
4.5 Determinación de los rangos de rugosidad	31
Capítulo 5. Resultados y Discusión	32
5.1 Introducción	32
5.2 Efecto del molde sobre la superficie de las fundiciones	33
5.2.1 Influencia de la distribución granulométrica de la arena	35
5.2.2 Influencia del porcentaje de resina en la solidificación	38
5.2.3 Influencia del porcentaje de catalizador en la solidificación	41
5.2.4 Influencia del tiempo de curado en la solidificación	43
5.2.5 Influencia de la temperatura de curado en la solidificación	45
5.3 La rugosidad promedio de las muestras de aluminio	47
5.3.1 Influencia de la distribución granulométrica en la rugosidad promedio	48
5.3.2 Influencia del porcentaje de resina en la rugosidad promedio	49
5.3.3 Influencia del porcentaje de catalizador en la rugosidad promedio	52
5.3.4 Influencia del tiempo de curado en la	54



rugosidad promedio	
5.3.5 Influencia de la temperatura de curado en la rugosidad promedio	55
Capítulo 6. Conclusiones	57
Referencias Bibliográficas	60
Índice de figuras y Tablas	61
Apéndice A	63
Apéndice B	65

## **CAPITULO 1**

### **La fundición hasta ahora**

Desde los inicios de la humanidad el hombre primitivo recurrió al uso de su entorno para satisfacer sus necesidades básicas de comida, vestido y sustento. Primero recurrió al uso de la piedra, lo que marcó la denominada Edad de Piedra donde con el uso del fuego sobre las piedras y otros materiales como la cal y el barro mejoraron su resistencia y dieron inicio a los primeros tratamientos térmicos. Más tarde comenzaría a trabajar el cobre, muy posiblemente considerándolo como una piedra bajo los mismos métodos, dando inicio con esto al periodo denotado como la Edad de Cobre donde se ubican los primeros objetos metálicos que datan de más de 10, 000 años.

La necesidad y la creciente habilidad para manejar el fuego lo llevan a los inicios del proceso de fundición con los primeros moldes que fueron de piedra. Este periodo precede a la Edad de Bronce y se denomina por los arqueólogos "carbonítico" y data entre los años 5, 000 y 3, 000 A.C.

Cerca del año 2000 A.C. la tecnología del Bronce comienza en Oriente entrando con tal fuerza que la fundición se vuelve ya el método predominante en el procesado de metales en esta parte del mundo. Pero es quizás cerca del año 600 A.C. donde el uso de los materiales es determinante en la evolución del hombre, la fundición del hierro marca el comienzo de la edad que lleva su nombre, edad de Hierro. El hierro se convierte así en el material predominante en la fabricación de armas e instrumentos agrícolas. Fueron los chinos los que comenzaron y lograron trabajar el hierro desarrollando los primeros moldes de arena.

Pero es un siglo después que en Europa se logran las temperaturas necesarias para la fundición de moldes de arena. El hierro comenzó su auge y se expandió en todas las civilizaciones de Europa. El desarrollo tecnológico de la metalurgia se freno en este periodo hasta que en 1540 D.C. el metalúrgico italiano Vannoccio Birungio recopiló formulas y técnicas de fundición hasta su tiempo, lo que le valió ser considerado el padre de la industria de la fundición al ser el primero en documentar el proceso de fundición.

Y es hasta principios del siglo XVIII que comienza la revolución de la fundición con la producción de hierro en Europa. Posteriormente en el siglo XIX el campo de la metalurgia tiene importantes innovaciones gracias a la influencia

de la revolución industrial, a finales de siglo, entre estas esta la adición de níquel al acero para darle mayor dureza (1889) [1], la fundición centrífuga desarrollada por A.G. Eckhardt en Inglaterra (1809) [1], el uso del aluminio como material para adornos al lograr separarlo por el método de Hall-Heroult (1825)[1], el desarrollo de la metalografía por Henry C. Sorby (1863) [1] y el redescubrimiento del proceso a la cera perdida por B.F. Philbrook (1867) [1]. Destaca en este siglo las bases científicas que se desarrollan en material de metalurgia química, los albores en el control del proceso y el nacimiento de organizaciones como la American Foundrymen's Association (1896 y para cambiar su nombre por American Foundrymen's Society) dedicadas a la ciencia, investigación y desarrollo de la metalurgia.

El siglo XX marca el refinamiento de los procesos y los materiales utilizados en la fundición por más de 400 años. El proceso se vuelve fundamental en el desarrollo industrial de los países y es la Segunda Guerra Mundial un catalizador en el desarrollo tecnológico de los países involucrados. En este periodo de guerra la tecnología de moldes y corazones tomó gran importancia con el desarrollo de resinas aglutinantes para la producción de moldes y corazones químicamente ligados que aumentaron la producción y permitieran alcanzar las necesidades dimensionales.

A finales de los años 50's comienza una segunda revolución industrial con el nacimiento de la automatización y a finales del siglo XX el desarrollo tecnológico de la industria de la fundición experimentó un avance sin igual en toda su historia debido a la demanda de un Mercado consumidor cada vez más exigente y competitivo a nivel mundial.

Pensando en el futuro de la industria de la fundición para el siglo XXI podemos estar seguros que se continuaran desarrollando nuevas tecnologías con el firme propósito de alcanzar los estándares de desempeño críticos. Lo anterior queda respaldado por el impresionante desarrollo que ha tenido la fundición en los últimos 60 años en comparación con lo logrado 3000 años atrás.

El presente trabajo tiene como objetivo general buscar una relación entre la estructura reina-arena relacionando su acabado superficial. De acuerdo con lo anterior se plantea como hipótesis que el estado de la superficie de la pieza fundida esta influenciada por variables de proceso como: Temperatura de curado, tiempo de curado, contenido de resina y contenido de catalizador, y de las características del material que conforma el molde como: distribución granulométrica.

## **CAPITULO 2**

### **Arenas para moldeo**

#### **2.1 Introducción**

Cuando la arena apareció en la industria de la fundición ésta era solamente vista como un simple contenedor para verter y dar forma al metal. A finales del siglo XIX el objetivo de la industria de la fundición con el empuje de la revolución industrial se dirigió a refinar el proceso y los materiales utilizados, cambiando radicalmente el antiguo punto de vista sobre la arena.

Después de setenta años, el control de las propiedades en las arenas es generalmente reconocida, pues se ha comprobado que las propiedades de las fundiciones dependen de manera intrínseca de las propiedades del molde [2].

Actualmente con el vertiginoso desarrollo tecnológico las fundiciones demandan dos tipos de calidad:

- Calidad independiente de la estructura. Se relaciona con los parámetros externos de la fundición como: masa, tolerancia dimensional y acabado superficial.
- Calidad dependiente de la estructura. Se relaciona con la integridad microestructural de la fundición y controla aquellas características de carga como lo son la resistencia a la tensión y límite de cedencia.

Dentro de la calidad independiente, las pruebas a las arenas como parte de control es de vital importancia en la determinación y la eliminación de innumerables defectos de fundición [3] traduciéndose en reducción de costos y tiempos.

## 2.2 Arenas

La arena es un material que consiste esencialmente en granos sueltos de mineral, de tamaño no mayores de 2.00 mm ni menores de 0.05 mm de diámetro, por lo que, el término arena no identifica al mineral de que son los granos, solo denota tamaño [4]. Las arenas se han vuelto el material por excelencia en el moldeo para fundición pues poseen características óptimas para el moldeo como: estabilidad térmica y dimensional a temperaturas elevadas, variedad en tamaños y formas de partículas, no reacciona químicamente con los metales fundidos, no es mojada por el metal líquido, liberación de los volátiles

que producen gases con el calentamiento, economía en su disponibilidad, composición y pH consistentes, y además son compatibles con sistemas aglutinantes.

El moldeo de arena es uno de los métodos de trabajado de metales más versátiles al proveer una tremenda libertad de diseños, formas, tamaños y calidad. Se clasifican según la manera como ésta sea ligada o unida diferenciando tres categorías: moldes de arena en verde, moldes aglutinados con resinas, y moldes de arena sin ligar.

El moldeo en verde (El término "en verde" se refiere a que el molde es mezclado con agua no siendo secado o cocido) esta basado en ligas orgánicas entre la arcilla (que la arena contiene de manera natural) y el agua que se adiciona. Hay materiales que se adicionan como la bentonita y algunos cereales que elevan las propiedades mecánicas del molde.

El moldeo aglutinado con resinas se basa en la reacción de dos sustancias, la resina y el catalizador, que al interactuar entre ellos y según las condiciones de reacción forman una liga entre los componentes de la resina proporcionando excelentes propiedades mecánicas al molde.



### 2.2.1 Tipos de arenas

La selección de materiales de moldeo y sus sistemas de unión química dependen del tipo del metal a vaciar, el tipo de fundición, la disponibilidad de los agregados, el equipo para hacer los moldes y los corazones, y la calidad requerida.

Según su procesamiento las arenas se clasifican en naturales y sintéticas, siendo las naturales las que contienen suficiente arcilla de manera natural que agua están listas para moldearse al adicionarles. Las arenas sintéticas son aquellas que se han lavado para removerles la arcilla y otras impurezas, se han cribado dándoles ciertas distribuciones de grano y finalmente reblandecidas con arcilla y otros materiales para mejorar la calidad de la arena. Las arenas sintéticas se componen de una base de granos de arena de distintas distribuciones. Los agentes aglutinantes son agregados a estas arenas base para lograr las características de moldeo deseadas. Las arenas bases más empleadas en esta categoría son: sílica, zirconio, olivita y cromita (siendo las últimas tres utilizadas principalmente para aplicaciones especiales). Para el presente trabajo solo es de importancia la arena sílica por lo que a continuación se enfatizan sus propiedades.

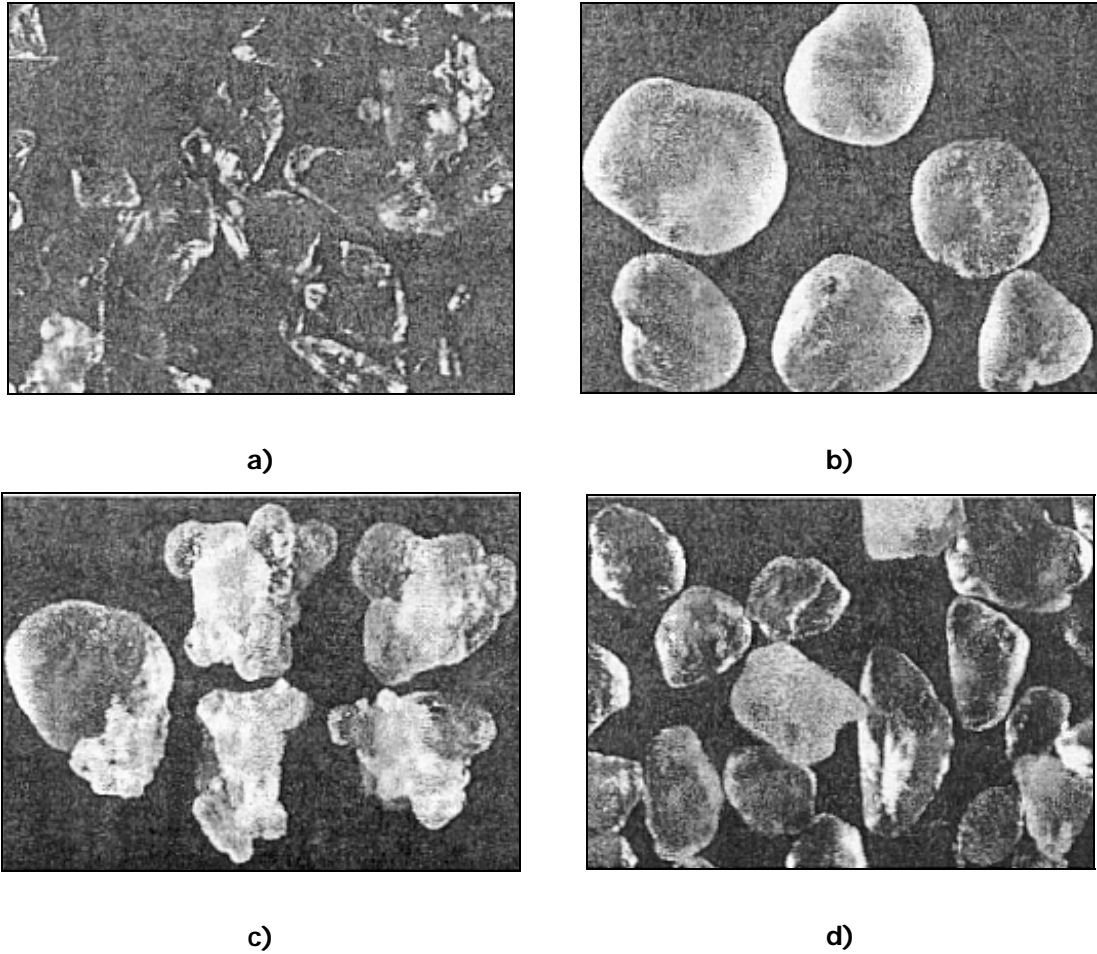
La arena base sílica es un material extremadamente versátil por su abundancia, su variedad de tamaños y formas de granos, sus propiedades

refractarias y su bajo costo que le ha valido ser el material más utilizado para el moldeo en la industria de la fundición. Sin embargo para algunos procesos de fundición se ha desplazado a este tipo de arena como el material de moldeo pues tiene una expansión volumétrica pronunciada, presenta poliformismo principalmente en la interfase molde/metal y se ha comprobado que por el tamaño de algunas de sus partículas y la exposición prolongada por periodos muy largos de tiempo, las arenas sílicas, pueden ser dañinas a la salud.

