



---

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**CARACTERIZACIÓN Y EFECTO DE LAS PINTURAS REFRACTARIAS SOBRE LA CALIDAD MACRO Y MICRO ESTRUCTURAL EN PIEZAS FABRICADAS DE ALUMINIO COMERCIAL A356, MEDIANTE EL PROCESO DE LOST FOAM**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO**

**PRESENTA**

**RICARDO GUTIÉRREZ HERNÁNDEZ**



**MÉXICO, D.F.**

**AÑO 2014**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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:** M. en M. Arturo Alejandro Sánchez Santiago  
**VOCAL:** M. en M. Juan Manuel De la rosa Canales  
**SECRETARIO:** M. en I. Agustín Gerardo Ruiz Tamayo  
**1er. SUPLENTE:** M en I. Luis Darío Escobar Mejía  
**2° SUPLENTE:** M. en M. Eusebio Cándido Atlatenco Tlapanco

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

Laboratorio 003 y 009 Planta baja y talleres pesados, Edificio D, Facultad de Química, UNAM

**Asesor:**

M. en I. Agustín Gerardo Ruiz Tamayo

---

**Supervisor técnico:**

M. en I. Eusebio Cándido Atlatenco Tlapanco

---

**Sustentante:**

Ricardo Gutiérrez Hernández

---

<b>Índice</b>	
<b>Resumen</b>	<b>5</b>
<b>Objetivos</b>	<b>7</b>
<b>Hipótesis</b>	<b>7</b>
<b>1.- Introducción</b>	<b>8</b>
<b>1.1.- Proceso Lost Foam Casting (LFC) o fundición a la espuma perdida</b>	<b>8</b>
<b>1.2.- Ventajas del proceso lost foam</b>	<b>10</b>
<b>2.- Antecedentes</b>	<b>11</b>
<b>2.1.- Procesos de fundición</b>	<b>11</b>
<b>2.1.1.- Moldeo en verde</b>	<b>12</b>
<b>2.1.2.- Moldes y fabricación de moldes</b>	<b>13</b>
<b>2.1.3.- Die casting</b>	<b>15</b>
<b>2.1.4.- Molde permanente</b>	<b>17</b>
<b>2.1.5.- Fundición por centrifuga</b>	<b>19</b>
<b>2.1.6.- Cera perdida</b>	<b>21</b>
<b>3.- Fundamentos teóricos</b>	<b>22</b>
<b>3.1.- Aleaciones base aluminio</b>	<b>22</b>
<b>3.1.1.- Aleación A356</b>	<b>23</b>
<b>3.2.- Tratamientos al metal líquido</b>	<b>25</b>
<b>3.2.1 Refinación de grano</b>	<b>25</b>
<b>3.2.2.- Efectos de los refinadores de grano</b>	<b>27</b>
<b>3.2.3.- Modificación del silicio</b>	<b>29</b>
<b>3.2.4.- Desgasificación</b>	<b>30</b>
<b>3.3.- Componentes en el proceso de lost foam</b>	<b>33</b>
<b>3.3.1.- Poliestireno</b>	<b>33</b>
<b>3.3.1.1.- Pre-Expansión</b>	<b>36</b>
<b>3.3.1.2.- Fabricación de modelos</b>	<b>36</b>
<b>3.3.1.3.- Envejecimientos del molde</b>	<b>36</b>
<b>3.3.1.4.- Ensamble</b>	<b>36</b>
<b>3.3.1.5.- Requisitos del adhesivo</b>	<b>36</b>

3.3.2.- Pinturas refractarias	37
3.3.2.1.- Agente refractario	38
3.3.2.2.- Agente de suspensión	38
3.3.2.3.- Agente dispersante	38
3.3.2.4.- Agente solvente	39
3.3.2.5.- Aditivos	39
3.4.- Etapas del proceso de lost foam	40
3.4.1.- Pintado y Secado	40
3.4.2.- Llenado y vibración	42
4.- Procedimiento experimental	44
4.1.- Preparación del Poliestireno Expandido(EPS)	45
4.2.- Pintado	46
4.3.- Preparación de la aleación	48
4.4.- Preparación de las muestras obtenidas	48
5.- Resultados y Análisis	49
5.2.- Espesores	50
5.2.- Pintura de Zirconio	51
5.3.- Pintura de Grafito	61
6.- Análisis Generales	68
7.- Conclusiones	70
Anexo I	71
Bibliografía	72

## **RESUMEN.**

El proceso de Fundición con Espuma Perdida o Lost Foam Casting (LFC) es un proceso de fundición relativamente sencillo, pero con las suficientes complicaciones en el momento de controlar todas las variables necesarias a fin de obtener un producto sano (libre de defectos externos e internos). Este proceso consiste en crear un modelo de poliestireno idéntico a la pieza final deseada. El conjunto (generalmente en forma de árboles) o las piezas a fabricar son recubiertos con pintura refractaria y posteriormente colocado dentro de un recipiente metálico, donde se cubre con arena sílice. En una etapa posterior, el conjunto de espuma es fundido y degradado químicamente al contacto con el metal líquido, tomando éste la forma del modelo y reproduciendo con precisión la forma de la pieza.

Los recubrimientos refractarios son sistemas complejos de componentes suspendidos, barros tixotrópicos en un agente portador, usualmente agua. La permeabilidad de los recubrimientos se da a partir del tamaño y forma del refractario utilizado, los más usados son: sílice, alúmina, mica, zircón, cromita, carbón y aluminosilicatos complejos. El refractario resiste la penetración y la reacción con el metal. El recubrimiento contiene un dispersante para mantener el refractario en suspensión en el barro.

La pintura refractaria tiene como finalidad el dar soporte a la pieza, con ayuda de la arena, mientras está en estado líquido y al mismo tiempo tiene que ser permeable, al paso de los gases generados por la descomposición del poliestireno. No debe reaccionar con dichos gases ni con el metal fundido, por lo que se debe tomar en cuenta el metal empleado [1].

Existen varios métodos para la aplicación del recubrimiento refractario: aplicado mediante inmersión de la pieza en la pintura refractaria, método que es considerado más rápido que la aspersion o el uso de la brocha. El recubrimiento aplicado posee altos porcentajes de humedad, por lo tanto el modelo recubierto debe ser sometido a un secado en horno, el cual debe realizarse colocando los modelos de manera que se sequen uniformemente mediante aire forzado a una temperatura moderada entre 50 °C y 60 °C y un tiempo que va de 2 a 6 horas.

En el desarrollo del proyecto de tesis, se caracterizaran los efectos de dos pinturas refractarias: Pintura de zirconio base agua y pintura de grafito base alcohol, sobre la calidad micro y macro estructural en piezas de aluminio comercial mediante el método lost foam.

Se encontró que las condiciones para una mayor calidad micro estructural y macro estructural son: pintura de zirconio y aplicar 3 inmersiones (2400-2500µm de espesor), con una desgasificación de 8 minutos. Con esto la capa de pintura es suficientemente resistente y su efecto en la permeabilidad no es perjudicial.

## **OBJETIVOS.**

- Evaluar el tipo de pintura refractaria, zircón base agua y grafito base alcohol, sobre la calidad superficial en piezas obtenidas por el proceso de Lost Foam.
- Evaluar el efecto del espesor de pinturas refractarias, zircón base agua y grafito base alcohol, sobre la calidad superficial en piezas obtenidas por el proceso de Lost Foam.
- Evaluar el efecto de la desgasificación en la calidad microestructural de pieza obtenidas por el proceso de Lost Foam.

## **HIPÓTESIS.**

El espesor de la capa de pintura en el proceso de Lost Foam tiene un efecto en la permeabilidad durante la combustión de poliestireno expandido (EPS).



## **1.- INTRODUCCIÓN.**

### **1.1.- Proceso Lost Foam Casting (LFC) o fundición a la espuma perdida.**

La utilización de modelos destruibles apareció en 1985, cuando se registró una patente en la que se describía como el modelo se rodeaba de una arena con resinas sintéticas que actuaban de aglutinante, de manera que el metal fundido se cuela directamente sobre el modelo, el cual se degrada térmicamente y es remplazado por el metal que al solidificar da lugar a la pieza metálica. Posteriormente se propuso efectuar el recubrimiento con arena refractaria exenta de aglutinante. El recubrimiento inicial del modelo se hace habitualmente con una pintura o pasta refractaria que consistente en materiales silíceos finamente divididos y un líquido de transporte que suele ser agua o alcohol. Posteriormente se recubre con arena refractaria que se compacta por vibración.

En la actualidad existen en el mundo alrededor de 30 empresas que utilizan dicho proceso [1]. El proceso LFC generalmente es utilizado para la producción de piezas que requieren buenos acabados y tolerancias muy estrechas, también es usado cuando se quiere implementar una producción en línea dentro de una empresa de fundición porque trae grandes beneficios para tirajes de producción largos donde se producen las mismas piezas o de similares cualidades.

El Moldeo de Espuma Perdida es un proceso que está ganando confianza entre los fabricantes y tiene muchas ventajas como la eliminación de los pasos de mecanizado, no usar núcleos o corazones y minimizar el impacto ambiental, debido al no usar aglutinante de moldeo y es utilizado para piezas de fundición de aleación de aluminio en las industrias automotriz y aeroespacial y están sustituyendo al acero forjado o hierro fundido para los más ligeros y más eficientes en combustible de automóviles.



**Figura1.-** Molde de EPS (izquierda), Pieza final obtenida a partir del molde anterior (derecha).

## 1.2.- Ventajas del proceso Lost Foam.

Actualmente la técnica LFC se encuentra en crecimiento y está siendo aceptada en muchas más empresas por las ventajas productivas que se muestran a continuación:

- Se evita el problema del almacenaje de los modelos.
- La precisión de las piezas coladas es grande, ya que la utilización del “unicel” o poliestireno permite tolerancias muy ajustadas.
- Se facilita el reciclado de la arena debido a la ausencia de aglutinante.
- La cantidad de arena empleadas es generalmente, menor que en un método tradicional.
- Los modelos pueden prepararse uniendo partes más sencillas con adhesivos adecuados, como se muestra en la figura 1.
- Mejores condiciones de acabado superficial que con el moldeo de arena superficial, y ausencia de rebabas y líneas de partición en la pieza final.
- Libertad de diseño, siendo ésta prácticamente ilimitada.
- Eliminación de ángulos de salida.
- Eliminación de líneas de partición.
- Eliminación de maquinado.
- El monto de la inversión para una fundición de cierta capacidad que reporta la literatura técnica, es entre 1/2 y 1/4 de monto de una equivalente de arena en verde.

## **2.- Antecedentes**

### **2.1.- Procesos de fundición**

Los procesos de fundición se pueden clasificar según el tipo de molde que utilicen: moldes permanentes y no permanentes.

Los procesos de molde no permanente indica se realizan para obtener la pieza fundida se debe destruir el molde en el que se fabricó, lo que implica que se debe crear un nuevo molde para la fabricación de piezas posteriores.

En los procesos de fundición en molde permanente, el molde está fabricado en un material resistente como el metal o la cerámica, que permite usarlo en repetidas ocasiones, lo que reduce el tiempo de producción.

Existen varios métodos de fabricación para la obtención de piezas de aleaciones base aluminio, por mencionar algunos:

- Moldeo en verde.
- Die casting.
- Molde permanente.
- Fundición centrífuga.
- Cera perdida.
- Lost foam.

A continuación se describen los procesos antes mencionados.

### **2.1.1.- MOLDEO EN VERDE.**

La fundición en arena es el proceso más utilizado, la producción por medio de este método representa la mayor parte del tonelaje total de fundición. Casi todas las aleaciones pueden fabricarse en arena en verde; de hecho, es uno de los pocos procesos que pueden usarse para metales con altas puntos de fusión, como son el acero, hierros colados, aleaciones base aluminio, aleaciones base níquel y titanio. Su versatilidad permite fundir partes muy pequeñas o muy grandes y en cantidades de producción que van de una pieza a millones de éstas.

La fundición en arena consiste en vaciar el metal fundido a un molde de arena sílice, con cierto porcentaje de humedad y una mezcla de minerales la cual está contenida en cajas metálicas conocidas como cope y drag (caja superior, caja inferior), dejarlo solidificar y romper después el molde para remover la fundición. Posteriormente la fundición pasa por un proceso de limpieza e inspección, y en ocasiones requiere un tratamiento térmico para mejorar sus propiedades metalúrgicas.