### **2.3 Propiedades de las arenas sintéticas**

La selección de arenas es un factor importante en la producción de piezas de calidad debido a que es la arena la cual interactuará con el metal líquido y su gradual solidificación. Es por eso que al momento de formar el molde o corazón es importante considerar forma, granulometría, densidad y resistencia de las arenas base que formarán el molde.

Es importante mencionar que la forma de grano contribuye a la cantidad de área superficial de la arena y la distribución de tamaño de grano controla la permeabilidad del molde [5]. Ver (Figura 1).



**Figura 1. Clasificación de la forma de granos de las arenas. a) Granos Angulares, b) Granos Redondos, c) Granos Compuestos, d) Granos Subangulares. [1]**

En la manera en la que la energía superficial de la arena aumente la cantidad de material aglutinante (arcilla-agua o resina-catalizador) debe incrementarse, esto, para aglutinar la arena apropiadamente. Generalmente se opta por energías superficiales menores para disminuir la cantidad de resina, la generación de gases y la generación de defectos por el uso de recubrimientos. Y son los granos redondos los cuales poseen el menor factor de forma y son los angulares los del mayor factor de forma, lo que se traduce en el uso de un 25% más de resina en arenas angulares que en arenas redondas.

Como las arenas son un conjunto de partículas de diversos tamaños y morfologías, el control de la distribución del tamaño de grano de arena es de mayor importancia que el control de la forma de grano. La distribución de forma del grano incluye: la distribución del tamaño de grano base, la distribución de granos rotos que en conjunto controlan el área de superficie y la densidad de empaquetamiento (permeabilidad) o porosidad del molde [5].

## **2.4 Procesos de Resinas Aglutinantes**

Las resinas aglutinantes fueron desarrolladas para reforzar a los modelos de arena, en especial, a los corazones los cuales son la parte más frágil de los sistemas de moldeo. La selección del tipo de un aglutinante en especial depende del tipo de metal a fundirse, de las mejoras necesarias en las propiedades de la arena según la cantidad de moldes requeridos y de los rangos de producción de los equipos moldeadores [5].

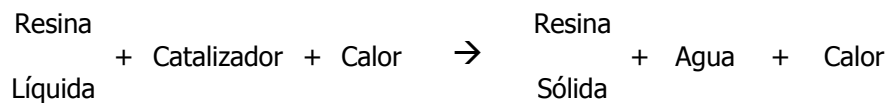
A pesar de la gran variedad de procesos utilizados actualmente para resinas aglutinantes, estas se pueden clasificar como: sistemas sin-hornear, sistemas curados con temperatura y sistemas de caja fría.

Los procesos sin-hornear se basan en el curado de dos o más resinas a temperatura ambiente después de ser combinadas en la arena. Mientras los

procesos de caja fría involucra el curado a temperatura ambiente de una mezcla de arena-resina que es acelerado por un catalizador gaseoso que pasa a través de la arena. En cuanto a los sistemas de caja caliente abundaremos un poco más ya que este trabajo se realizó bajo este sistema.

En los procesos de caja caliente y caja tibia la mezcla aglutinante-arena es húmeda. Un aglutinante líquido termo fijo y un ácido catalizador latente son mezclados con arena seca y colocados en una caja de calentamiento. Durante el calentamiento el catalizador suelta ácido que induce un curado más rápido mejorando las propiedades mecánicas del molde.

A continuación se muestra un diagrama del mecanismo de reacción de los sistemas de caja caliente:



Convencionalmente las resinas para caja caliente se dividen en dos tipos: furánicas y fenólicas. Las resinas furánicas contienen alcohol furfílico, mientras que las resinas fenólicas están basados en el fenol y los furánicos-fenólicos con modificadores y contienen ambas bases. Una característica común en su composición es que todos los aglutinantes de caja caliente contienen urea y formaldehído. La diferencia en el reactivo base produce que las resinas furánicas curen más rápido que las fenólicas, provean mayor agitación y tengan

menos problemas de almacenamiento [5]. El contenido de resina empleado en este tipo de sistemas va de 1.5 a 2.0% de la cantidad de arena.

La selección del catalizador se hace en base al valor de demanda ácida y otras propiedades químicas de la arena. Cambios en la temperatura de la arena de 11°C y/o variaciones de  $\pm 5$  unidades en el valor de demanda ácida de la arena requieren un ajuste en la cantidad de catalizador para mantener un óptimo desempeño. Existen dos grados de catalizadores líquidos: los nitrurados para verano y los cloratos para invierno por su mayor reactividad.

Debido a la actividad de sus productos las resinas de caja caliente tiene una vida de banco limitada pues su viscosidad aumenta al aumentar el tiempo de almacenamiento mientras que los catalizadores de este tipo tienen periodos de almacenamiento indefinidos.

En cuanto a la temperatura del modelo, ésta no debe variar más de 28°C a lo largo de su forma. La temperatura ideal para una corrida en caja caliente es entre 220 y 245°C, el error más común en este tipo de procesos es correr a alta temperatura lo que provoca superficies pobres en los corazones. El color de la superficie de los corazones muestra como ha sido curado el corazón y da una guía para saber su efectividad. Para un buen curado la superficie debe tener

una coloración ligeramente amarilla o café muy claro y no negro o café oscuro [5].

## **2.5 Recuperación de la arena**

La recuperación de arenas es un proceso que ayuda a la reducción de costos asociados con la arena nueva y los costos por disposición de desperdicio, y la reducción de costos asociada de controles ambientales de contaminantes no deseados en la arena desechada.

Además de las ventajas en reducción de costos la recuperación de arena reduce el número de variables a controlar dando una consistencia operacional durante un periodo de tiempo. También la forma y la distribución de la arena y el sistema de resina son más uniformes reduciendo así los costos.

## Capítulo 3

### Interacción Molde/Metal

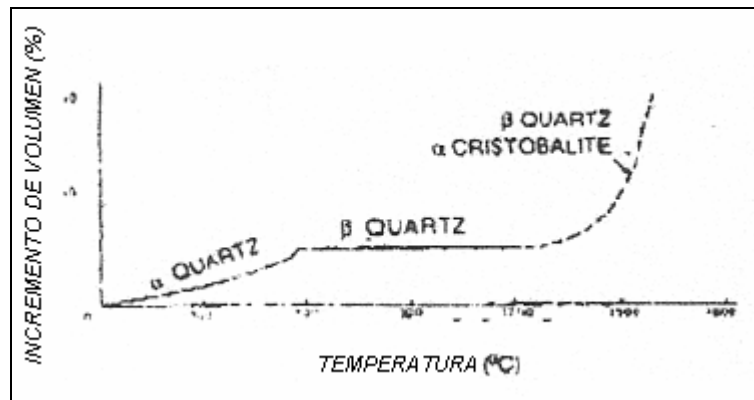
#### 3.1 Introducción

La producción de piezas fundidas con calidad requiere de superficies que sean poco rugosas, libres de material extraño y de defectos. Esto nos lleva a poner atención a los fenómenos que ocurren en la interfase entre el molde y el metal líquido, los cuales están enormemente influenciados por cambios físicos [6]. Estos cambios físicos se deben a la interacción de los diferentes materiales presentes durante el vaciado que poseen distintas propiedades.

Mientras el molde es el material encargado de dar forma y absorber la energía calorífica del metal al ser vaciado, el metal al hacer contacto con el molde genera una serie de procesos heterogéneos en la interfase molde/metal [6]. Por una parte comienza la solidificación del metal en la cavidad, acompañado por un incremento en viscosidad, y por otra el molde de arena en su mayoría de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) en la forma de cuarzo alfa sufre una serie de



transformaciones cristalográficas al calentarse sufriendo una expansión volumétrica (Figura 4) y los gases que ocupan la cavidad del molde son desplazados por el metal entrante a través de los poros del molde, así como también sucede con los gases generados por la degradación de la resina al contacto del metal y la superficie curada.



**Figura 4. Incremento volumétrico de la sílica cristalina o cuarzo alfa.**

[7]

La calidad superficial, la exactitud dimensional y otras propiedades fueron determinadas por procesos de contacto de superficies entre el metal líquido y el molde de arena. Pero como Janjusevic et al. apuntan esto trae consigo defectos que afectan las propiedades de estructura y/o propiedades de fundición [8].

### 3.2 Defectos por Penetración

Anualmente los defectos por penetración del metal en el molde continúan provocando cientos de millones de dólares en limpieza, retrabajo y desperdicio para la industria de la fundición [8]. La comprensión y cuantificación de la influencia de este tipo de fenómenos en la interfase molde/metal ha sido tema de atención de varios investigadores desde finales del siglo XX enfocándose principalmente en el hierro y el acero [8].

Se ha encontrado que los defectos de penetración ocurren principalmente por los procesos mecánicos y químicos ocurridos durante el vaciado y la solidificación del metal en moldes de arena [8]. Las causas principales de la penetración mecánica son: la presión metaloestática, la presión dinámica y la presión de explosión. Las causas químicas de la penetración devienen de las reacciones químicas que ocurren en la interfase del molde [8].

La American Foundrymen's Society (AFS) ha clasificado los defectos de penetración en cuatro fenómenos:

- superficies rugosas
- burn-on
- burn-in
- penetración de metal.

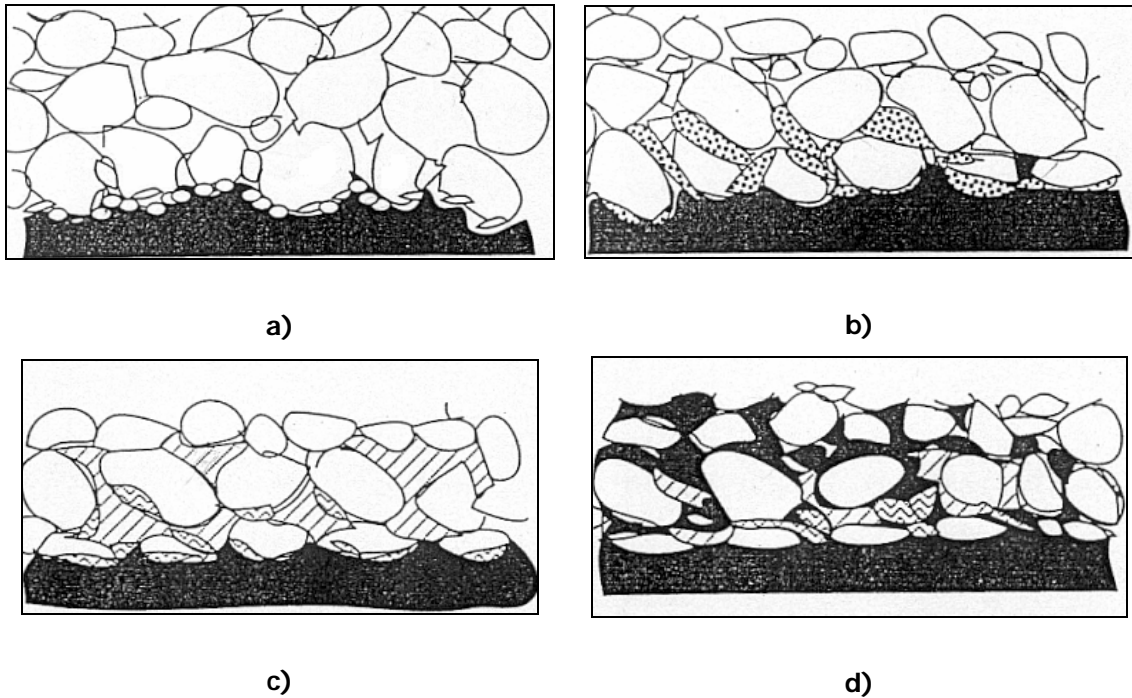


Figura 3. Defectos principales de penetración de metal en el molde. La parte oscura representa el metal, los óvalos representan los granos de arena y las regiones punteadas y rayadas son reacciones entre el metal y la arena. a) Superficie rugosa, b) Burn-on, c) Burn-in, d) Penetración de metal [8]

### 3.2.1 Superficies Rugosas

Cuando el metal fundido penetra en la superficie del molde no más allá del punto medio de la primera capa de granos de arena sin reaccionar con los agregados de la arena deja una superficie rugosa. Dependiendo de la temperatura de vaciado y la composición del molde los granos de arena pueden o no pegarse a la fundición (Figura 3a).

### *3.2.2 Burn-on*

Si el metal líquido reacciona con los agregados del molde, es posible para los productos de las reacciones molde-metal penetrar el molde más allá de la mitad de la primera capa de granos de arena. Este defecto es característico de protuberancias más grandes en las fundiciones que las producidas por superficies rugosas (Figura 3b).

### *3.3.3 Burn-in*

Esta es una versión más severa del defecto burn-on. La reacción principal molde-metal es seguida por un enfriamiento rápido de la fundición. Debido a este corto tiempo de enfriamiento se forman compuestos en la interfase molde/metal que se adhieren fuertemente a la fundición y son más difíciles de remover (Figura 3c).

### *3.2.4 Penetración de metal*

Se caracteriza por la penetración del metal entre los poros del molde más allá de la del punto medio de la primera capa de granos de arena. Este tipo de penetración resulta en una capa permanente de granos de arena adherible que es rodeada de metal (Figura 3d).

### 3.3 Mecanismos de Penetración

El molde es un conjunto de agregados que dan forma a una cavidad donde se vacía el metal, y así, darle forma. Es por esto que el molde, en esencia, es un compuesto de arena aglutinada por una resina (u otro ligante) que al curar le da rigidez mecánica. Según lo anterior, es obvio que el molde presenta un cierto grado de porosidad por su naturaleza de conformado y es principalmente en la superficies de las cavidades del molde donde ésta porosidad influencia a los mecanismos de penetración.

Por su parte, la penetración mecánica es el mecanismo por el cual, debido a la presión metaloestática y/o las fuerzas capilares, el metal líquido entra en lo espacios entre los granos de arena y solidifica gradualmente. Las causas que la provocan pueden dividirse en: presión metaloestática, presión dinámica y presión por explosión.

### ***3.3.1 Presión Metaloestática***

Los metal líquidos no mojan la sílica [8], y es por esto que, para que el metal líquido penetre en el molde deberá existir una presión suficiente en la interface molde/metal para forzar al líquido a penetrar en los poros de la arena antes de que este solidifique. Si la presión es originada por el peso del metal en la cavidad esta se denomina presión metaloestática. La cual esta determinada por la tensión superficial del metal y la altura del líquido necesaria para generar esta presión que es proporcional a la razón tensión superficial/densidad.

Otros dos factores que influyen para penetración mecánica son: la permeabilidad del molde y la temperatura del molde en la interfase molde/metal. De esta manera que si el tamaño promedio de los poros entre granos puede ser controlado, la penetración mecánica puede ser evitada o incluso eliminada del todo [8]. Así como también, se han encontrado que existe una menor penetración si la temperatura de vaciado es mantenida lo más baja posible [8].

### ***3.3.2. Presión Dinámica***

La penetración mecánica puede ser producida también por las fuerzas generadas durante el vaciado del metal en el molde, esta presión es llamada dinámica. Esta presión puede ser evitada si se tiene una rapidez de vaciado constante y el vaciado se realiza lo más lento posible.

### ***3.3.3. Presión por Explosión***

Algunos investigadores explican a la presión por explosión como un fenómeno causado por moldes compactados a presiones altas. El metal líquido entra a la cavidad del molde, el impacto dinámico provoca que una cantidad de metal penetre ligeramente entre los poros del molde. La alta presión de contacto generada en la interfase molde/metal resulta en una rápida transferencia de calor del metal a la superficie del molde. Esta súbita transferencia de energía genera una evaporación explosiva del agua en la superficie del molde y a la solidificación de las puntas de metal que penetraron. Pruebas recientes [1] han mostrado que los factores relacionados con la penetración mecánica por evaporización son: las condiciones de vaciado, la presión de compactación del molde y la composición del molde.

Si bien los resultados anteriores son sobre estudios en defectos de penetración en moldes, también se han demostrado que estos defectos están presentes cuando ocurre penetración en corazones [8].

En la búsqueda de mejores acabados superficiales, la industria de la fundición ha desarrollado desde hace unas décadas los recubrimientos para las cavidades de los moldes o los corazones. Estos han representado toda una innovación en la mejora de la calidad superficial y la reducción de costos de fundición mejorando la piel de la arena y reduciendo las reacciones entre el material y el molde, reduciendo o eliminando la penetración de metal, así como la formación de venas.



## **Capítulo 4**

### **Experimentación**

#### **4.1 Introducción**

Hasta ahora no existe una sistematización de los conocimientos de cómo el sistema resina/arena controla la calidad de las superficies de las fundiciones [9]. Para el presente trabajo, la metodología seleccionada fue comparar diferentes formulaciones de moldes y sus efectos en las superficies de las muestras solidificadas en contacto con dichos moldes. Cualquier diferencia en la textura de las muestras, así como también, en la presencia de defectos superficiales indicaría una influencia del molde en la calidad superficial de la muestra fundida.

Para establecer la relación entre el sistema resina/arena y la calidad superficial de la pieza se proponen las siguientes variables de proceso: distribución granulométrica, contenido de resina, contenido de catalizador, tiempo y temperatura de curado.

El metal estudiado fué aluminio de alta pureza (99.9%) grado conductor con punto de fusión de 660°C el cual no presenta la formación de fases en el material. En el análisis de las muestras se descarta la zona en donde el metal fue vaciado pues genera penetración en el molde, debido a la forma en la que el metal fundido fue vertido.

## **4.2 Diseño de Experimentos**

El objetivo de este trabajo es establecer una relación entre el sistema resina/arena con el acabado superficial de las piezas de aluminio fundidas, en particular establecer una relación entre el sistema de arena/agregados con su densidad y el acabado superficial.

Para relacionar la preparación del molde, según la influencia de sus agregados en la calidad superficial, se eligieron para cada variable valores extremos y uno medio, de manera que se obtenga un comportamiento cuantitativo. Todas las variables se mantuvieron en los valores óptimos según la bibliografía, al cambiar una variable a la vez, se obtuvieron distintas preparaciones de moldes. En la Tabla 1 se muestran las preparaciones de moldes estudiados.

Tabla 1. Valores nominales y asignados para cada preparación.				
Variables	Valores recomendados	Valor mínimo	Valor medio	Valor máximo
Distribución granulométrica (AFS)*	40/50 50/55 60/70	40/50 50/55 60/70	40/50 50/55 60/70	40/50 50/55 60/70
Contenido de resina (% en peso de arena)	2.0	1.8	2.0	2.2
Contenido de catalizador (% en peso de resina)	20	10	20	30
Temperatura de curado (°C)	235±2	220±2	230±2	240±2
Tiempo de curado (seg)	30	15	30	45

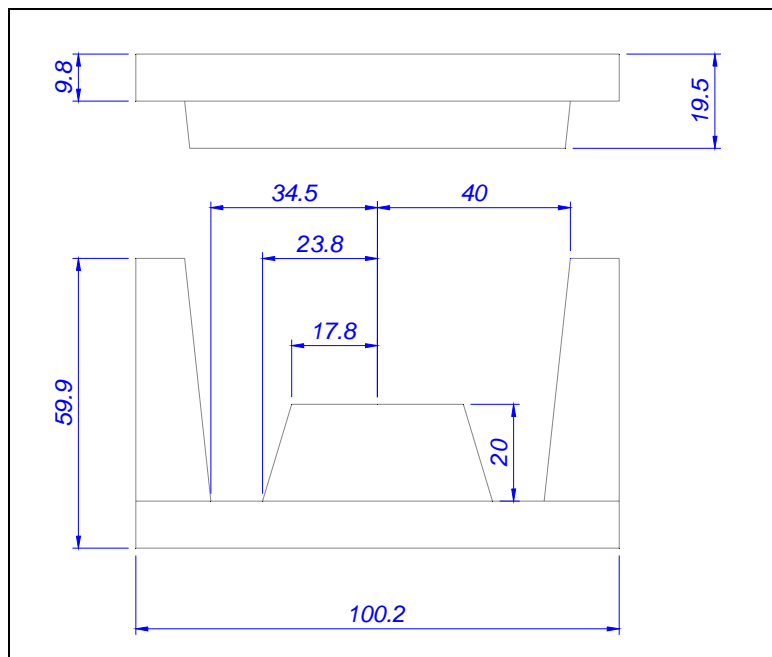
\* La distribución varía según la aplicación.

Las arenas utilizadas son arenas sílica de forma sub-angular cuya distribución varía entre 3 y 4 mallas (20 a 200 AFS/GFN; American Foundrymen's Society/Grain Fineness Number), la resina utilizada fué para caja caliente base furano con el catalizador líquido bases sales de amonio. La ficha técnica de la resina y las arenas se encuentra contenida en el Apéndice A.

### 4.3 Experimentación

El procedimiento experimental consistió en elaborar para cada distribución granulométrica una preparación distinta al variar en cualquiera de los tres valores el contenido de resina, el contenido de catalizador, el tiempo de curado y la temperatura de curado.

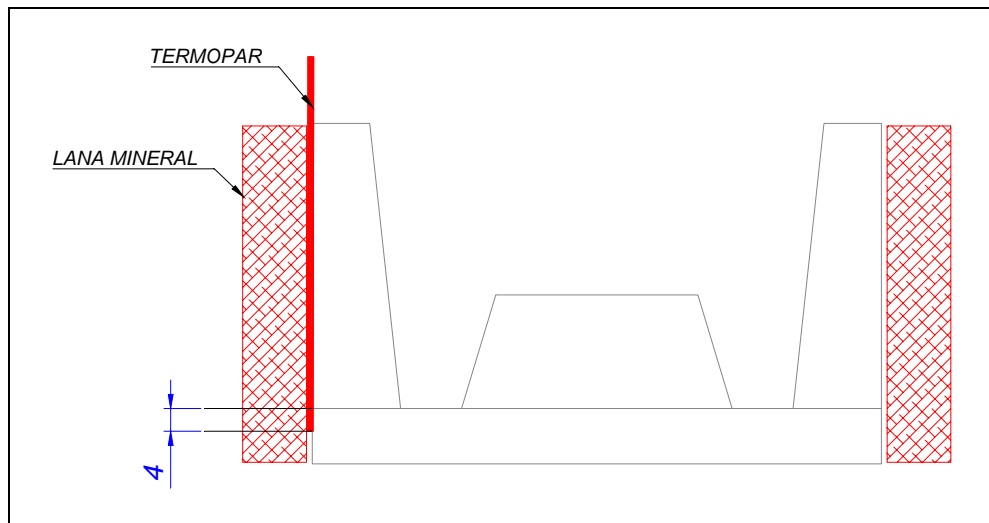
La preparación de cada molde se realizó según el estándar de la AFS para el proceso de caja caliente (AFS 3345-00-S). El tiempo de mezclado para todas las preparaciones fue de 15 minutos de forma manual con la ayuda de un agitador.



**Figura 4. Vista lateral de la caja cilíndrica utilizada para el moldeo.  
(Dimensiones en mm)**

Para el moldeo de la arena se utilizó una caja de aluminio (Figura 4). La caja se calentó en un horno de resistencias eléctricas que cuenta con un sistema de encendido/apagado y un termopar integrado. La caja se forró en sus paredes exteriores con lana mineral para disminuir la pérdida de calor al sacar y vaciar la arena para el moldeo en caja caliente. La temperatura de la caja para producir la reacción de polimerización de la resina se fijó en  $235 \pm 2$  °C.