Una de las partes más importantes en este proceso es la fabricación del molde, ya que este debe resistir la presión del metal, de lo contrario se puede producir sobredimensionamiento, inclusiones de arena o deformidad en la pieza final.

### **2.1.2.- Moldes y fabricación de moldes.**

El molde es una cavidad que tiene la forma geométrica de la pieza que se va fundir. La arena usada en fundición es de sílice ( $\text{SiO}_2$ ) o sílice mezclada con otros minerales. Esta arena debe tener buenas propiedades refractarias, expresadas como la capacidad de resistir altas temperaturas sin fundirse o degradarse. Otras características importantes son: el tamaño del grano, la distribución de tamaños del grano en la mezcla y la forma de los granos. Los granos pequeños proporcionan mejor acabado superficial en la fundición, pero los granos grandes son más permeables, para que los gases escapen durante el vaciado.

Los moldes hechos de granos irregulares tienden a ser más resistentes que los moldes de granos redondos debido al entrelazado de los granos, pero esto tiende a restringir la permeabilidad.

En la fabricación del molde, los granos de arena se aglutinan por medio de una mezcla de agua y arcilla. La proporción típica (en volumen) es 90% de arena, 3% de agua y 7% de arcilla. Algunas veces se añaden a la mezcla de arena y aglutinante ciertos aditivos para mejorar las propiedades del molde como la resistencia y permeabilidad.

En forma tradicional para formar la cavidad del molde se compacta la arena alrededor del modelo en la parte superior e inferior de un recipiente llamado caja de moldeo. El proceso de empaque se realiza por varios métodos, el más simple es el apisonado a mano realizado por un operario. Además, se han desarrollado varias máquinas para mecanizar el procedimiento de empackado, las cuales operan por medio de los siguientes mecanismos: 1) compactación de la arena alrededor del patrón o modelo mediante presión neumática; 2) acción de sacudimiento, dejando caer repetidamente la arena contenida en la caja junto al modelo, a fin de compactarla en su lugar; y 3) lanzamiento, haciendo que los granos de arena se impacten contra el patrón a alta velocidad.

Los moldes de arena en verde se hacen de una mezcla de arena, arcilla y agua, el término "verde" se refiere al hecho de que el molde contiene humedad al momento del vaciado y no fue sometido a ningún tipo de horneado. Los moldes de arena verde tienen suficiente resistencia en la mayoría de sus aplicaciones, así como buena permeabilidad y reutilización, también son los menos costosos. Por consiguiente, son los más ampliamente usados, aunque también tienen sus desventajas. La humedad en la arena puede causar defectos en algunas fundiciones, dependiendo del metal y de la forma geométrica de la pieza.

### **2.1.3.- Die Casting.**

El proceso tradicional de Fundición a Presión consiste en la inyección a alta presión de una aleación de metal fundido en un molde de acero (conocido también como herramienta o molde). Ésta se solidifica rápidamente (en unos cuantos segundos) para producir un componente de forma final que es extraído automáticamente a continuación.

La mayoría de los componentes de zinc, y de los componentes no férreos en general, se producen mediante el proceso de fundición a alta presión.

Existen dos procesos básicos de fundición a presión, que se diferencian solamente por el método de inyección del metal: cámara caliente y cámara fría.

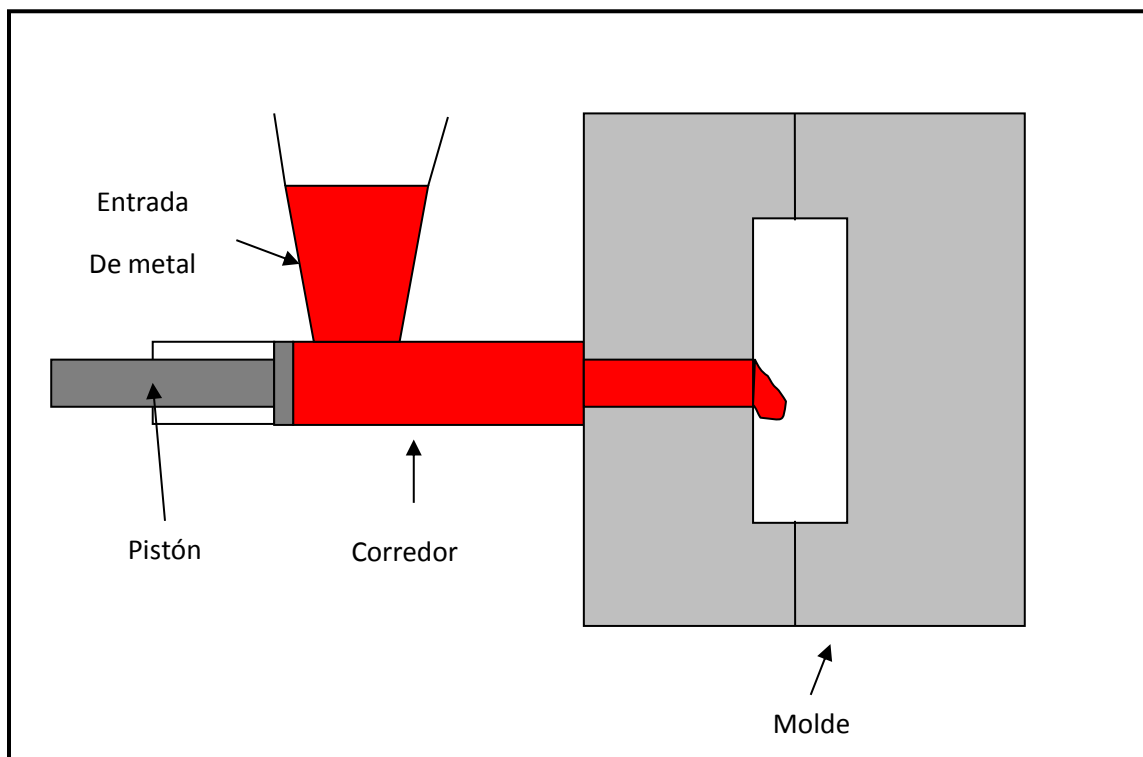
El proceso en cámara caliente se utiliza solamente para aleaciones de zinc (excepto la ZA-27) y aleaciones de magnesio AZ-91. Para las aleaciones de aluminio se puede utilizar solamente el proceso en cámara fría debido a que sus aleaciones erosionan el acero del mecanismo de inyección que se introduce en la cámara caliente.

La etapa del ciclo correspondiente a la inyección de metal normalmente concluye con una súbita intensificación de la presión sobre el metal. Esta presión se logra aumentando la presión hidráulica del émbolo, que obliga a una cantidad adicional de metal a penetrar en la cavidad del molde para compensar la contracción que se produce durante la solidificación. Esto es beneficioso hasta el punto en que promueve el llenado completo de la cavidad del molde, y crea una densidad uniforme en el metal. Sin embargo, la intensificación excesiva no es aconsejable porque fuerza al metal fundido a introducirse entre los componentes del molde, provocando el desgaste del molde y una rebaba excesiva que tiene que ser eliminada posteriormente, como se muestra en la figura 2.



La presión máxima, multiplicada por el área proyectada de toda la colada, genera la fuerza que se aplica sobre la estructura de la máquina. Con frecuencia, esta presión dicta el tamaño de máquina que se necesita para hacer una pieza, por lo cual, influye en el costo del producto terminado.

Las máquinas se clasifican de acuerdo con la cantidad de toneladas de fuerza de fijación que pueden desarrollar durante el funcionamiento continuo a largo plazo. Normalmente, la pieza fundida es expulsada del molde, unida a cierta cantidad de material sobrante. Aquí se incluyen la compuerta, el canal de colada (que puede tener una galleta), cualquier rebosadero. Conjuntamente, todo este material (conocido como colada) es transferido a un canal o corredor que alimenta al molde.



**Figura 2.-** Representación del proceso de fundición por Die Casting.

#### **2.1.4.- Molde permanente.**

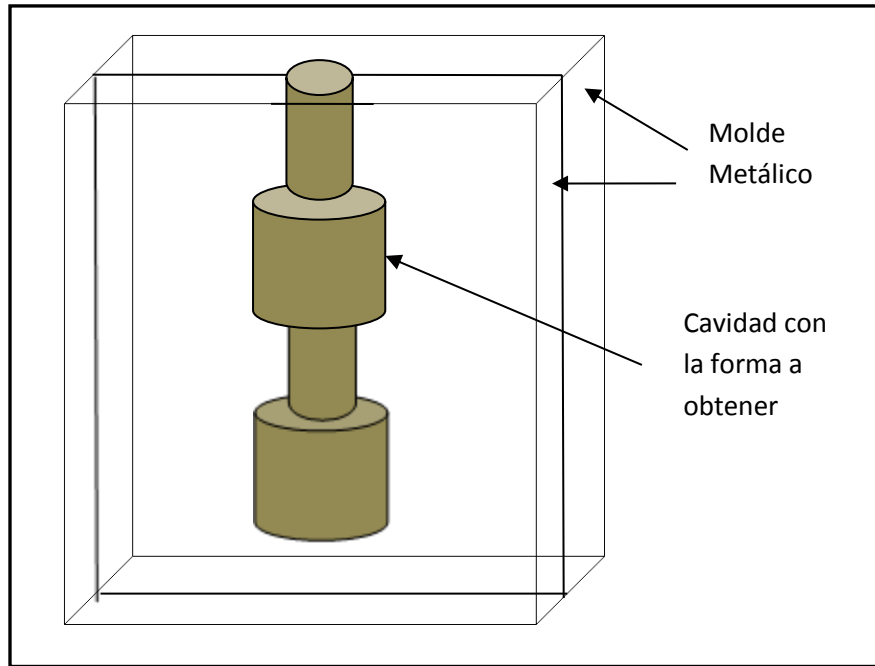
La mayoría de las piezas por este proceso se hacen con aleaciones a base de aluminio magnesio o cobre; así como también de fundición de hierro o acero, como se muestra en la figura 3.

Es necesario mantener a estos moldes a una temperatura alta y uniforme para evitar un enfriamiento rápido del metal [2].

En general es necesario recubrir las superficies de la cavidad con una fina lechada de refractario para evitar la adherencia y así prolongar la vida útil del molde.

Un molde de metal ofrece gran resistencia a la contracción de la fundición y solo se pueden colar formas simples.

Debe preverse la ventilación de los moldes ya que estos no son permeables. Hay diversas variantes del colado en molde permanente. Una es la de baño de metal que consiste en dejar el metal en el molde solidificando un casquete del espesor deseado, adyacente a la cavidad del molde. Luego se voltea el molde y se vuelca el metal sobrante obteniendo una pieza hueca.



**Figura 3.-** Representación del proceso de fusión en molde permanente.

Otra variedad utiliza un embolo que se empuja dentro de la cavidad del molde, cerrando alimentador y desplazando el metal fundido hacia los extremos de esta. Con este se obtiene una fina terminación y secciones delgadas.

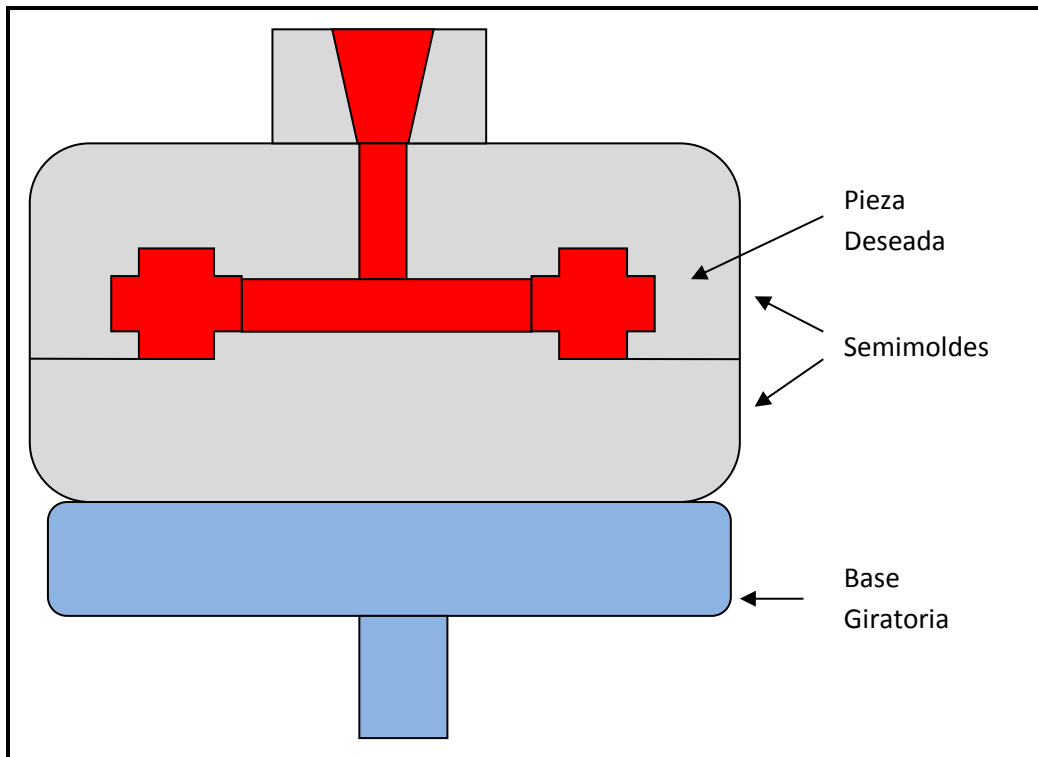
### **2.1.5.- Fundición por centrifugado.**

Utiliza la fuerza centrífuga para forzar el material fundido dentro de la matriz, el cual gira axialmente entre 300 y 3000 RPM, mientras se introduce el metal fundido, como se muestra en la figura 4.