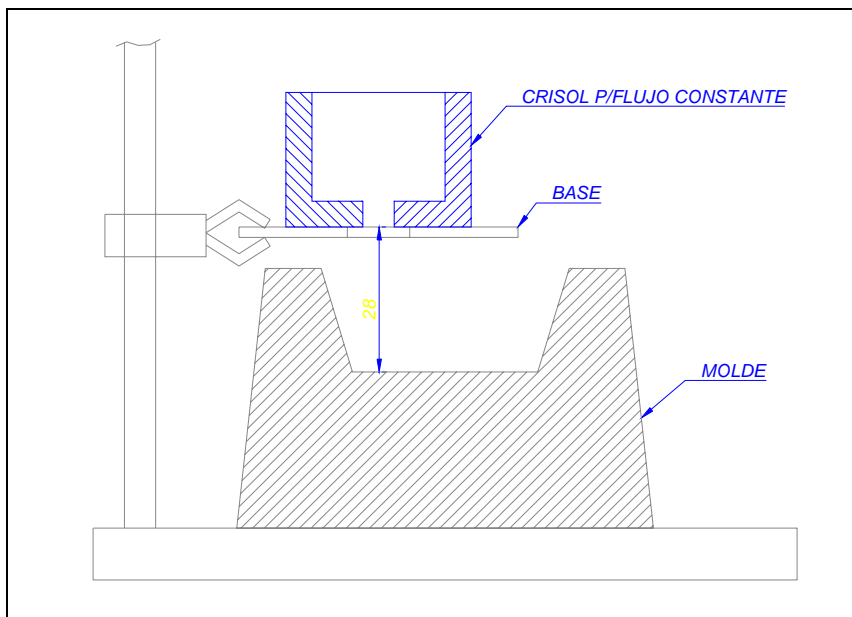
La temperatura de curado se monitoreó en todo momento con el empleo de un termopar puesto en contacto a la base de la caja de molde, la cual genera la superficie principal de análisis (Figura 5).



**Figura 5. Esquema del arreglo del termopar en la caja caliente. (Dimensiones en mm)**

Una vez fabricado cada molde se identificó y se mantuvo a una temperatura entre 20 y 24°C y una humedad relativa entre 30 y 40%.

Para el vaciado del metal (Figura 6), se fijaron los siguientes parámetros: distancia de vaciado, flujo de alimentación del metal, temperatura de vaciado, carga de metal y enfriamiento de la pieza a fin de obtener una calidad superficial reproducible en todas las preparaciones con el mínimo de defectos.



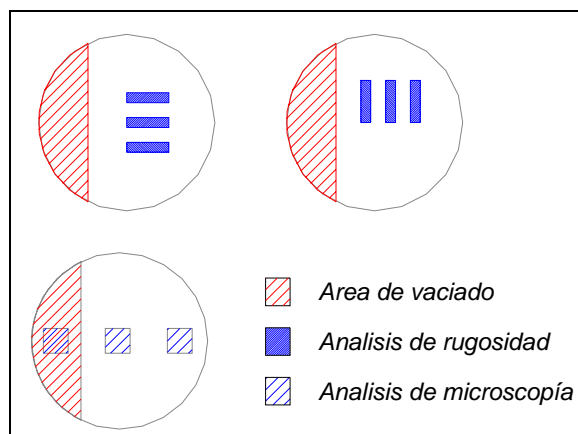
**Figura 6. Esquema del arreglo del molde durante el vaciado. (Dimensiones en mm)**

La alimentación del molde se realizó por gravedad en un crisol de alúmina con un orificio de 6 mm para tener un flujo constante. El crisol de alúmina se deshidrató previamente para evitar que la humedad afectara el baño del aluminio disminuyendo la calidad de la pieza. Se fijó un flujo constante para minimizar la presión dinámica. La distancia de vaciado se fijó en 28 mm para minimizar la penetración por alimentación en el molde. En cuanto a la temperatura de vaciado esta se monitoreo con el empleo de un termopar en el baño siendo la temperatura de 675°C a la cual se vaciaron todas las muestras. Todas las muestras de aluminio se dejaron enfriar por un período de 15 minutos dentro de su molde.

#### 4.4 Selección del área de análisis

Todas las piezas vaciadas presentan 3 zonas, una zona de mayor rugosidad que se encuentra en el punto de vaciado, otra de rugosidad media después de que el metal cubre la zona de vaciado y por último una zona de rugosidad mínima donde el metal llena completamente el molde.

En todas las piezas se realizó el vaciado a una distancia de 10 mm (Figura 7) de la pared hacia el centro del molde. Las mediciones de rugosidad se realizaron después en esta zona, realizándose tres lecturas en el sentido de la dirección de vaciado y tres en forma transversal, de manera que se obtenga una distribución de rugosidades general de la pieza. Para el análisis por microscopía óptica se observaron dos áreas de 5 x 5 mm en las diferentes zonas de rugosidad.



**Figura 7. Zonas de análisis de rugosidad y microscopía óptica.**

#### 4.5 Determinación de los rangos de rugosidad

El método más usado para cuantificar la rugosidad de superficies en piezas fundidas se basa en el registro de perfiles de alturas mediante un rugosímetro o perfilómetro. Los parámetros de rugosidad más usados en ingeniería son la rugosidad promedio ( $R_a$ ) y la rugosidad media estándar ( $R_{ms}$ ).  $R_a$  es el promedio aritmético de los valores absolutos de las alturas  $y(x)$  medidas a partir de la línea central.  $R_{ms}$  representa el promedio de las desviaciones cuadráticas respecto a la altura media, es la desviación estándar de la distribución estadística de alturas, que a su vez es la raíz cuadrada de la varianza o segundo momento respecto a la media.

El análisis por rugosidad se realizó con un rugosímetro que cuenta con un detector por diferencia de inductancia con punta de diamante con una rapidez de medición de 0.5 mm/s y una rapidez de retorno de 1 mm/s, el radio de la punta es de 5  $\mu\text{m}$  con una fuerza de medición de 4 nN (0.4 gf). Para las lecturas, se utilizó el modo de filtro analógico 2CR de acuerdo a la norma ANSI B46.1-1985 con una longitud de evaluación de 7.5 mm por medición. El margen de medición de rugosidad del equipo para el modo de rugosidad promedio y rugosidad  $R_{ms}$  esta entre 0.5 y 30  $\mu\text{m}$ .



#### 4.6 Determinación de los defectos superficiales por microscopía óptica

Como ya se había comentado en el Capítulo 3, la calidad superficial, la exactitud dimensional y otras propiedades fueron determinadas por procesos de contacto de superficies entre el metal líquido y el molde de arena. La técnica de microscopía óptica, y el análisis de imágenes, permite cuantificar los defectos que se puedan presentar en la superficie de la muestra y/o diferencias en la morfología de la superficie. Lo que nos ayudó a establecer relaciones entre los defectos superficiales con la preparación del molde.

El análisis de defectos se realizó por la técnica de microscopía óptica a una magnificación de 5x en el modo de campo oscuro pues es en este modo como mejor se aprecia la morfología de la superficie al disminuir la reflectividad de la superficie observada.

## Capítulo 5

### Resultados y Discusión

#### 5.1 Introducción

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos a partir de la fase experimental sobre las relaciones que existen entre la preparación del molde con la microestructura de la pieza y la rugosidad promedio. Para el análisis de la morfología superficial se propone un análisis estadístico para determinar las características de las superficies; en cuanto a la rugosidad se midieron los intervalos de rugosidad promedio por ser el único valor para el cual se cuentan con estándares para el proceso de fundición en moldes de arena.

Si bien la rugosidad en la superficie esta determinada por la manera en que el metal solidifica e interactúa con el molde, en este trabajo se presenta esta interacción.

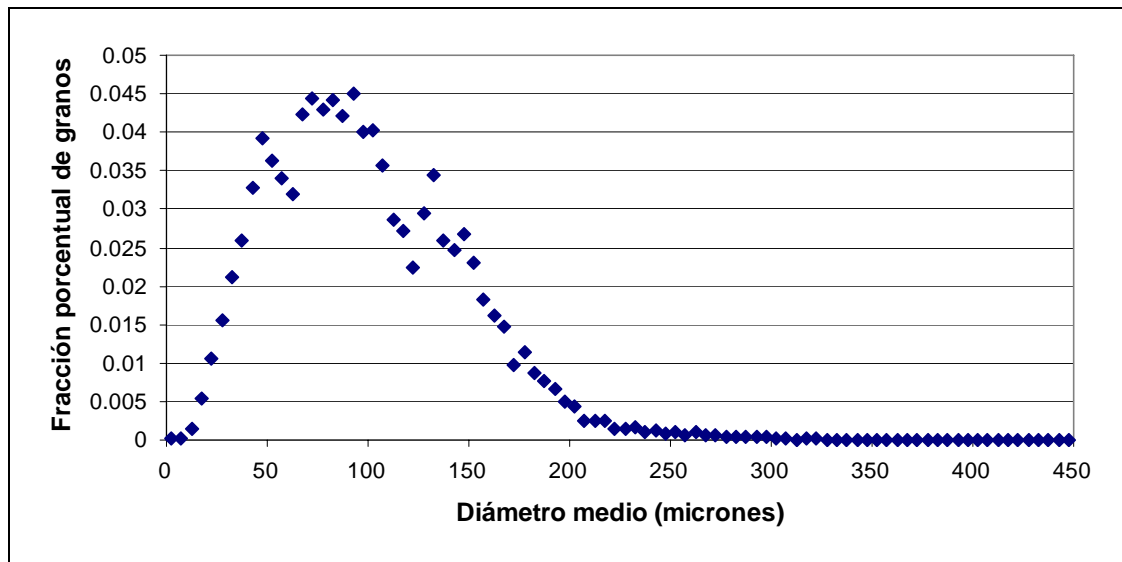
## **5.2 Efecto del molde sobre la superficie de las fundiciones**

La influencia de las distintas preparaciones en la superficie de la pieza fundida fue observada analizando la microestructura después de la solidificación.

Se revisaron dos aspectos: el tamaño de grano y la distribución de estos en zonas diferentes, una cercana al punto de vaciado y otra en la parte más alejada al punto de vaciado como se menciona en el capítulo anterior. Para esto se realizó el análisis de imágenes de la superficie de la muestra vaciada en las diferentes preparaciones de moldes y se utilizó el analizador de imágenes Pro-Image versión 4.5.19 para Windows 98/NT/2000 donde se empleó la función de diámetro medio.

Las mediciones de tamaños de grano generalmente son expresadas en número de granos por milímetro cuadrado, área media por grano o diámetro medio por grano, siendo éste último el más utilizado para fundiciones. Para la función de diámetro medio, el analizador de imágenes registra el valor en base al promedio de la longitud de los diámetros medidos en dos intervalos pasando a través del centroide del grano marcado.

Para determinar el tamaño de grano fue necesario obtener una distribución general de diámetros medios (Figura 8) con el fin de obtener intervalos de tamaños que permitieran realizar comparaciones entre las muestras solidificadas para los distintos moldes. Dichos intervalos fueron determinados a partir del acumulado de la Figura 10 quedando de 0 a 25% del acumulado para los granos con diámetro pequeño que van de 5  $\mu\text{m}$  a 62  $\mu\text{m}$ , de 25 a 50% los medianos que van de 62  $\mu\text{m}$  a 91  $\mu\text{m}$ , de 50 a 75% los grandes que van de 91  $\mu\text{m}$  a 129  $\mu\text{m}$  y de 75% a en adelante los muy grandes que van de 129  $\mu\text{m}$  a 430  $\mu\text{m}$ .



**Figura 8. Distribución de diámetros promedio presentes en las muestras de aluminio vaciadas en moldes de arena fabricados por el método de caja caliente.**

Debemos tener presente que la morfología superficial de las muestras presentan un conjunto variado de estructuras granulares cuyos tamaños están

influenciados por el tipo de preparación del molde y la temperatura que tiene el metal al ir cubriendo la superficie de vaciado, es por ello, que se observa que la morfología presenta los cuatro diferentes tamaños de grano en cualquier zona de la pieza.

Lo anterior nos indica que aun con moldes compactos y moldeados con arena fina tendremos la presencia de una distribución variada de tamaños pero esto no evita que sean las características de los granos de arena y los procesos ocurridos en la interfase molde/metal durante el vaciado los que determinan finalmente la estructura superficial de la pieza.

### **5.2.1 Influencia de la distribución granulométrica de la arena**

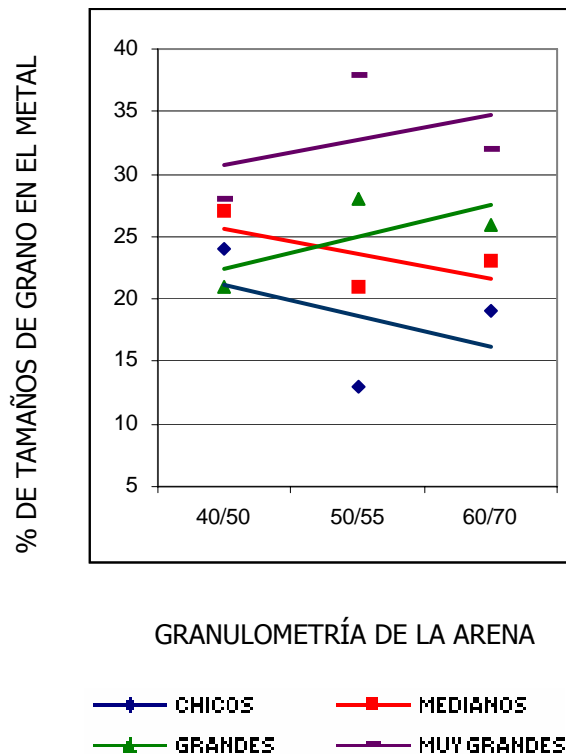
Las preparaciones que cuentan con agregados en igual proporción pero con distinta distribución granulométrica de la arena se analizarán a continuación.

Es importante tomar en cuenta que las tres preparaciones tienen la misma cantidad de masa de arena, solo que en diferentes cantidades de partículas y tamaños; así también, el contenido de resina es el mismo en masa para los tres sistemas de arena ya que esta se calcula a partir del porcentaje de masa de arena empleada para fabricar el molde. La diferencia en el efecto

aglutinante, que determina la rigidez mecánica del molde entre los tres sistemas es la manera en la que los granos de arena están cubiertos. La influencia sobre cada muestra está regida principalmente por la cantidad de resina y su uniformidad alrededor de la arena, y en un menor grado en el tamaño de la arena.

La solidificación de los primeros granos en el metal comienzan en la superficie donde se da un mecanismo de nucleación heterogénea. El número de sitios de nucleación disponibles para el metal solidificado afectará a su estructura. Ahora bien, si hay muchos puntos de nucleación disponibles durante la solidificación se dará una estructura con grano fino la cual es propia de moldes con superficies tersas obtenidas con arena fina y bien compactada.

A lo anterior hay que agregar el hecho de que las granulometrías gruesas de arena presentan una rapidez de transferencia de energía menor a las finas.



**Figura 9. Influencia del tamaño de las partículas de arena (granulometría) en la solidificación del metal. Las líneas muestran las tendencias de solidificación conforme se aumenta o disminuye el tamaño de las partículas de arena.**

La Figura 9, muestra la tendencia del tamaño de grano en el metal con la variación en la fineza de la arena. Los resultados arrojan que conforme aumenta la fineza de la arena el tamaño de grano en la superficie de la pieza va disminuyendo, presentando una morfología donde predominan una distribución de granos grandes (91-129  $\mu\text{m}$ ) y muy grandes (129-430  $\mu\text{m}$ ) cuando la arena es la más gruesa, pequeños (5-62  $\mu\text{m}$ ) y grandes (91-129  $\mu\text{m}$ ) cuando la arena es mediana, hasta presentar una morfología de tamaños de granos pequeños (5-62  $\mu\text{m}$ ) y medianos (62-91  $\mu\text{m}$ ) cuando la arena es la más fina. Este

comportamiento esta regido por la manera en que la energía es disipada del metal. La superficie del molde será más compacta entre más finos sean los granos de arena que la compongan disminuyendo la permeabilidad del molde, también la capa de resina que cubra a la arena será más uniforme y contribuirá a una mayor extracción de calor, al presentar un cambio de fase cuando se degrade.

La variación en los tamaños de grano que solidifican en la superficie de contacto con el molde dependen de que éste último absorba la energía del metal líquido promoviendo la solidificación. Ahora, si el molde esta compuesto por diferentes partículas aglomeradas y cada una con una textura o acomodo determinado, a causa de esto, cada una tendrá una influencia diferente en la forma de solidificar, ya que un grano de arena entre más grande y más rugoso promoverá más la nucleación en varios sitios de este a diferencia de uno pequeño y menos rugoso.

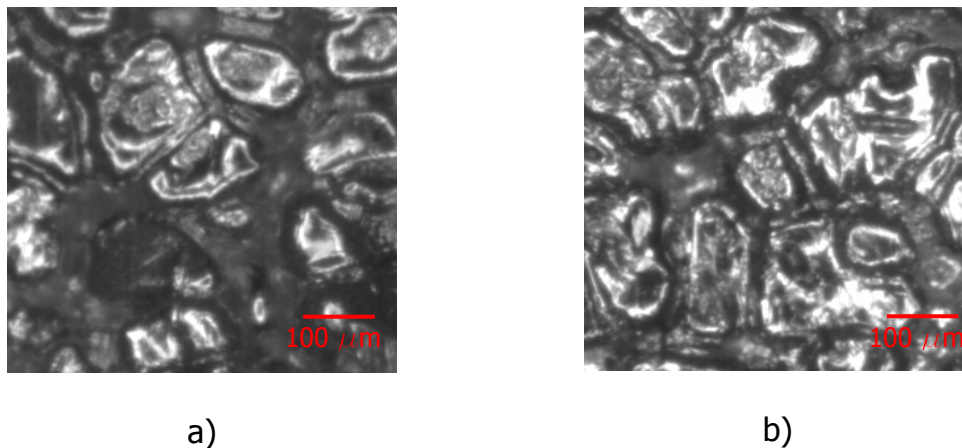
### **5.2.2 Influencia del porcentaje de resina en la solidificación**

El contenido de resina que es agregado al molde determina la rigidez mecánica que éste pueda tener, así como la cantidad de gas que se generará al momento de vaciar por la degradación de la resina. Los resultados que se muestran a continuación indican como se ve afectado el tamaño de grano a causa del porcentaje de resina. La resina al momento del vaciado se degrada

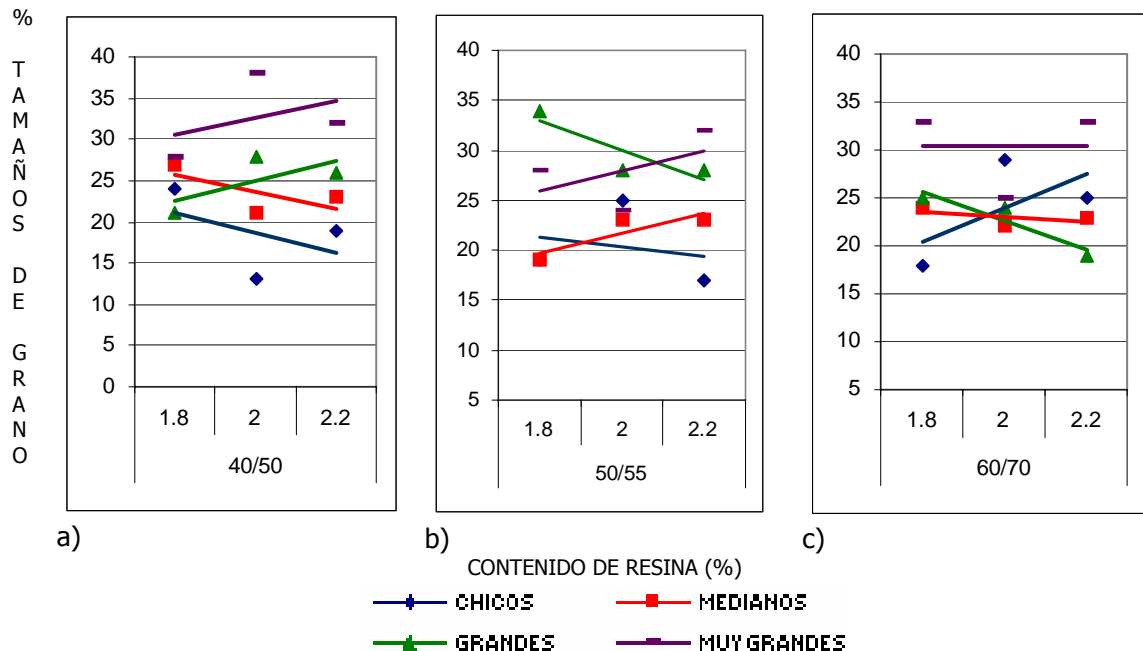


desprendiendo gases como: agua, monóxido de carbono, metano, dióxido de carbono e hidrógeno respectivamente [10].

La generación de gases es diferente para cada preparación ya que la arena 40/50 no requiere de la misma cantidad de resina que la 60/70 pues posee menor área de superficie. De acuerdo a lo anterior se observa en la superficie de las muestras (con la misma cantidad de resina y diferente número GFN/AFS) micro porosidad entre granos, Figura 10. Este defecto indica generación de gases principalmente en las arenas 40/50 y 50/55 las cuales requieren menos resina en comparación a las 60/70 que no presentaron tal defecto.



**Figura 10. Microporosidad (zona entre granos muy difusa) debida a los gases generados en la interfase molde/metal, a) granulometría 40/50, b) granulometría 50/55.**



**Figura 11. Influencia del porcentaje de resina en la solidificación de los granos en el metal. Las líneas muestran las tendencias de solidificación conforme se aumenta o disminuye el porcentaje de resina agregada al molde.**

La Figura 11 muestra el comportamiento de la tres granulometrías de arena empleadas. Como se puede apreciar las tres presentan comportamientos diferentes, como ya se comento, producto de la manera en que los granos de arena se acomodan al formar la superficie del molde y como la capa de resina cubre a los granos de arena.

La Figura 11a muestra para la arena más gruesa (40/50) los tamaños de grano grandes y muy grandes en la superficie de la pieza vaciada y aumenta conforme se incrementa el contenido de resina debido a que los granos son mejor cubiertos y favorece un mejor compactado

En la Figura 11b se observa la influencia que tiene la cantidad de resina en la solidificación. A pesar de que la tendencia en el incremento de resina aumenta el crecimiento de granos de tamaño muy grande y mediano, mientras que el tamaño de grano pequeño disminuye, los granos de arena son mejor cubiertos al ser de granulometría media; por lo que la disipación de energía del material comienza a ser influenciada en mayor grado por la cantidad de resina.

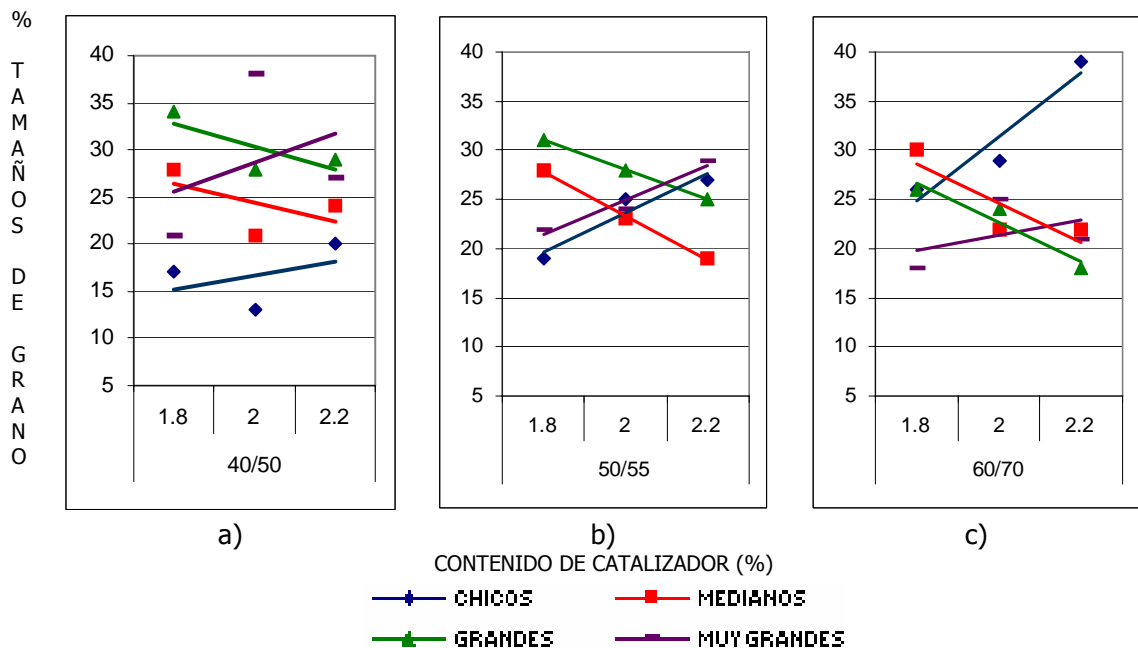
La Figura 11c muestra la influencia que tiene la resina con la arena más fina al aumentar la solidificación de granos pequeños y disminuir la de tamaño mediano y grande conforme aumenta el porcentaje de resina en el molde. La cantidad de resina forma una capa mas uniforme debido al tamaño de la arena y a su buen acomodo promoviendo una más rápida transferencia de energía del metal al molde y reflejándolo en la tendencia a solidificar en granos pequeños en la superficie del metal.

De manera general observamos que entre más fina sea la arena la solidificación en el metal es más sensible a la cantidad de resina debido que los granos de arena son mejor cubiertos y forman superficies más compactas.