Generalmente la forma exterior es redonda pero pueden ser hexagonales o de formas simétricas. En este tipo de fundición no se necesita molde ni núcleo para generar el interior de la colada. Cuando se usa un eje horizontal la superficie interior es siempre cilíndrica, en tanto si es vertical la superficie interior es una sección de parábola.

Cuando el metal es forzado contra las paredes solidificando primero el exterior las impurezas se agrupan en el interior por ser más livianas eliminándose con un maquinado posterior. Es un proceso de producción masiva, fabricándose tubería, cañones de armas, camisas de cilindros, etc.

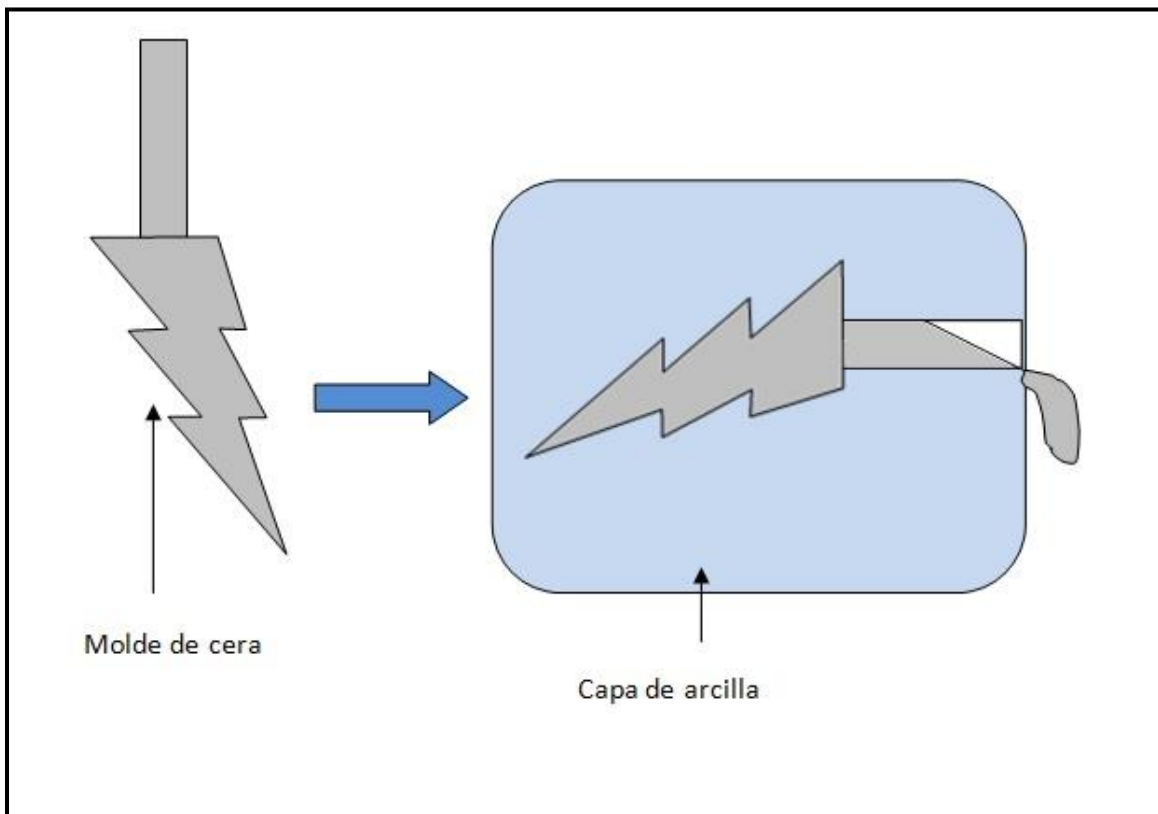
La fundición semicentrífuga usa esta fuerza para que el metal líquido fluya desde un depósito alimentador hacia uno o más moldes de arena que giran alrededor del eje central, obteniéndose formas simples.



**Figura 4.-** Representación del proceso de fusión por centrifugado.

### 2.1.6.- Cera perdida.

Es un método esencialmente utilizado para la fabricación de piezas complejas que no puedan extraerse de los moldes de los procesos anteriores, se utiliza comúnmente moldes de yeso o arcilla (patrón) en el cual se vierte la cera caliente, cuando solidifica se retira del cerámico y se recubre con una capa delgada de yeso, que se deja endurecer. Se pueden unir varios moldes de cera y posteriormente recubrirlos con yeso para obtener piezas aún más complejas. Finalmente se calienta el molde para retirar la cera y obtener el molde de yeso final. A este molde se le coloca en un recipiente con arena aplicando vibración para que llene los espacios exteriores del molde y de soporte adicional. Éste proceso es el más parecido a Lost Foam al ser de molde no permanente y el uso se materiales refractarios.



**Figura 5.-** Representación del proceso de fundición por cera perdida.

### **3.- Fundamentos teóricos.**

#### **3.1.- Aleaciones base aluminio.**

El aluminio es de gran importancia tanto en uso industrial como cotidiano, se obtiene del mineral Bauxita mediante el proceso Hall-Heroult, debido a que este mineral no se encuentra en nuestro país se debe importar o reciclar.

De acuerdo al Instituto Nacional de Ecología (INE), en México se consumen 277 mil 608 toneladas de aluminio, de las cuales la gran mayoría provienen de latas. Teniendo estas un consumo diario de 15 millones 400 mil latas en el país y solo menos de la mitad se reciclan [3].

El aluminio y sus aleaciones son muy usados en el ámbito industrial. Existen diversos métodos de obtención de piezas de estas aleaciones, las cuales pueden ser conformadas o fundidas [4]. Entre las piezas obtenidas por fundición están los siguientes sistemas de aleaciones:

- 1XX.X Aluminio puro (99% de Al).
- 2XX.X Aluminio-Cobre (Duraluminio).
- 3XX.X Aluminio-Silicio-Cobre (Si-Cu y/o Mg).
- 4XX.X Aluminio-Silicio (Al-Si).
- 5XX.X Aluminio-Magnesio (Al-Mg).
- 7XX.X Aluminio-Zinc (Al-Zn).
- 8XX.X Aluminio-Estaño (Al-Sn).
- 9XX.X Aluminio-Otros elementos (Al-X).

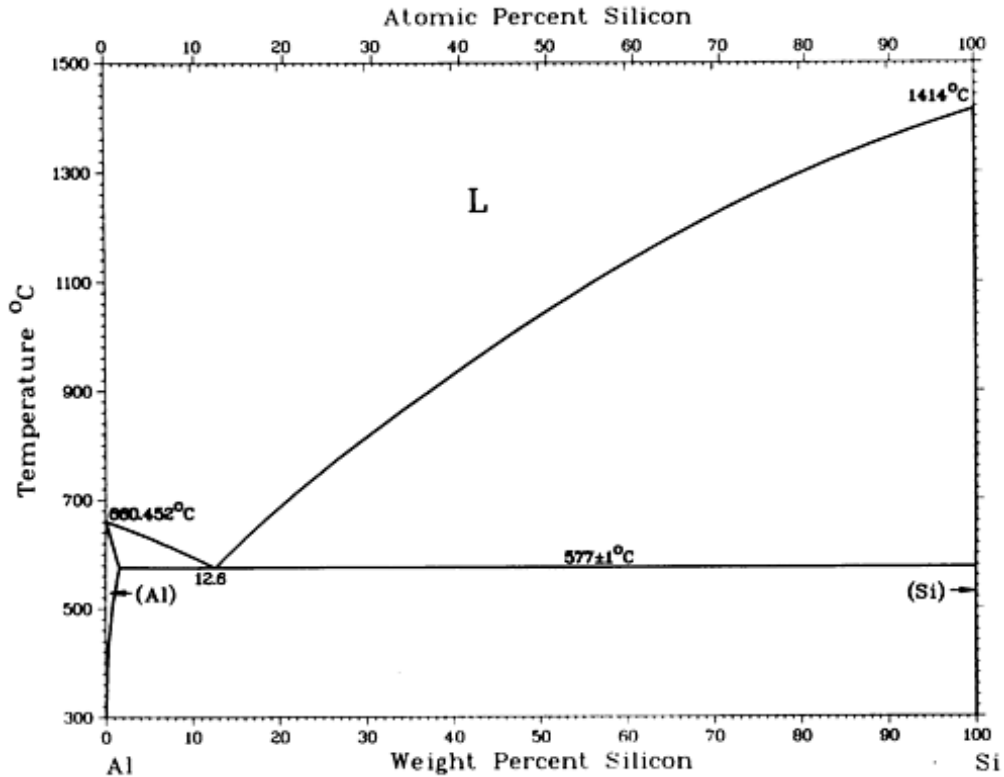
### **3.1.1.- Aleación A356.**

Entre los sistemas aleantes más importantes se encuentra el sistema aluminio-silicio. El silicio mejora la colabilidad de las aleaciones en general, entre otras características. Estas aleaciones presentan además buena resistencia al desgaste, pero baja resistencia a la fatiga y poca ductilidad conforme aumenta el contenido de silicio. Esto se debe a la morfología presentada por el silicio, la cual es acicular o laminar.

El sistema aluminio-silicio, presenta un punto eutéctico simple en su diagrama de fases, como se muestra en la Figura 6, permitiendo clasificar sus aleaciones en hipoeutécticas, eutécticas e hipereutécticas.

La aleación A356 es de naturaleza dendrítica presentando de 6.5-7.5% silicio, su morfología es laminar, la cual genera fragilidad y poco maquinabilidad, con bajas propiedades mecánicas en las piezas de ésta composición por lo que es necesario un tratamiento de modificación y refinación. En la tabla 1 se muestra la composición de la aleación A356.





**Figura 6.-** Diagrama de fases Al-Si.

**Tabla 1.-** Composición Química de aleación A356.

Elemento	Si	Cu	Mg	Zn	Mn	Fe	Ti
%	6.5-7.5	0.1 Max	0.3-0.4	0.05 Max	0.05 Max	0.12Max	0.2

Algunas de las principales piezas fabricadas en aluminio-silicio son:

Múltiples de admisión (Ford Canadá, Fiat-Italia, Citro en Francia); Tapas de cilindros (General Motors U.S.A.); Componentes para motores marinos (O.M.C. U.S.A); Intercambiadores de calor (Citro en Francia), Monoblocks de aluminio (Ford U.S.A, Fiat Italia).

En la fabricación de piezas de aluminio A356 es necesario realizar tratamientos al metal en estado líquido para obtener mejores propiedades mecánicas los cuales se describen en la siguiente sección.

### **3.2.- Tratamientos al metal líquido.**

Las propiedades mecánicas de las aleaciones Al-Si dependen principalmente del tamaño, forma y distribución de las partículas de silicio. Las partículas de silicio de segunda fase afectan la resistencia, tenacidad, ductilidad.

Los tratamientos del metal líquido realizados al aluminio son:

- Refinación de grano.
- Modificación del silicio.
- Desgasificación.