### **5.2.3 Influencia del porcentaje de catalizador en la solidificación**

El catalizador acelera la rapidez de la reacción de polimerización de la resina dándole estabilidad mecánica y térmica al molde. Un mayor porcentaje de

ésta asegura un mayor grado de transformación pues habrá una mayor generación de gas que pasa a través del molde lo que trae moldes más uniformes en sus propiedades mecánicas. La falta de suficiente catalizador genera moldes suaves y pobres en sus propiedades mecánicas, una mayor cantidad de catalizador asegura un curado más homogéneo.



**Figura 12. Influencia del contenido de catalizador en la solidificación de los granos en el metal. Las líneas muestran las tendencias de solidificación conforme se aumenta el contenido de catalizador en los moldes.**

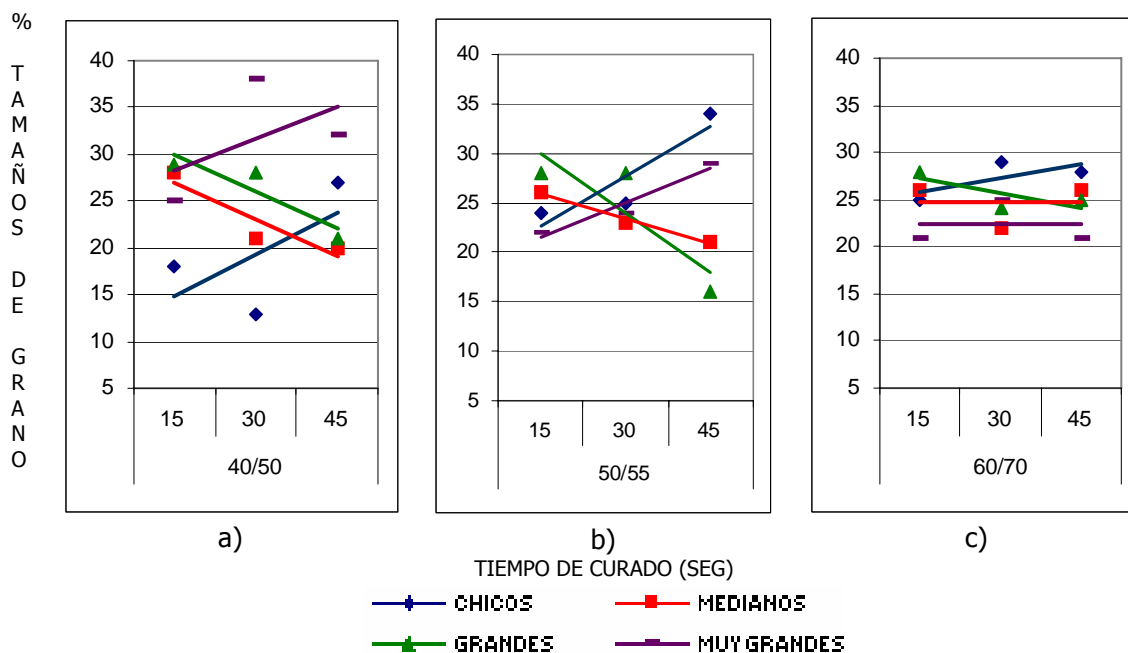
La Figura 12 muestra la influencia del curado mediante la variación del contenido de catalizador en las diferentes granulometrías. Se observa que éste guarda un comportamiento muy parecido al que tiene la variación de resina en los tres sistemas, Figura 11. Lo anterior enfatiza la aseveración hecha de que la resina promueve la disipación de energía del metal líquido en la cavidad del molde mediante su degradación.

Esta degradación será mayor a bajas cantidades de catalizador y menor para cantidades mayores. No hay que olvidar que la degradación de la resina produce gases que pueden provocar microporosidad. Reacciones de curado posteriores pueden presentarse si la resina se expone a altas temperaturas después del curado con ligeros cambios en sus propiedades [10].

El molde tiene un mejor curado gracias a una mayor reacción de la resina con el catalizador apreciándose a simple vista por la tonalidad más oscura que toman los moldes. Esto también se observó por la desaparición de defectos por granos de arena incrustados en el metal debido a la falta de un adecuado curado que lo ligue con otros granos en la superficie del molde.

#### **5.2.4 Influencia del tiempo de curado en la solidificación**

El tiempo que permanece el molde y sus agregados dentro de la caja caliente determinan también el grado de transformación de la resina para su curado. Se observó la misma tendencia que la debida al catalizador pero con un mayor número de granos pequeños.



**Figura 13. Influencia del tiempo de curado de los moldes en la solidificación de los granos en el metal. Las líneas muestran las tendencias de solidificación conforme se aumenta o disminuye el tiempo que los moldes estuvieron en contacto con la caja caliente curando.**

La Figura 13 muestra que en los tres sistemas la respuesta de curado a un tiempo de 15 seg fue muy distinto ya que con la granulometría gruesa (40/50) y media (50/55) se forma solo una capa de arena y por lo que se tienen que rellenar con arena sin resina al momento de vaciar para que pueda soportar la carga del metal durante el vaciado, mientras que con la granulometría fina los moldes salen completos lo que muestra una mejor densidad del sistema.

En la Figura 13a se muestra la tendencia con las preparaciones con arena más gruesa con el tiempo de curado. Se observa que a un tiempo de 15 seg el aumento en el número de granos se realiza de manera lenta ya que los tamaños que predominan son de mediano a muy grande, pues el buen curado de una

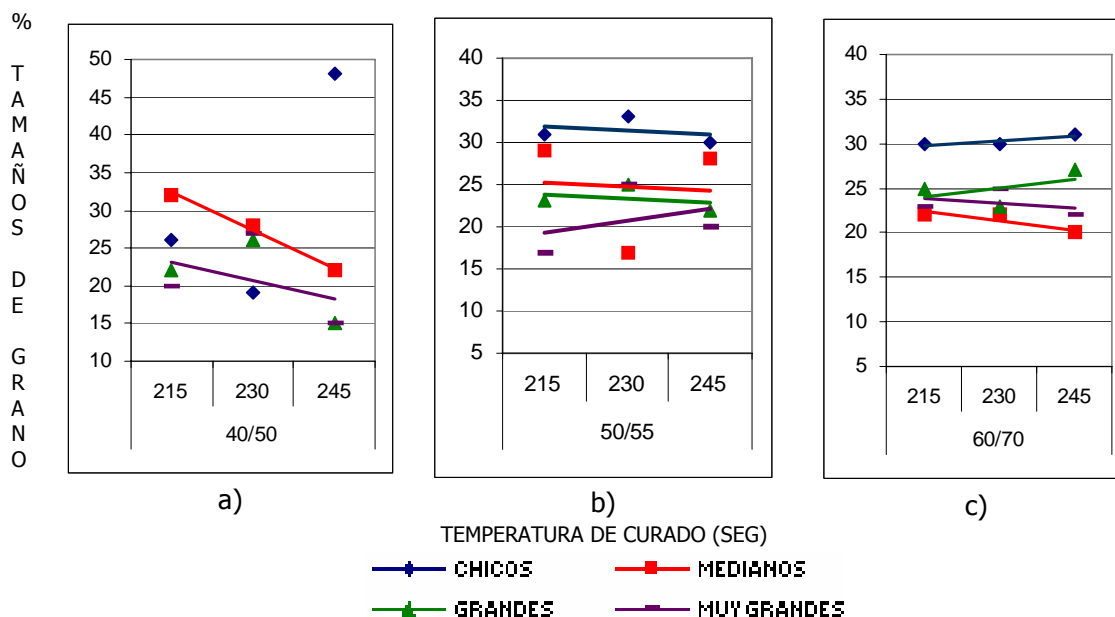
capa de arena que estuvo en contacto con la caja elimina la excesiva generación de gases promoviendo la disipación lenta de la energía del metal al molde. Al aumentar el tiempo de curado aumenta la cantidad de granos pequeños y muy grandes debido a una mejor estabilidad térmica, gracias a un mayor grado de transformación de la resina, obteniéndose así un mejor curado del molde.

La granulometría mediana (50/55) tiene el comportamiento similar a la gruesa (40/50) de aumentar el número de granos pequeños y muy grandes conforme aumenta el tiempo de curado en los moldes al tener moldes más consistentes y una mayor estabilidad térmica de la resina, Figura 13b.

La granulometría fina (60/70) mostró una excelente moldeabilidad incluso a tiempos cortos de curado al obtenerse moldes consistentes, Figura 13c, debido a la buena densidad de compactado que permite un curado uniforme a tiempos de reacción cortos.

### **5.2.5 Influencia de la temperatura de curado en la solidificación**

La temperatura de curado es la temperatura a la cual se encuentra la caja de moldeo al momento de vaciar la arena para formar el molde.



**Figura 14. Influencia de la temperatura de curado de los moldes en la solidificación de los granos en el metal. Las líneas muestran las tendencias de solidificación conforme se aumenta o disminuye la temperatura a la cual los moldes estuvieron en contacto con la caja caliente curando.**

La Figura 14 muestra el comportamiento de los tres sistemas con diferente temperatura de curado del molde. Se observa, que conforme aumenta la fineza de la arena la influencia de la temperatura es menor y se puede apreciar en una menor dispersión en el tamaño de grano en el metal. El sistema de arena mas grueso (40/50) es más sensible a la temperatura de curado; en la Figura 14a no se trazó una línea ni para los granos pequeños, ni para los grandes pues de 215°C a 230°C estos tamaños de grano no son comunes.

En investigaciones sobre las resinas furánicas [10] se encontró que la degradación que sufre la resina es causada por la volatilización de varios elementos. Aunque a mayor temperatura se espera una mayor pérdida en peso del molde dentro del intervalo de temperaturas tomado para los sistemas de



arena media y fina no hay un cambio significativo en la distribución de los granos de la superficie metálica, Figura 14a y 14c. La arena media (50/55) muestra tamaños con menor dispersión en las distribuciones menor conforme la temperatura aumenta lo que indica un mejor grado de compactación y curado. En cuanto a la arena fina (60/70), Figura 14c, muestran distribuciones de tamaños mas uniformes en todo el rango de temperatura que indica un mejor compactado y curado en la superficie en contacto con el metal.

### 5.3 La rugosidad promedio de las muestras de aluminio

Se realizó la medición de rugosidad de las muestras de aluminio utilizando un perfilómetro marca Mitutoyo MRS-80. Mediante esta técnica de medición fue posible obtener los intervalos de rugosidad promedio ( $R_a$ ) presentes en la pieza para los diferentes tipos de muestras.

El estándar de la American National Standards Institute (ANSI) B46.1-1995 determina un intervalo de rugosidad promedio ( $R_a$ ) para el proceso de fundición en arena entre 50 y 6.3  $\mu\text{m}$  siendo los valores más comunes entre 25 y 12.5  $\mu\text{m}$ , por lo que, los valores registrados en las muestras caen dentro de este intervalo. Se puede pensar que teóricamente la rugosidad mínima está determinada por el tamaño de grano de arena menor de la distribución y que la rugosidad máxima estaría determinada por el tamaño de grano de arena mayor de la distribución granulométrica pero estos son más grandes que la rugosidad

registrada en la superficie de las fundiciones ya que el término arena denomina tamaño y este va de 2 a 0.05 mm.

De esta manera los intervalos de rugosidad según la distribución granulométrica de la arena subangular son de 9.5 a 19.8  $\mu\text{m}$  para la arena 40/50, de 9.5 a 14.7  $\mu\text{m}$  para la arena 50/55 y de 8.9 a 13.3  $\mu\text{m}$  para la arena 60/70.

### 5.3.1 Influencia de la distribución granulométrica en la rugosidad promedio

De acuerdo a las tres granulometrías empleadas (40/50, 50/55 y 60/70), se observa que entre más fina la granulometría los intervalos de rugosidad presentes en las muestras disminuyen mejorando la textura de la pieza, Figura 15.

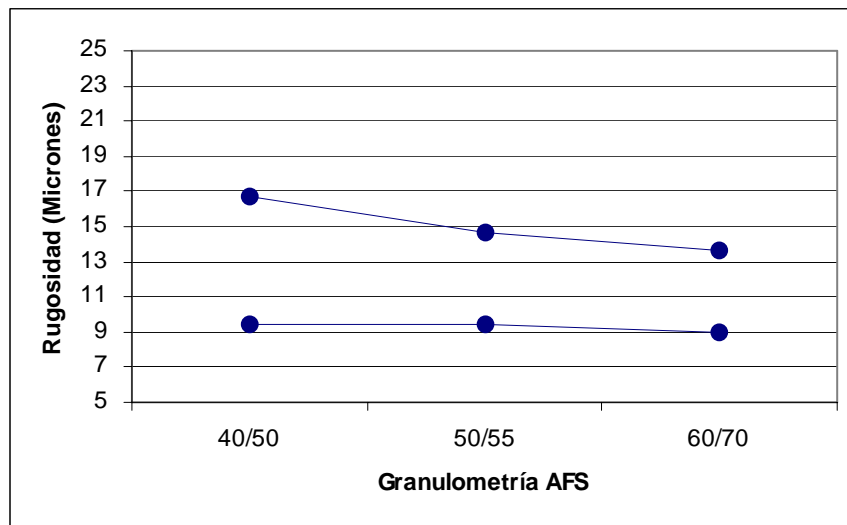


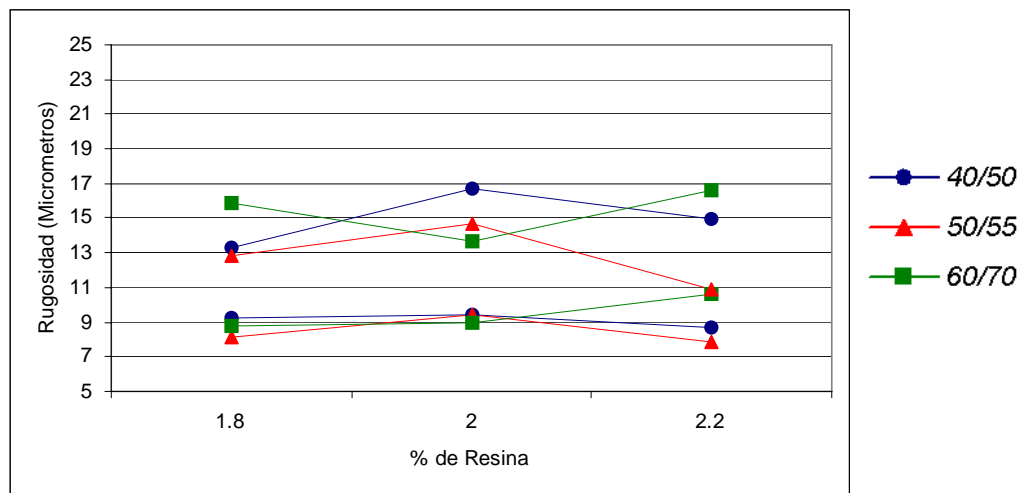
Figura 15. Comportamiento de los intervalos de rugosidad de acuerdo a la distribución granulométrica. Preparaciones con valores nominales.

Una característica a notar es que conforme aumenta la finura de la arena, el intervalo de rugosidades promedio se va haciendo más estrecho pero se observa que el intervalo de la granulometría 50/55 decrece abruptamente hasta estar cerca al intervalo de la arena 60/70, esto se debe a que la arena de granulometría 50/55 a diferencia de las otras dos tiene una distribución estrecha, es decir, de un 95% en tres mallas y media consecutivas, lo que trae consigo superficies más uniformes en su calidad [9]. La arena al ser más fina aumenta su área de contacto, obteniéndose moldes que generan superficies con buena textura y menos defectos superficiales por erosión durante el vaciado. Para la disminución en los intervalos de rugosidad se encuentra la relación con la clases de tamaño de la arena, así, para la arena de grano grueso el tamaño de grano en la muestra es muy grande, para la arena de grano medio el tamaño de grano en la muestra es grande y para la arena de grano fino los granos de la muestra son pequeños.

### **5.3.2 Influencia del porcentaje de resina en la rugosidad promedio**

Los datos experimentales, Figura 16, tienen un gráfico donde la influencia en el contenido de resina tiene variaciones en los intervalos de rugosidad, observándose que las granulometrías medias (40/50 y 50/55) presentan un comportamiento similar y la granulometría fina (60/70) presenta un comportamiento opuesto a estas. Este comportamiento esta ligado a la

influencia de los tamaños de grano que predominan en la superficie, ya que la influencia de los granos medianos y muy grandes predominan en la arena gruesa y los granos grandes y muy grandes en la arena media lo que explica el mismo comportamiento en sus intervalos pero diferente dispersión por las diferencias en los tamaños de arena.



**Figura 16. Comportamiento de la rugosidad de acuerdo al porcentaje de resina.**

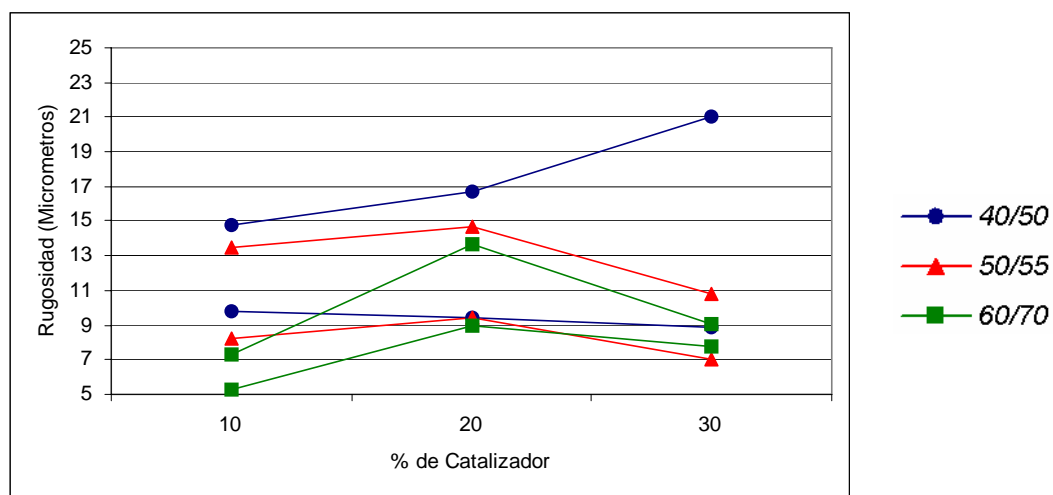
La arena 40/50 muestra que con 1.8% en el contenido de resina se obtiene una mejor textura libre de defectos superficiales como porosidad por gas o por granos incrustados debido a la erosión que sufre el molde durante el vaciado. A mayor cantidad de resina la dispersión en los valores de rugosidad promedio va aumentando pero se observa una superficie más plana producto de una capa más uniforme de resina.

La arena 50/55 muestra como un bajo contenido de resina produce una buena textura pero con defectos por granos incrustados debido a la erosión y la falta de resina. Al aumentar el contenido de resina a 2% aumenta la dispersión en los valores de rugosidad influenciado por la cantidad de defectos presentes por granos incrustados. El defecto por incrustación es más marcado con al aumentar a 2.2% el contenido de resina observándose poros producto de una menor permeabilidad del molde debido al exceso de resina lo que registra una disminución en la dispersión de valores de rugosidad pero una mejora en el intervalo de rugosidad promedio de la pieza.

Mientras los datos de la experimentación muestran que para la granulometría más fina 60/70 con porcentajes de resina de 1.8% presenta el mayor intervalo de rugosidad provocado por falta de resina y la aparición de un mayor tamaño de grano. Al aumentar el porcentaje de resina a 2.0% el valor de los intervalos de rugosidad decrece gracias a la mayor cantidad de resina y a la generación de una mayor cantidad de gas lo que provoca un aumento del número de granos pequeños se unen formando una superficie más uniforme. Al aumentar a 2.2% el porcentaje de resina el intervalo de rugosidad registra una ligera disminución pero aumenta en su valor mínimo, este comportamiento es producto de una mayor generación de gas.

### 5.3.3 Influencia del porcentaje de catalizador en la rugosidad promedio

El catalizador es el reactivo que produce la reacción de polimerización de la resina dándole rigidez mecánica al molde y estabilidad térmica. Como ya hemos visto un factor importante que muestra influencia en la interfase molde metal es la generación de gases producto de reacciones en las partes con bajos grados de curado.



**Figura 17. Comportamiento de los intervalos de rugosidad de acuerdo al porcentaje de catalizador.**

La granulometría 40/50 muestra un aumento en la dispersión de los intervalos de rugosidad conforme aumenta el porcentaje de catalizador, Figura 17. Este comportamiento puede estar determinado por el exceso de resina que

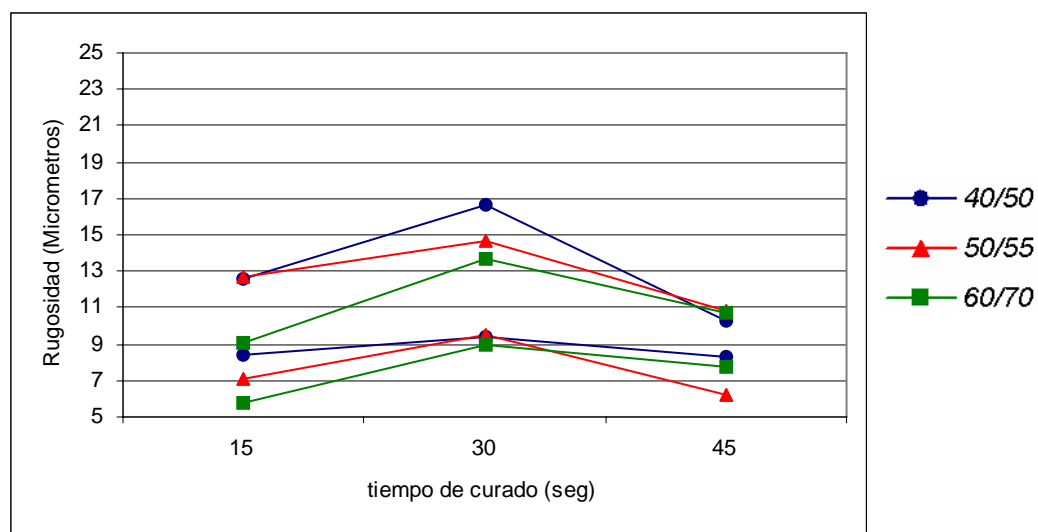
contiene este sistema y que influye en la permeabilidad del molde para dejar escapar los gases a través de él, y a la presencia de gradientes de curado.

La granulometría 50/55 tiene un comportamiento más estable, esto puede ser una característica más de los sistemas de distribución estrecha de tres mallas y media. La dispersión y los valores de rugosidad al aumentar de 10% a 20% en el contenido de catalizador tienen un ligero aumento producto de una mayor generación de gases, una disminución en los defectos por incrustación y una mayor cantidad de granos grandes en la superficie. De manera que a 30% el contenido de catalizador es suficiente para aglutinar bien los granos de arena, presentar pocos defectos por incrustación sobretodo por partículas más finas y una mayor generación de gases que promueve el crecimiento de granos pequeños y muy grandes lo que hace que el intervalo disminuya en su dispersión y sus valores.

En el caso de la 60/70 el contenido de resina es el óptimo y el comportamiento que muestra es más claro que el de la arena 50/55, mientras que con el mínimo contenido de catalizador la dispersión es baja y valores de rugosidad bajos, al aumentar el contenido de catalizador la dispersión y los valores de rugosidad aumentan pues el grado de reacción no es el suficiente para asegurar un curado homogéneo lo que produce un post-curado al vaciar el metal al molde.

### 5.3.4 Influencia del tiempo de curado en la rugosidad promedio

El tiempo de curado es el tiempo en que se deja reaccionar a la resina dentro de la caja caliente para que cure, y produzca la rigidez del molde. El efecto de esta variable con respecto a cualquier granulometría es la misma. Esto indica que el grado de curado va siendo el mismo a medida que aumenta el tiempo sin importar la granulometría, Figura 20.



**Figura 20. Comportamiento de los intervalos de rugosidad de acuerdo al tiempo de curado del molde.**

El curado comienza en la superficie una vez que la arena está en contacto con la caja caliente, el tiempo de curado determina el grosor de la capa. A tiempos cortos esta capa de granos de arena será más delgada con respecto a un tiempo más largo. Se observa que el rango de valores de

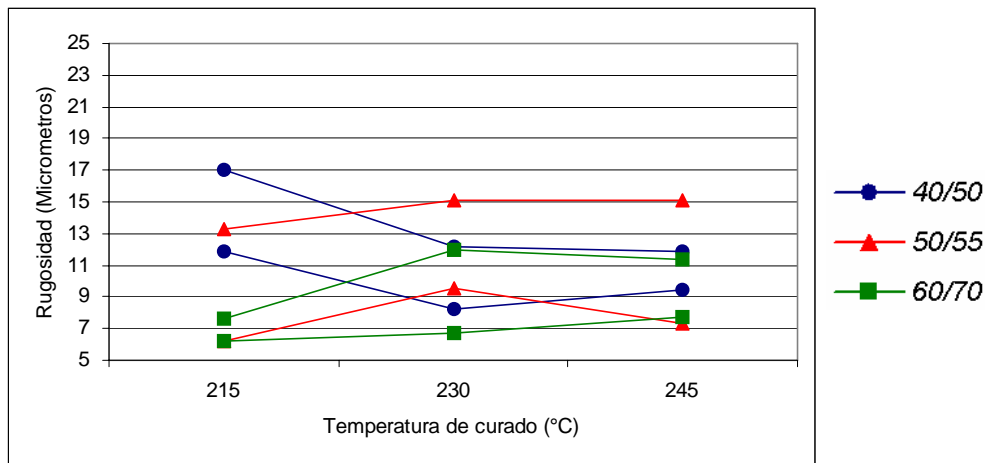


rugosidad es ligeramente menor a tiempos de curado de 45 segundos respecto a los valores de 15 y 30 segundos donde los moldes han curado en una capa gruesa alrededor del molde pero han quedado huecos por falta de un curdo suficiente lo que puede traer problemas de resistencia mecánica en los moldes en muestras mas grandes.