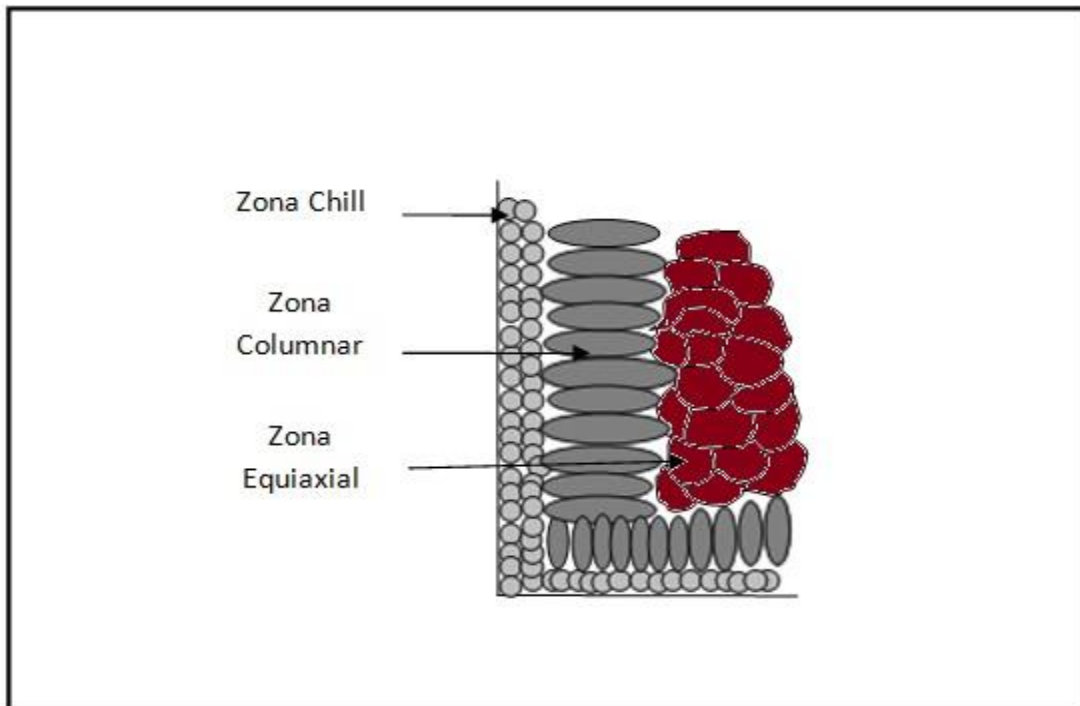
#### **3.2.1.- Refinación de grano.**

El refinamiento de aluminio primario, silicio y de la mezcla eutéctica mejoran las propiedades mecánicas. Se usan refinadores de grano y modificadores para el mismo objetivo.

El refinamiento de grano es una de las inoculaciones hechas en la operación de fundición para alterar la estructura del metal vaciado. Se hace para producir un grano fino y equiaxial durante la solidificación [5].

Durante la solidificación de una aleación se pueden originar la presencia de 3 zonas en la macroestructura:

- Zona Chill.
- Zona Columnar.
- Zona Equiaxial.



**Figura 7.-** Representación de las zonas en la solidificación.

Cada zona representa diferentes propiedades mecánicas, lo que se desea evitar en la fabricación de las piezas debido a las diferentes velocidades de solidificación. Existen diferentes formas para corregirlo, siendo el más empleado la adición de elementos aleantes que promueven sitios de nucleación y/o ampliar o reducir el rango de solidificación de la aleación, para obtener granos homogéneos.

### **3.2.2.- Efectos de los refinadores de grano.**

Normalmente se desea una estructura de grano equiaxial y fino en las piezas coladas de aluminio. El tipo y tamaño de granos formados son determinados por:

- La composición de la aleación.
- Rapidez de solidificación.
- Adición de aleaciones maestras (refinadores de grano), los cuales proveen sitios para la nucleación heterogénea de grano.

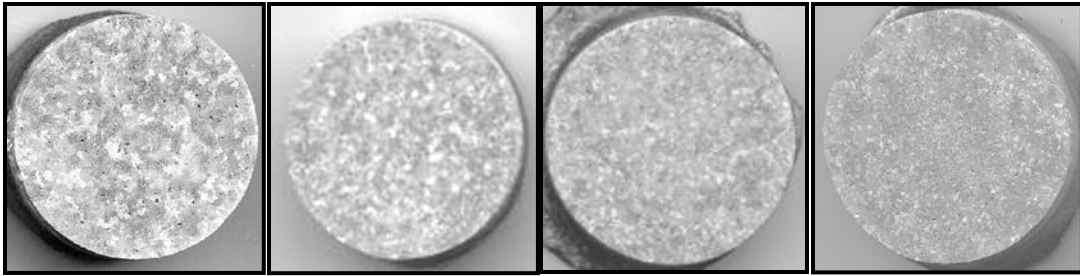
Un refinador de tamaño de grano promueve la sanidad de las piezas coladas minimizando la contracción por solidificación, la ruptura en caliente y la porosidad por hidrógeno. Las ventajas de la efectividad del refinamiento de grano son:

- Mejora de las características de alimentación.
- Mejora de las propiedades mecánicas.
- Incremento de la resistencia a la presión (recipientes).
- Mejora de la respuesta a los tratamientos térmicos.
- Mejora en la apariencia después de terminados químico, electroquímico y mecánico, superficial.

Bajo condiciones normales de solidificación la mayoría de los aleaciones comerciales sin refinadores de grano desarrollan estructura gruesas columnares y/o estructuras gruesas equiaxiales.

La estructura de grano grueso columnar es menos resistente a la fractura durante la solidificación y el enfriamiento en la postsolidificación que la estructura de grano bien refinado. Esto es debido a la poca resistencia a las fuerzas de tensión, a altas temperaturas, que se esperan como un resultado de la aumentada sensibilidad a la formación de límites de grano en estructuras de grano gruesas.

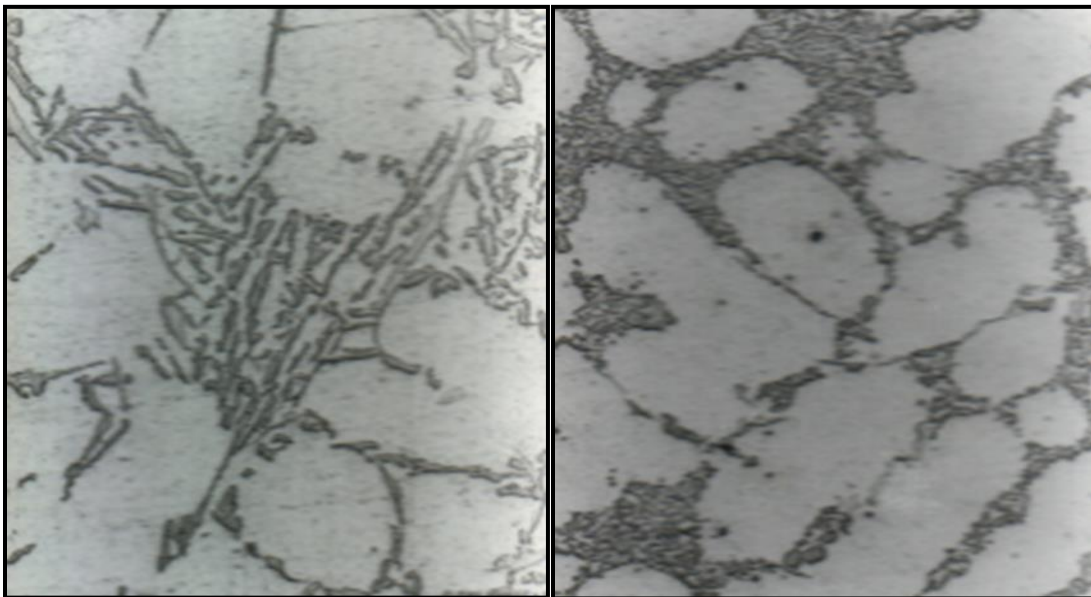
Para realizar la refinación se usan aleaciones comerciales de Ti y B, como AlTi5, AlTi6, AlTi10, AlB3, AlB4, AlB5.



**Figura 8.-** Diferentes porcentajes de Ti para aleación A356, 0%Ti, 0.05%Ti, 0.10%Ti, 0.20%Ti.

### 3.2.3.- Modificación del silicio.

Las aleaciones de aluminio-silicio son esenciales para los sectores automotriz, aeroespacial y de ingeniería. Sin embargo el silicio forma una fase en forma de agujas que reducen la resistencia al impacto de la pieza, esto se corrige con la adición de estroncio que modifica la forma en que solidifica dicha fase disminuyendo la forma alargada y puntiaguda, por una más redondeada mejorando la resistencia mecánica. Las aleaciones más usadas como modificadores son: Al-Sr3.5, Al-Sr5, Al-Sr10 y Al-Sr15.



**Figura 9.-** Aleación A356 sin modificar (izquierda), A356 con 0.04%Sr (derecha).

### **3.2.4.- Desgasificación.**

El aluminio y sus aleaciones se funden en hornos con crisol de grafito o de reverbero añadiéndose fundentes y desoxidantes especiales. Durante la fusión estas aleaciones tienen tendencia a absorber hidrógeno y monóxido de carbono procedentes de la combustión de los hidrocarburos, del carbón utilizado en el calentamiento del horno o del medio ambiente resultando piezas porosas. Por esta razón es conveniente mantener alejado el metal fundido de los gases de la combustión prefiriéndose cuando no es posible utilizar el horno eléctrico, en el que queda eliminado totalmente este riesgo, o el uso de hornos alimentados con gas u hornos de crisol donde la llama no entra en contacto con el metal.

El aluminio y sus aleaciones son muy susceptibles a absorber Hidrógeno durante la fusión y la colada [1]. Debido a que la solubilidad del Hidrógeno en el aluminio se incrementa exponencialmente al aumentar la temperatura, una gran cantidad de Hidrógeno es captado por el aluminio durante la fusión, mismo que es expulsado durante la solidificación formando burbujas; un porcentaje de éstas salen a la atmósfera, pero la cantidad remanente permanece en el aluminio causando porosidades en la pieza sólida, como se muestra en la Figura 10.

Las impurezas gaseosas, principalmente el hidrógeno producen porosidades en las piezas fundidas, la solubilidad del hidrógeno está en función de la temperatura, por lo que la gráfica de la figura 11, puede dar una idea de la cantidad de hidrógeno que estará disuelto en la aleación.

La formación de estas porosidades es promovida por la presencia de inclusiones en el metal, éstas actúan como nucleantes para las burbujas durante la solidificación, de ahí que el objetivo de la desgasificación sea tanto reducir el nivel del Hidrógeno en el metal líquido, como el de reducir el número de inclusiones.

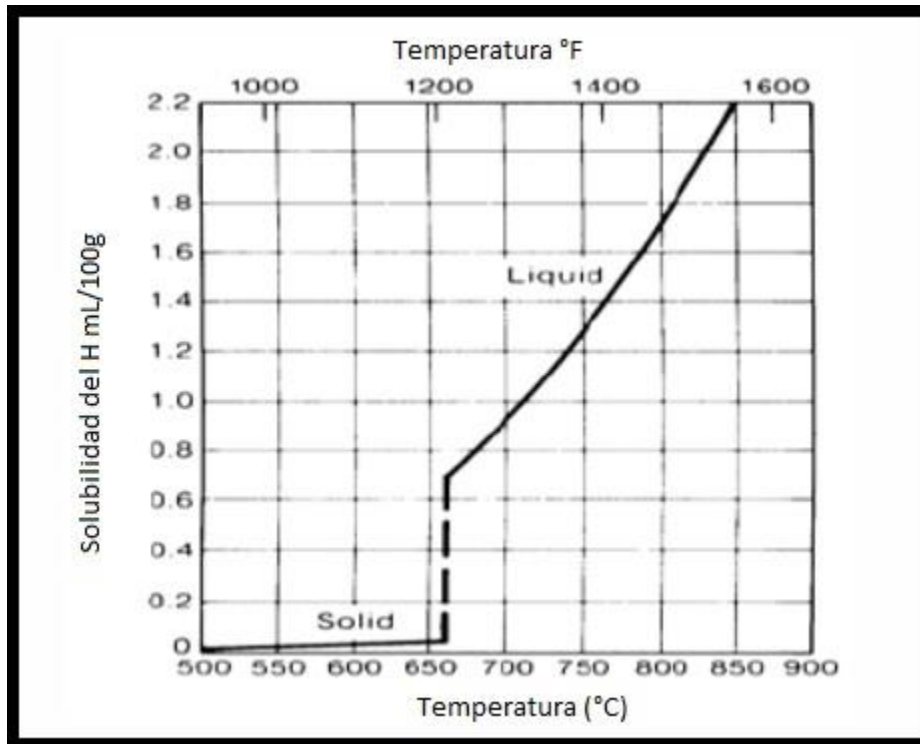
Los hornos de crisol para la fundición de aluminio tienen el inconveniente de que el metal está en contacto con la llama del quemador, si bien presenta grandes ventajas como su gran rapidez de fusión y gran producción horaria por kilogramo de combustible, resultan muy poco adecuados para la obtención de piezas sin porosidades y precisan una acción desgasificante enérgica y continua.