El punto medio de curado (30 segundos) muestra un punto de inflexión en los datos de Rugosidad como respuesta de la calidad superficial. Esto puede obedecer a una ayor interacción de gases en la interfase debido a la presencia de una capa con una bajo grado de curado pero con la suficiente rigidez para pegarse a la capa curada del molde, en cambio a 45 segundos se observa un mayor grado de curado en el molde y una menor influencia en la evolucion de gases en la superficie.

### **5.3.5 Influencia de la temperatura de curado en la rugosidad promedio**

La temperatura de curado determina la rapidez de la reacción de polimerización de la resina, los resultado de la experimentación muestran, Figura 21.



**Figura 21. Comportamiento de los intervalos de rugosidad de acuerdo a la temperatura de curado.**

La granulometría de la arena 40/50 presenta intervalos de rugosidad promedio que disminuyen conforme aumenta la temperatura de curado.

El comportamiento para la arena 50/55 es muy regular en cuanto a su dispersión de valores de rugosidad. La variación más significativa en los valores de rugosidad promedio es debido a que los granos chicos del metal son los que predominan en moldes curados a 230°C.

Por último, el comportamiento de la arena 60/70 indica que la granulometría sí es determinante en el comportamiento de la temperatura de curado. La estructura predominante en este sistema es la de tamaños de grano pequeños, diferencias en los intervalos, y presencia de defectos que indican un sobrecurado.

## **Capítulo 6**

### **Conclusiones**

#### **6.1 Introducción**

El objetivo del presente trabajo consistió en determinar la influencia que tiene la preparación y la composición del molde, de acuerdo a cinco parámetros que influyen en la calidad superficial de las piezas vaciadas de aluminio, en particular en su rugosidad promedio y en su microestructura.

El análisis de la microestructura de las superficies de las fundiciones mostró la presencia de estructuras granulares con tamaños que van desde 5 hasta 430  $\mu\text{m}$ , siendo los más comunes entre 5 y 320  $\mu\text{m}$ .

Generalmente se asume que el empleo de granulometrías finas de arenas producen acabados más lisos, sin embargo este trabajo muestra que esto no es del todo correcto, ya que en realidad se hacen más estrechos los intervalos de rugosidad promedio en la pieza. A mayor fineza de la arena, la morfología superficial tiende a tener una distribución donde predominan granos de tamaño

pequeño, mientras que las arenas gruesas muestran una morfología donde tiende a predominar la solidificación de granos de tamaño muy grandes.

En sí se encontró que si la distribución de granos tiende a los tamaños pequeños y medianos la rugosidad promedio tendrá intervalos pequeños y valores mínimos, en cambio sí la distribución de granos tiende a los tamaños grandes y muy grandes la rugosidad promedio tendrá intervalos grandes y valores máximos.

El porcentaje de resina influye en la disipación de energía del metal al solidificar, conforme aumenta la fineza de la arena y las superficies son más compactas y uniformes, existe una mayor rapidez en la transferencia de calor del metal al molde.

En cuanto al catalizador se observó que un exceso de catalizador llega a tener una importante contribución en la evolución de gases en el molde durante el vaciado. Los sistemas de arena media y fina se benefician con altos contenidos de catalizador ya que su rugosidad promedio disminuye lo que puede ser ventajoso para el acabado superficial pero no así en los costos de producción.

El tiempo de curado tiene la misma influencia para cualquier sistema de arena.

Se comprobó que las arenas con distribución de tres mallas y media presentan defectos superficiales por partículas de arena sueltas durante el vaciado, lo que se conoce comúnmente como "costra". Todas las muestras de este sistema presentaron defectos en su calidad superficial por este fenómeno. También se comprobó que se mejora el grado de compactación, dando así, una mayor facilidad en el moldeo de este sistema de arena.

Cuando el sistema de arena es de partículas gruesas la temperatura de curado del molde afecta a la pieza vaciada. Los sistemas de cuatro mallas muestran una mejor calidad superficial ante la variación de la temperatura de curado.

Una limitación que se encontró en la realización del presente trabajo es que el valor de rugosidad promedio ( $R_a$ ) limita la información en cuanto a la forma del perfil éste parámetro se utilizó debido a que es por el momento la única referencia estandarizada para superficies fundidas.

## Referencias Bibliográficas

- [1] ASM Handbook, Casting, Vol.15, 1988, pp. 15-44, 209-285,544-557.
- [2] Delannoy P., Stefanescu D.M., Pivonka T.S., "A Critical Literature Review of Theories for the Formation of Casting Metal Penetration Defects", AFS.
- [3] Hoar T.P. y D.V. Atterton, "Penetration of Molten Metal into Compacted Sand", Journal of the Iron and Steel Institute (September 1950) pp. 6-7.
- [4] Wagner C.G., "Observations on the Penetration of Steel into High Density Clay Bonded Molds with Controlled Atmospheres", AFS Transactions, Vol. 87, 1979, p.573.
- [5] Aguilar Juan J., "Curso de los Procesos de Moldeo y Corazones", AFS Región Saltillo, 1992.
- [6] Levelin, H.G. y H van der Berg, "Casting Defects Due to Hard Moulds", Proceedings of the Disamatic Convention, 1973, pp. 401-406.
- [7] Krishnamoorthy A.R., "Unit Sand Control –Part I", Foundry, Vol.12, Jan/Feb 2000, No.1, pp.17-23.
- [8] Z. Janjusevic et al., "A Contribution to Study of Processes on the Steel Cast-Sand Mould Contact Surface during Casting, Materials Letters 45, 2000, pp. 234-235.
- [9] AFS Technical Department, "Casting Answer and Advice", Modern Casting, Vol. XX, 2000.
- [10] Critchley J.P., Knight G.J., Wright W.W., "Heat Resistant Polymers", 1983, pp. 53-57.

## Índice de Figuras y Tablas

	Descripción	Página
Figura 1	Clasificación de la forma de granos de las arenas	10
Figura 2	Incremento volumétrico de la sílica cristalina o cuarzo alfa	16
Figura 3	Defectos principales de penetración de metal en el molde	18
Figura 4	Vista lateral de la caja cilíndrica utilizada para el moldeo	27
Figura 5	Esquema del arreglo del termopar en la caja caliente.	28
Figura 6	Esquema del arreglo del molde durante el vaciado.	29
Figura 7	Zonas de análisis de rugosidad y microscopía óptica	30
Figura 8	Distribución de diámetros promedio presentes en las muestras de aluminio vaciadas en moldes de arena fabricados por el método de caja caliente.	34
Figura 9	Influencia del tamaño de las partículas de arena (granulometría) en la solidificación del metal. Las líneas muestran las tendencias de solidificación conforme se aumenta o disminuye el tamaño de las partículas de arena	37
Figura 10	Microporosidad (zona entre granos muy difusa) debida a los gases generados en la interfase molde/metal	39
Figura 11	Influencia del porcentaje de resina en la solidificación de los granos en el metal.	40
Figura 12	Influencia del contenido de catalizador en la solidificación de los granos en el metal	42
Figura 13	Influencia del tiempo de curado de los moldes en la solidificación de los granos en el metal	44

Figura 14	Influencia de la temperatura de curado de los moldes en la solidificación de los granos en el metal	46
Figura 15	Comportamiento de los intervalos de rugosidad de acuerdo a la distribución granulométrica.	48
Figura 16	Comportamiento de la rugosidad de acuerdo al porcentaje de resina.	50
Figura 17	Comportamiento de los intervalos de rugosidad de acuerdo al porcentaje de catalizador.	52
Tabla 1	Valores nominales y asignados para cada preparación.	26



## Apéndice A

En este apartado se incluye el análisis granulométrico realizado a las diferentes arenas empleados en la fase experimental de este trabajo. El número de finesa de grano AFS (GFN/AFS; Grain Fineness Number) es aproximadamente el número de mallas por pulgada de la criba que pasaría la muestra si sus granos fueran de tamaño uniforme.

$$\text{Número de finesa AFS} = \frac{\text{Total Producto}}{\% \text{ total de granos retenido}}$$

### Arena 40/50

Tamaño de muestra: 50.01 gr.

ASTM-11 TAMAÑO DE MALLA	Retención en malla Peso Acumulado	Retencion en Malla Peso Individual	% Individual	Multiplicador	Producto
6	0.00	0.00	0.00	3	0.00
12	0.00	0.00	0.00	5	0.00
20	0.04	0.04	0.08	10	0.80
30	1.75	1.71	3.42	20	68.45
40	9.00	7.25	14.51	30	435.35
50	22.39	13.39	26.80	40	1072.06
70	42.33	19.94	39.91	50	1995.60
100	49.04	6.71	13.43	70	940.15
140	49.94	0.90	1.80	100	180.14
200	49.96	0.02	0.04	140	5.60
270	49.96	0.00	0.00	200	0.00
PAN	49.96	0.00	0.00	300	0.00
TOTAL	49.96	49.96	100		4698.16

Número de fines AFS= 47 AFS/GFN

% de arcilla = 0.1 %

## Arena 50/55

Tamaño de muestra: 100.01 gr.

ASTM-11 TAMAÑO DE MALLA	Retención en malla Peso Acumulado	Retencion en Malla Peso Individual	% Individual	Multiplicador	Producto
6	0.00	0.00	0.00	3	0.00
12	0.00	0.00	0.00	5	0.00
20	0.00	0.00	0.00	10	0.00
30	0.00	0.00	0.00	20	0.00
40	2.80	2.80	2.80	30	84.00
50	26.50	23.70	23.70	40	948.00
70	77.30	50.80	50.80	50	2540.00
100	98.00	20.70	20.70	70	1449.00
140	99.80	1.80	1.80	100	180.00
200	100.00	0.20	0.20	140	28.00
270	100.00	0.00	0.00	200	0.00
PAN	100.00	0.00	0.00	300	0.00
TOTAL	100.00	100.00	100.00		5229.00

Número de fines AFS= 52 AFS/GFN

% de arcilla = 0.1 %

## Arena 60/70

Tamaño de muestra: 50.01 gr.

ASTM-11 TAMAÑO DE MALLA	Retención en malla Peso Acumulado	Retencion en Malla Peso Individual	% Individual	Multiplicador	Producto
6	0.00	0.00	0.00	3	0.00
12	0.00	0.00	0.00	5	0.00
20	0.00	0.00	0.00	10	0.00
30	0.09	0.09	0.18	20	3.60
40	0.53	0.44	0.88	30	26.42
50	5.47	4.94	9.89	40	395.52
70	23.17	17.70	35.43	50	1771.42
100	41.09	17.92	35.87	70	2510.81
140	48.85	7.76	15.53	100	1553.24
200	49.89	1.04	2.08	140	291.43
270	49.91	0.02	0.04	200	8.01
PAN	49.91	0.00	0.00	300	0.00
TOTAL	49.91	49.91	99.90		6560.45

Número de fines AFS= 66 AFS/GFN

% de arcilla = 0.1 %

## Apéndice B

En este apartado se incluye el boletín técnico de la resina y el catalizador utilizados, esta información fue editada en su forma de presentarse para poder incluirla en este trabajo

Resina RFRM-44

Proveedor: Feno Resinas, S.A. de C.V.

### 1. Información General

Es una resina furánica líquida diseñada para el sistema Hot Box conjuntamente con el catalizador CFRM-612, con bajo contenido de nitrógeno y formaldehído.

### 2. Aplicación

Se utiliza en la fabricación de corazones para fundición de todos los metales.

### 3. Identificación de materiales peligrosos

Formaldehído      6.0 % max.

Alcohol Furfílico      3.0 % max.

## **Acerca del Autor**

Román Jabir Nava Quintero nació el 30 de junio de 1977, en la Cd. De México. Sus padres son: Jorge Román Nava Sánchez y Luz Amelia Quintero de Nava.

Estudio la carrera de Ingeniero Mecánico Electricista en la Facultad de Ingeniería Mecánica del semestre Agosto 1995 a Diciembre del 2000.