El proceso de desgasificación del aluminio consiste en la inyección de un flujo de gas de arrastre (Argón o Nitrógeno) en el aluminio fundido; dicha inyección debe llevarse a cabo antes de iniciar la colada del metal fundido. El mecanismo de desgasificación, consiste en la difusión del Hidrógeno a las burbujas del gas de arrastre, esto debido a las diferencias de presión parcial de Hidrógeno entre el gas de arrastre y el aluminio líquido.



**Figura 10.-** Aleación con tratamiento de desgasificación (izquierda), Aleación de aluminio sin desgasificación (derecha).





**Figura 11.-** Solubilidad del Hidrógeno en aluminio en función d ela temperatura.

La porosidad se piensa que es grave en las piezas coladas de aleación de Al producido por el proceso de espuma perdida debido a la pirólisis de la espuma de poliestireno patrón durante el vertido, lo que resulta en efecto perjudicial en las propiedades mecánicas [6]. El metal se solidifica antes de que los gases producidos por la espuma de poliestireno escapen a la interface metal-recubrimiento. Como la combustión de espuma de poliestireno líquido continúa, un volumen de producto de descomposición gaseoso puede quedar atrapado antes de la solidificación.

### **3.3.- Componentes en el proceso de Lost Foam.**

En el proceso de Lost Foam los componentes más importantes son:

- Poliestireno expandido ( o EPS por sus siglas en inglés).
- Pinturas.

#### **3.3.1.- Poliestireno.**

El poliestireno es un plástico que se obtiene por un proceso denominado polimerización, que consiste en la unión de muchas moléculas pequeñas para lograr moléculas muy grandes. La sustancia obtenida es un polímero y los compuestos sencillos de los que se obtienen se llaman monómeros, [6].

Es un sólido vítreo por debajo de 100 °C; por encima de esta temperatura es procesable y puede dársele múltiples formas, Este proceso es muy parecido al de sinterización por lo que se espera una porosidad en la pieza final de poliestireno.

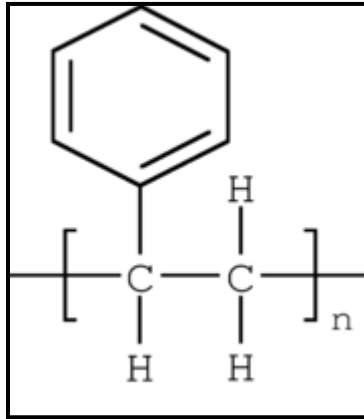
En la etapa final del proceso de producción de los modelos y antes de iniciar el ensamble, se realiza un control de densidad y de peso del modelo obtenido. En la densidad del polímero pre-expandido se controlan los espacios entre perlas. De la misma manera que se fabrican los modelos de las piezas, son obtenidos los conductos distribuidores donde se ensamblan finalmente los modelos para obtener los racimos. Existen varios grados de EPS, como se indica en la tabla 2. Los grados T y X son los preferidos ya que permiten la fabricación de modelos con superficies lisas y secciones de pequeños espesores [1].

**Tabla 2.-** Grados de poliestireno expandido.

<b>Grado de perla</b>	<b>Diámetro de la perla</b>		<b>Uso típico</b>
	<b>mm</b>	<b>in</b>	
<b>A</b>	<b>0.83-2.00</b>	<b>0.033-0.078</b>	<b>Aislamiento</b>
<b>B</b>	<b>0.58-1.2</b>	<b>0.023-0.047</b>	<b>Empaque</b>
<b>C</b>	<b>0.33-0.71</b>	<b>0.013-0.028</b>	<b>Vasos (café)</b>
<b>T</b>	<b>0.25-0.51</b>	<b>0.010-0.020</b>	<b>Espuma perdida</b>
<b>X</b>	<b>0.20-0.33</b>	<b>0.008-0.013</b>	<b>Espuma perdida</b>

Los productos y artículos acabados en poliestireno expandido (EPS) se caracterizan por ser extraordinariamente ligeros y resistentes, su densidad según la NORMA UNE 92.110, se encuentra en el intervalo que va desde los 10 kg/m<sup>3</sup> a los 50kg/m<sup>3</sup>. Estos productos también presentan una excelente capacidad de aislamiento térmico, esta buena capacidad de aislamiento se debe a la estructura del material que esencialmente consiste en aire dentro de una estructura celular, conformada por poliestireno. Aproximadamente un 98% del volumen del material es aire y únicamente un 2% material sólido.

La materia prima del EPS es un polímero que contiene un agente expansivo, se obtiene mediante un procedimiento de polimerización del monómero de estireno [C<sub>8</sub>H<sub>8</sub>] con adición de pentano [C<sub>5</sub>H<sub>12</sub>].



**Figura 12.-** Molécula de EPS.

Los EPS fabricados a base de este polímero poseen una estructura formada de millones de células, rellenas de aire y como puede verse en su molécula se trata de un hidrocarburo puro, no posee otros elementos químicos que carbono e hidrógeno, y ambos son materiales combustibles. El EPS se encoge rápidamente al acercarse a fuentes de calor, generando una lámina de poliestireno fundido.

El poliestireno expandido tiene solamente un 1.5 al 2.5% de su volumen, de material combustible, el resto es aire por lo que facilita su rápida combustión.

La temperatura de ignición del EPS estándar es de 360°C, esto indica que el poliestireno fundido se desintegra, los gases combustibles se forman alrededor de los 350°C.

Aunque la combustión del EPS produce humo negro, la toxicidad de los humos liberados es considerablemente menos a los liberados por otros materiales de uso común como la madera.

El procedimiento por el cual se obtienen los moldes de EPS es el siguiente:

#### **3.3.1.1- Pre-expansión.**

El proceso consiste en llevar la materia prima (poliestireno) en forma granular o perlas con una densidad adecuada y de allí aplicada dentro de un molde a presión de aire y vapor para la obtención de la forma.

#### **3.3.1.2- Fabricación de modelos.**

El proceso consiste en inyectar a la matriz las perlas pre-expandidas, seleccionadas de acuerdo a su densidad, tamaño y posteriormente son estabilizadas (tiempo óptimo 2 horas.); una vez llena la matriz, se hace pasar vapor de agua a través de ésta, para que por medio de calentamiento la perla continúe expandiéndose y forme el modelo integral.

#### **3.3.1.3.- Envejecimiento del modelo.**

Es un periodo de tiempo que permite que la perla expandida contraiga hasta las dimensiones adecuadas. Es necesario estandarizar este periodo de tiempo para cada tipo pieza. Al diseñar la matriz, se debe tomar en cuenta la contracción del metal y la contracción del modelo de espuma.

#### **3.3.1.4.- Ensamble.**

Una pieza puede estar formada por 2 o más partes moldeadas en diferentes matrices, en estos casos es necesario unir las partes para formar las piezas integrales por medio de un pegamento especial que no afecte la espuma. Asimismo los modelos tendrán que ser unidos a su sistema de alimentación.

#### **3.3.1.5.- Requisitos del adhesivo.**

El adhesivo debe tener ciertas características debido a que debe mantener las partes que conforman la pieza final y considerar que se incinerara.

- Cero cenizas.
- Compatible con el poliestireno.

### **3.3.2.- Pinturas refractarias.**

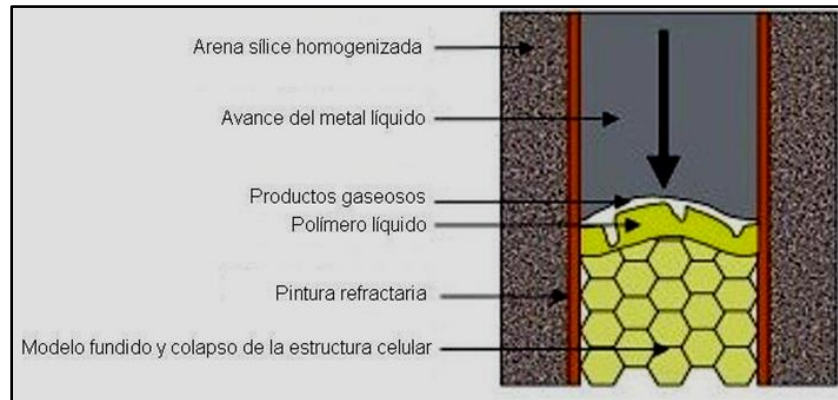
La pintura refractaria se define como: una mezcla líquida o semilíquida utilizada sobre la superficie de espuma de poliestireno expandido [7], que generalmente está constituida por los siguientes elementos o agentes:

- Agente Refractario.
- Agente de Suspensión.
- Agente Dispersante.
- Agente Solvente.
- Aditivos.

Las funciones principales que desempeña la pintura refractaria dentro del proceso experimentado son:

- Servir de interfase entre el modelo de poliestireno expandido y la arena de moldeo, este aspecto tiene como finalidad brindar un óptimo acabado superficial de la pieza fundida mediante esta tecnología.
- Permitir cierta permeabilidad al escape de los gases presentes en el proceso de fundición para de esta manera no generar poros internos y externos que influirían en la calidad final del componente fundido.

El comportamiento de la pintura refractaria frente al colado del metal fundido y del modelo de espuma de poliestireno expandido se observa en la figura 13.



**Figura 13.-** Comportamiento de la Pintura refractaria durante la colada.

### 3.3.2.1.- Agente refractario.

Se define como agente o material refractario a cualquier compuesto o mezcla capaz de soportar el rango de temperaturas comprendido entre los 1500 a 4000°C sin llegar a fundirse. Comprende el material base e imprescindible de la pintura refractaria, cuya finalidad es proteger a la pieza fundida de la temperatura y los gases generados por la combustión del modelo de espuma de poliestireno por acción del metal fundido. Estos gases pueden generar defectos, como porosidades tanto en el interior y exterior de la pieza final [7].

### 3.3.2.2.- Agente de suspensión.

El principal propósito del agente de suspensión es la de suspender y retardar la sedimentación de las partículas de refractario para que exista una mayor homogeneidad de la pintura, comúnmente son materiales cerámicos arcillosos.

### 3.3.2.3.- Agente dispersante.

El principal propósito de este agente es dispersar a las partículas de refractario que se encuentran presentes en la pintura, y además en algunos casos evitar con la adición de este tipo de componentes la floculación (aglutinamiento) de las partículas para lograr de esta manera un estado de homogeneidad idóneo para nuestro compuesto refractario, por ejemplo el  $\text{CaSiO}_3$  y el  $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$ .

#### **3.3.2.4.- Agente solvente.**

Es el componente de mayor proporción de la pintura refractaria, es el medio en el cual los demás componentes se van a combinar y disolver para producir una solución homogénea. Los principales solventes en orden de importancia son: el agua, el metanol y el etanol.

#### **3.3.2.5.- Aditivos.**

Los aditivos pueden mejorar algunas de las propiedades presentes en la pintura refractaria y su utilización dependerá en gran medida de las propiedades de los metales a fundir y del proceso de moldeo.



### **3.4.- Etapas del proceso de Lost Foam.**

El proceso de lost foam consiste de un menor número de etapas en comparación con otros procesos como en la fabricación del molde, preparación de arena, no necesita condiciones especiales. El proceso consiste en las etapas que a continuación se mencionan.

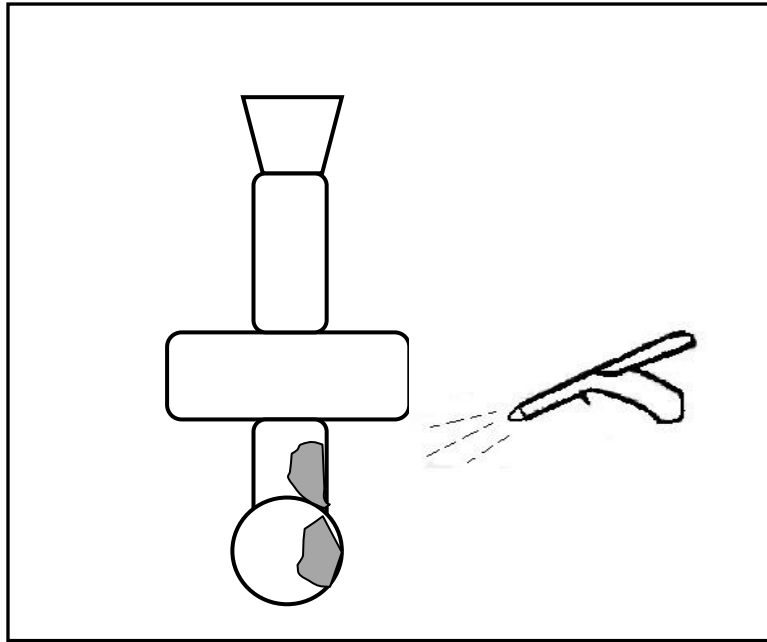
- Pintado – secado.
- Llenado y vibración.

#### **3.4.1.- Pintado y Secado.**

La pintura refractaria utilizada es una pasta que debe ser disuelta con agua, y para la cual no se tenían establecidos valores estándar de las proporciones a utilizar del agua, de la densidad a manejarse, y de cómo debía ser la agitación y el tiempo de la mezcla a fin de mantener la viscosidad lo más estable posible.

Dependiendo del metal a fundir, es una buena práctica recubrir el “Árbol” con una pintura refractaria a base de cerámicos como: Sílice, Mica y Oxido de aluminio. Para aplicar el recubrimiento, la pintura es disuelta en agua o alcohol y aplicada a los modelos de espuma mediante aspersion, inmersión o pintado manual. Luego de pintar el modelo debe secarse en un horno a temperaturas de 50 °C a 60°C durante un periodo superior a 2 horas o dejarse secar al aire libre si se dispone de tiempo.

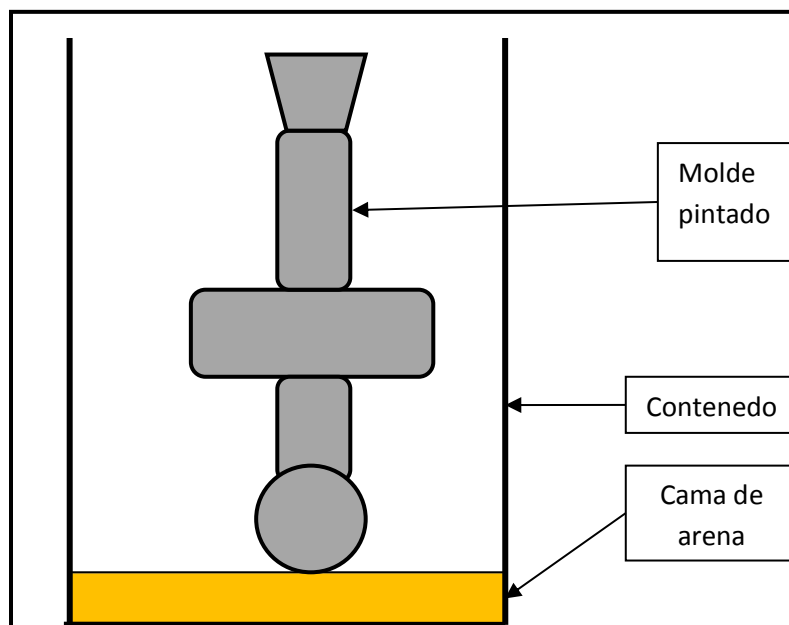
Una vez obtenidos los modelos de poliestireno, y antes de recubrirlos con la arena, estos se revisan por si tuvieran algún defecto que se reproduciría en la pieza final, como se muestra en la figura 14.



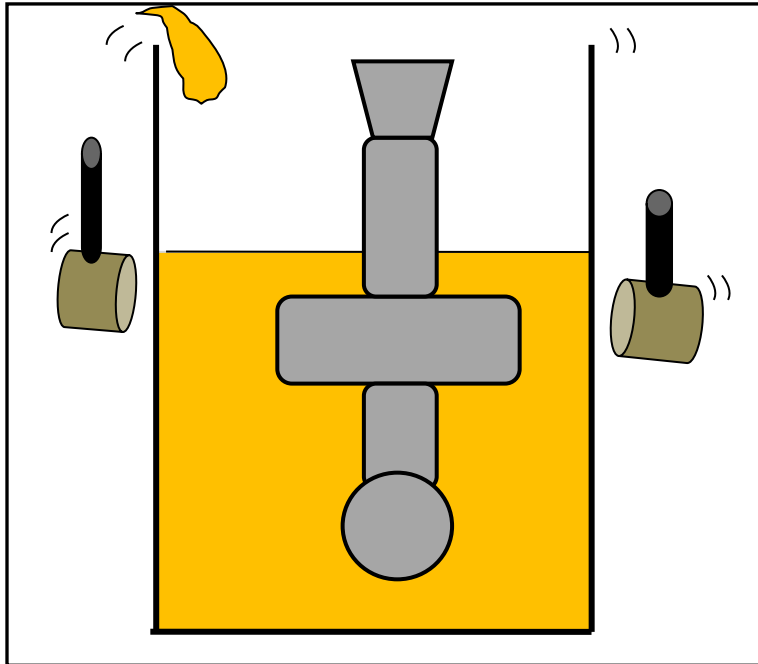
**Figura 14.-** Pintado de la pieza final, elaborada de múltiples piezas.

### 3.4.2.- Llenado y vibración.

La arena a diferencia de la usada en moldeo en verde se usa sin agua y sin aglutinantes adicionales, el número AFS es menor debido a la ausencia de agua el desplazamiento de los gases producidos es mayor y no se produce vapor de agua por la humedad de esta, la arena aparte de dar un soporte para el molde durante el vaciado, y éste no se mueva, da un soporte adicional a la capa de pintura y la misma por la presión del metal o del mismo gas producido por la combustión del poliestireno, no sufra deformaciones y por consiguiente una pieza defectuosa.



**Figura 15.-** Pieza pintada y colocada en contenedor, previamente colocada la cama de arena.



**Figura 16.-** Llenado del recipiente aplicando vibración.

Debido a que la arena no está en contacto directo con el metal, no es necesario que esta tenga un grano fino, para obtener un acabado superficial aceptable, como en el caso de moldeo en verde, sino al contrario, es necesario que sea capaz de desalojar los gases producidos por la combustión del EPS líquido que se transportan por la capa de pintura, y con esto evitar que se queden atrapados antes de la solidificación del material.

Es necesario mientras se llena el recipiente que contendrá la arena y el molde, se aplique vibración y la arena cubra perfectamente el molde pintado, de lo contrario existirán zonas donde la capa de pintura no tenga el soporte extra de la arena, y por la presión del metal y los gases producidos llegue a romperse generando sobredimensiones o en el peor de los casos la arena entre a la pieza.

Para el moldeo de fundiciones férreas, las arenas más usadas son las sílices sub angulares con un índice de finura de 35-45 y 50-60 AFS. Puesto que la arena para el moldeo se utiliza seca y en ausencia de aglutinantes, su reciclabilidad se convierte en una de las ventajas más sobresalientes del proceso.

#### 4.- Procedimiento experimental.

El procedimiento experimental se describe en el siguiente diagrama de flujo.

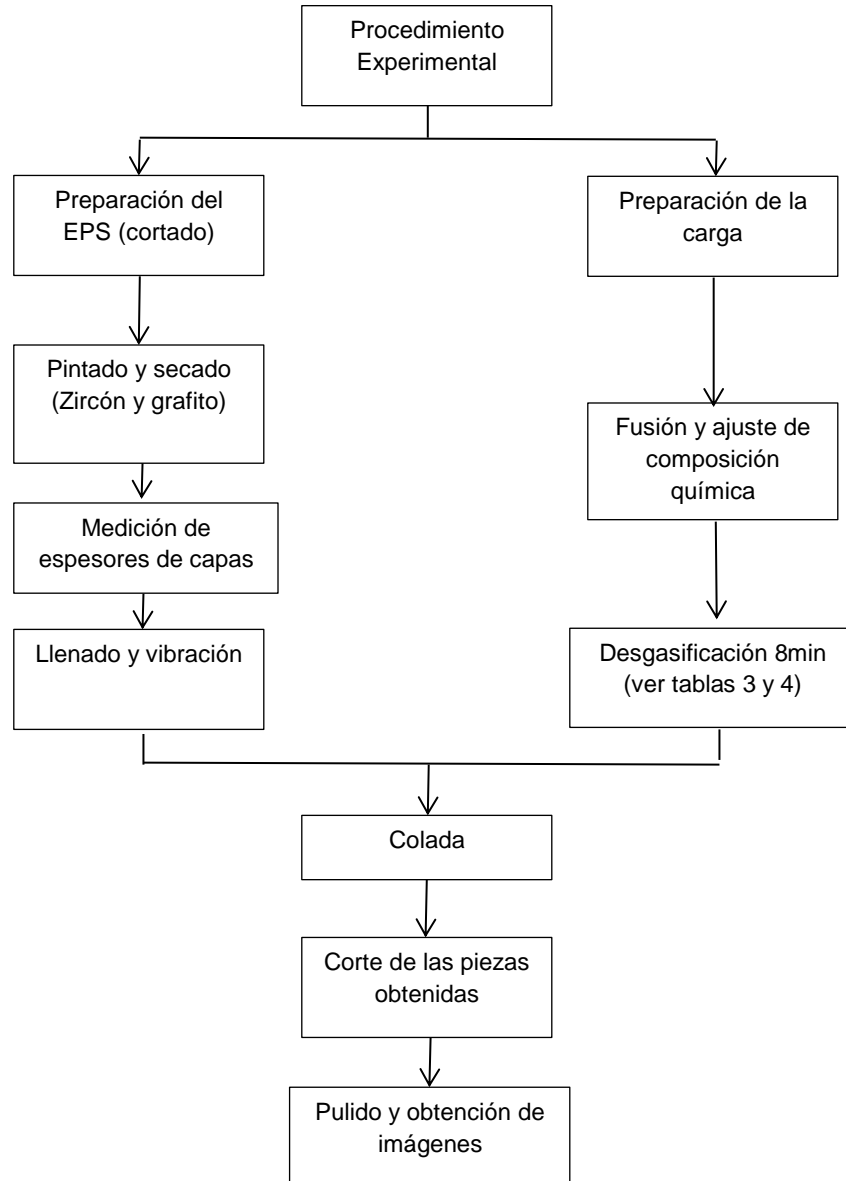


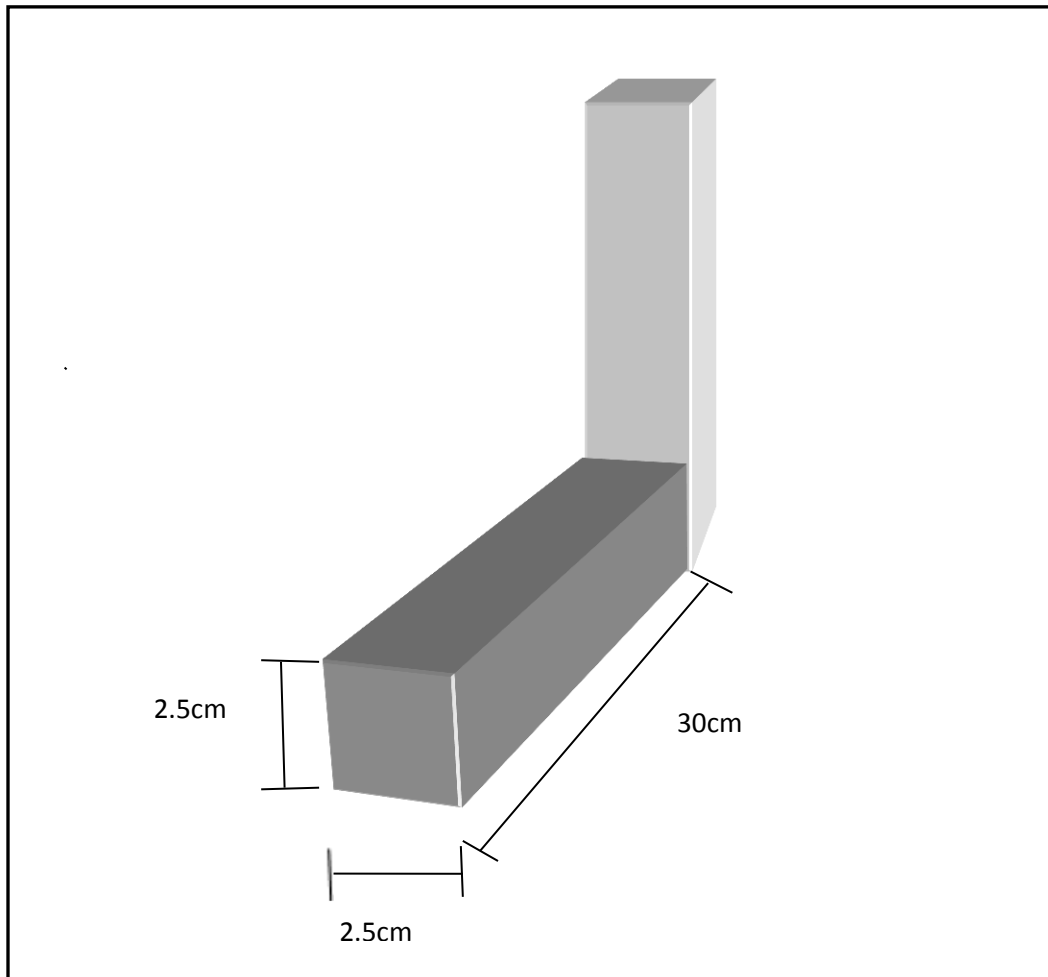
Diagrama de flujo del proceso experimental.

El procedimiento se realizó en dos etapas, la preparación de los moldes y la preparación de la aleación que se describen a continuación.

#### 4.1.- Preparación del Poliestireno Expandido (EPS).

Para dicho estudio se utilizarán dos tipos de pinturas, Grafito base alcohol y Óxido de zircón bases agua, también se estudia el efecto de la desgasificación con Ar y el espesor de las pinturas antes mencionadas.

Se empleó poliestireno comercial B y se fabricaron barras cuadradas con dimensiones 2.5cm x 2.5cm x 30cm, la bajada se realizó con las dimensiones de 2.5cm x 2.5cm x 20cm, las cuales se realizaron con una cortadora de resistencia eléctrica. Las piezas están conformadas de dos secciones las cuales se unieron con adhesivo especial para poliestireno, lijando previamente las zonas donde se unirán para eliminar la pintura y no se obstruya el posterior flujo de metal.



**Figura 17.-** Esquema del modelo a fundir en Lost Foam.

## 4.2.- Pintado.

Las pinturas se prepararon con una relación de sólido: líquido 1:15 en el caso del Óxido de zircón y 1:1 en el caso del grafito, se considera que la densidad de la mezcla es un factor importante en la capa adherida al modelo de EPS, pero se prepararon diferentes relaciones s-l y estas fueron las ideales para que cada inmersión no añadiera una capa excesiva o una muy delgada en la que se tuviera que aplicar un mayor número de estas para apreciar el efecto en las piezas.

Para la aplicación de dichas pinturas se optó por el método de inmersión ya que este proporciona una capa más uniforme que el pintado con brocha o aerosol. Las cuales fueron sumergidas por completo en la suspensión y puestas en una base para su secado entre capa y capa.

Las capas se aplicaron conforme a las siguientes condiciones, tabla 3 y 4:

**Tabla 3.-** Experimentos a realizar para los moldes con pintura de Zircón.

Número de Piezas	Número de Inmersión	Sin desgasificación	Con desgasificación
1	1	x	-----
2	2	x	-----
3	3	x	-----
4	4	x	-----
5	1	-----	x
6	2	-----	x
7	3	-----	x
8	4	-----	x

**Tabla 4.-** Experimentos a realizar para los moldes con pintura de Grafito.

Número de piezas	Número de Inmersiones	Sin desgasificación	Con desgasificación
1	1	x	-----
2	5	x	-----
3	6	x	-----
4	1	-----	x
5	5	-----	x
6	6	-----	x

Adicionalmente se prepararon bloques de 2cm X2.5cm x 2.5cm con el mismo diseño que en la tabla 3, esto para posteriormente realizar un corte transversal y se realizó una medida promedio del espesor de las capas de pintura y así tener un rango de espesores producido por determinada cantidad de inmersiones.

Las barras se colocaron en tercias dentro de las cajas de moldeo, previamente colocando la base de arena, como se mostró en la figura 15, y posteriormente el llenado de la caja aplicando la vibración, para ayudar al vaciado del metal se colocó un cilindro de acero alrededor de las entradas de la bajada de EPS, para facilitar el llenado de la pieza.



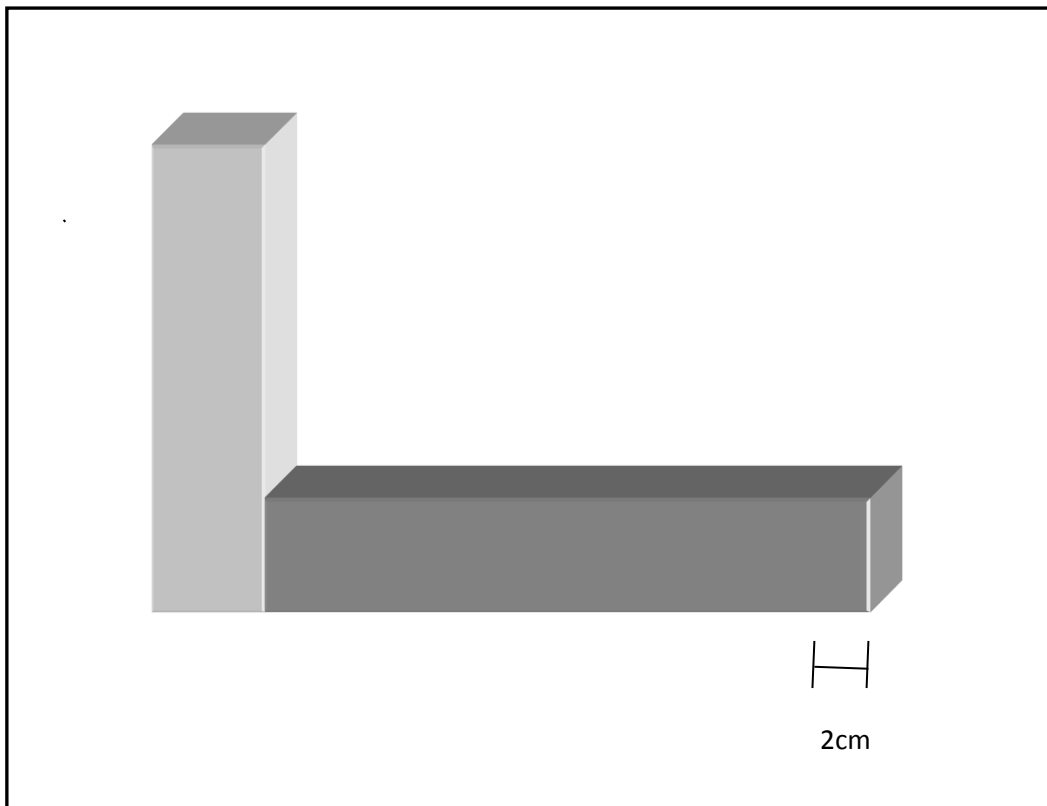
#### 4.3.- Preparación de la aleación.

Se fundieron lingotes de aleación A356 en el horno de resistencia eléctrica, a una temperatura de 760°C. Se realizaron dos rondas, una sin desgasificación y la otra con desgasificación de 8 min con gas Ar y la temperatura de colada del metal fue de 750°C.

#### 4.4.- Preparación de las muestras obtenidas.

A las barras obtenidas se les realizó una inspección visual para localizar defectos superficiales, tales como poros y rugosidades.

Posteriormente se cortaron secciones de 2cm (Ver figura 18) de la parte final de la barra, los cuales se les hizo una preparación metalográfica en busca de defectos internos, tales como poros, y rechupes.



**Figura 18.-** Sección a analizar los defectos microestructurales.

## **5.- Resultados y Análisis.**

Se realizaron pruebas preliminares para determinar la relación de sólido-líquido de las pinturas y el número de inmersiones en las cuales se podría trabajar, esto con el fin de evitar desperdicio de material, como gases de combustión y desgasificación.

En el caso de la pintura de grafito las pruebas con 1 a 4 inmersiones no muestran diferencias aparentes por lo que se decidió realizar dos capas extra.

Se presentaron defectos en las piezas de una inmersión tales como relieves e irregularidades superficiales los cuales algunos son debido a la porosidad superficial del EPS (ver figura 19) los cuales no se contemplan tales como defectos, si no los poros que se generaron por los gases al momento de la combustión, una forma de diferenciarlos es que los poros debido al acabado superficial del EPS se encuentran sólo entre las perlas.

Recordando que no se utilizó en EPS recomendado para este proceso, ya que una de las cualidades que tienen los grados X y T es que la perla es de menor tamaño, lo que indica, menor aire atrapado y en los procesos de fabricación se cuida que este aire esté libre de gases como hidrogeno, hidrocarburos y agua.

### 5.1.- Espesores.

Se tomaron cortes de los moldes de poliestireno con las inmersiones a estudiar y con ayuda de un microscopio metalográfico y el programa Image-Pro Plus se obtuvieron rangos de los espesores obtenidos, los cuales se registraron en la tabla 5.

**Tabla 5.-** Rango de espesores obtenidos. No se tomaron los espesores de dos a 4 inmersiones de grafito ya que las piezas obtenidas no presentaban diferencia apreciable entre ellas.

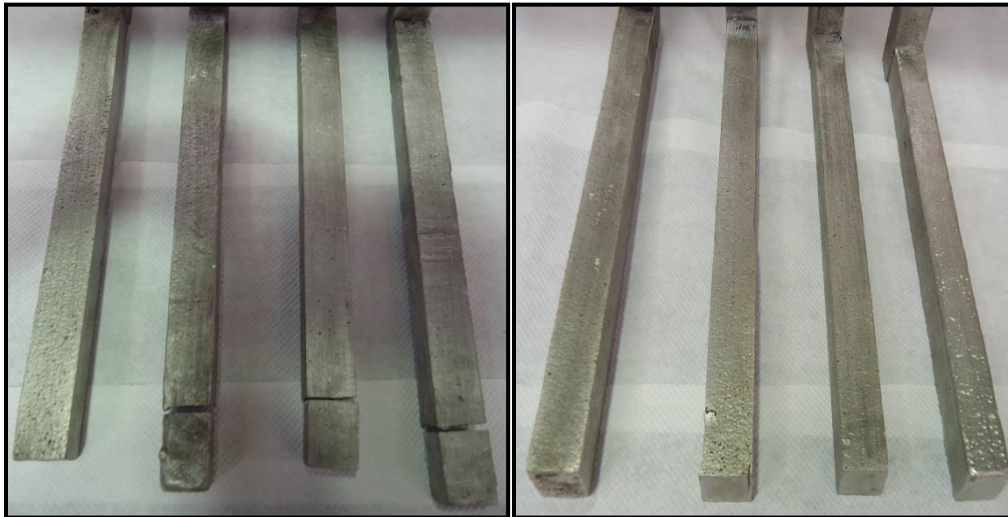
Inmersiones/pintura	Grafito ( $\mu\text{m}$ )	Zircón ( $\mu\text{m}$ )
1	140-155	400-450
2	-----	820-850
3	-----	2400-2500
4	-----	2800-2900
5	1050-1105	-----
6	1250-1300	-----

### 5.3.- Pintura de Zirconio.



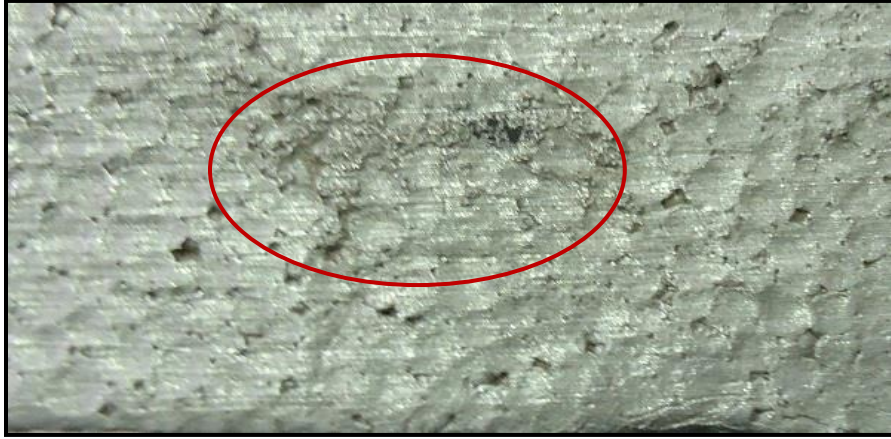
**Figura 19.-** textura del EPS utilizado para la fabricación de los moldes.

La textura del EPS se utilizara de patrón para las piezas producidas, ya que éste debe ser el acabado superficial de dichas piezas.



**Figura 20.-** piezas obtenidas con pintura de Zirconio sin desgasificación (izquierda) y con 8min de desgasificación (derecha).

Las barras obtenidas, excepto la obtenida con dos inmersiones, se presentó llenado total y las de mejor acabado superficial (tomando en cuenta que la referencia es el acabado superficial del poliestireno usado) fueron las obtenidas entre los rangos de 2 y 3 inmersiones.



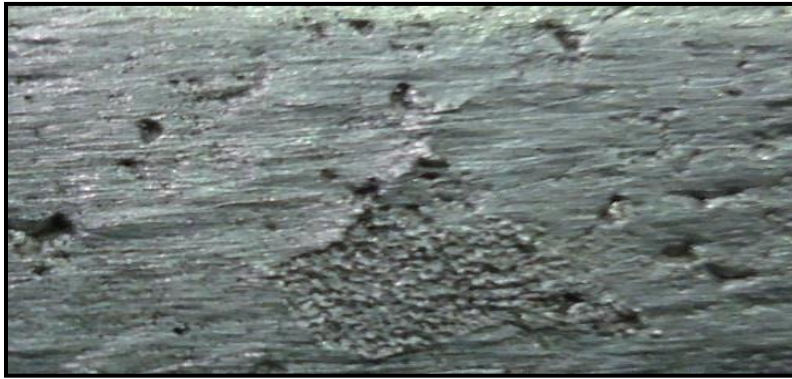
**Figura 21.-** Defectos superficiales obtenidos en piezas con una inmersión en pintura de zircón sin desgasificación al metal líquido.

En la figura 21, se puede apreciar rugosidad, esto indica una falla en la capa refractaria, que podría deberse a un menor espesor de pintura en esta zona, se descarta la posibilidad de gases debido a que el defecto se encontró en la parte inferior de la pieza. Pese a esto no se encontraron rastros de arena incrustados en la pieza.



**Figura 22.-** Defectos superficiales (poros) obtenidos en piezas con una inmersión en pintura de zircón, sin tratamiento de desgasificación.

En la figura 22, se observan los poros superficiales en la pieza, estos son debido a los huecos que existen en el EPS de grado B, que como se observan están localizados entre las perlas, que son apreciables debido a que esta técnica ofrece una alta fidelidad al modelo original. En la imagen también se puede apreciar un relieve producido por un desprendimiento mínimo en la capa refractaria.



**Figura 23.-** Defectos superficiales obtenidos en piezas con una inmersión en pintura de zircón, con tratamiento de desgasificación.

En la figura 23, se observa un defecto muy parecido al obtenido en su similar sin desgasificación en esta se obtuvo a un costado de la pieza, en el cual debido a que en las secciones laterales se realizó el corte, con resistencia eléctrica, no es posible apreciar las esferas como ocurre en las secciones superior e inferior, pero si los poros entre ellos.



**Figura 24.-** Defecto superficial obtenido en pieza con una inmersión en pintura de zircón, con desgasificación.

En la figura 24, se observa que en esta pieza también se encontró un “hundimiento” en la sección final, no se observa rastro de que la arena ingresara al material o de caso contrario que el material saliera de la capa, esto podría ser por una acumulación de gases, o el colapso de la capa refractaria a la presión de la arena externa.



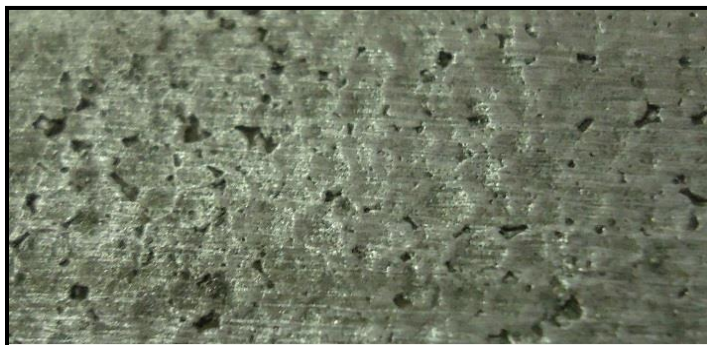
**Figura 25.-** Defectos internos en la pieza obtenida con una inmersión en pintura de zircón, sin desgasificación en la aleación (35X).

En la pieza de la figura 25 se observa una porosidad correspondiente a 0.84%, al no realizar el tratamiento de desgasificación estos poros pueden provenir del mismo proceso de fundición y/o de la descomposición del poliestireno (EPS).



**Figura 26.-** Defectos internos en la pieza obtenida con una inmersión en pintura de zircón, con desgasificación en la aleación (35X).

La pieza obtenida, que se muestra en la figura 26, presenta porosidad correspondiente a 0.84%, al tener el tratamiento de desgasificación, se deduce que estos poros son generados por los gases de combustión del EPS.



**Figura 27.-** Defectos superficiales obtenidos en piezas con dos inmersiones en pintura de zircón, sin desgasificación.

En pieza, de la figura 27, no se encontraron rugosidades como las obtenidas en la pieza con una inmersión, pero si los producidos por la superficie irregular del EPS.



**Figura 28.-** Defectos superficiales obtenidos en piezas con dos inmersiones en pintura de zircón, con desgasificación.

La pieza, de la figura 28, presenta un buen terminado superficial, ya que este es una réplica fiel del terminado del EPS empleado, salvo por un pequeño defecto obtenido en la parte final de la pieza donde hubo fuga de material.





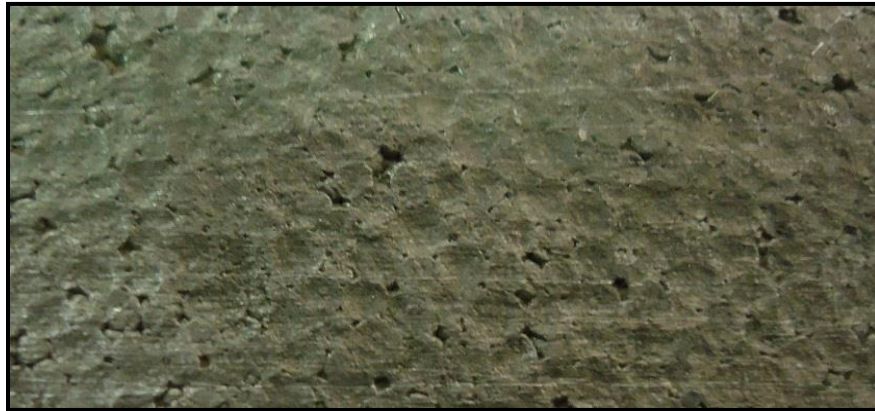
**Figura 29.-** Defectos internos en la pieza obtenida con dos inmersión en pintura de zircón, sin tratamiento de desgasificación (35X).

Se observa en la figura 29, una porosidad de 0.84% con forme al patrón de porosidad, los cuales no se pueden determinar si son por los gases disueltos durante la fusión o por los producidos en la combustión del EPS.



**Figura 30.-** Defectos internos en la pieza obtenida con dos inmersiones en pintura de zircón, con tratamiento de desgasificación (35X).

En la figura 30, el porcentaje de porosidad es de 0.84% el cual es muy parecido a su similar sin desgasificación lo que podría indicar que en el proceso de fundición no hubo una considerable solubilización de hidrógeno.



**Figura 31.-** Defectos superficiales obtenidos en piezas con tres inmersiones en pintura de zircón, sin desgasificación.

Se observa, en la figura 31, una porosidad superficial muy similar a la obtenida con 2 capas y no se observan rugosidades, asperezas ni sobredimensionamientos.



**Figura 32.-** Defectos superficiales obtenidos en piezas con tres inmersiones en pintura de zircón con desgasificación.

La pieza de la figura 32, presenta una buena fidelidad al terminado del EPS original, no presenta fuga de material ni sobredimensionamiento.



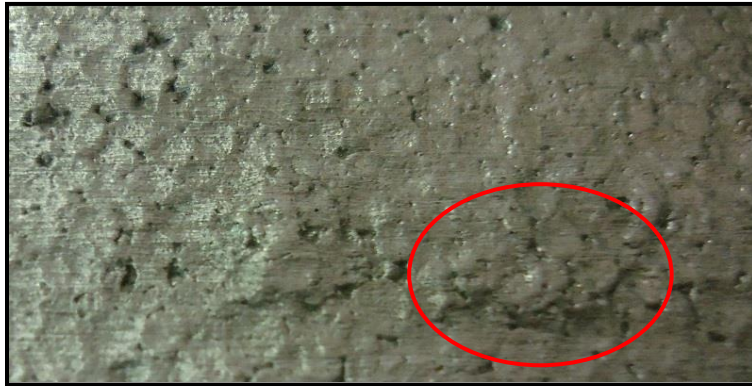
**Figura 33.-** Defectos internos en la pieza obtenida con tres inmersiones en pintura de zircón, sin desgasificación (35X).

Se observa en la figura 33 una porosidad muy similar a la de dos inmersiones con porcentaje de 0.84% y es debido al Hidrógeno disuelto en el proceso de fundición y a la combustión del EPS.



**Figura 34.-** Defectos internos en la pieza obtenida con tres inmersiones en pintura de zircón con desgasificación (35X).

La porosidad obtenida en la pieza de la figura 34 es de 0.18% y corresponden al proceso de combustión.



**Figura 35.-** Defectos superficiales obtenidos en piezas con cuatro inmersiones en pintura de zircón sin desgasificación.

En esta pieza en varias zonas es difícil ver la huella de las perlas de EPS (como se muestre en la figura 35) e incluso se ven relieves en la pieza que causa una sobre dimensión de esta, lo que podría deberse al desprendimiento de la capa refractaria y el material logro tener estos relieves, y explicaría por qué las huellas de las perlas son difusas.



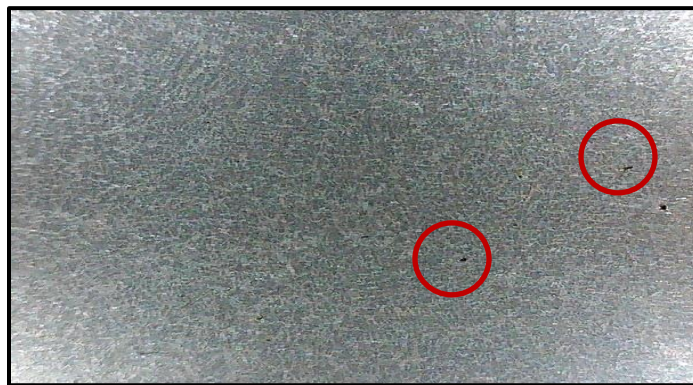
**Figura 36.-** Defectos superficiales obtenidos en piezas con cuatro inmersiones en pintura de zircón con desgasificación.

En la pieza de la figura 36, se observa porosidad proveniente de los gases de la combustión del EPS, es nula la presencia de huellas de las perlas, como en la pieza sin desgasificación, lo más probable es que sufrió la ruptura de la capa de pintura por la presión ejercida por los gases de combustión, al momento de retirar la pieza no fue necesario la limpieza para retirar la capa de pintura residual ya que la misma se desprendió durante el proceso. También es evidente que presenta sobredimensionamiento.



**Figura 37.-** Defectos internos en la pieza obtenida con cuatro inmersiones en pintura de zircón sin desgasificación (35X).

En la figura 37 se observa que los poros corresponden a un nivel menor que las anteriores, 0.18%, lo que ayuda a confirmar el rompimiento de la capa refractaria, ya que los gases escaparon más fácilmente.



**Figura 38.-** Defectos internos en la pieza obtenida con cuatro inmersiones en pintura de zircón con desgasificación (35X).

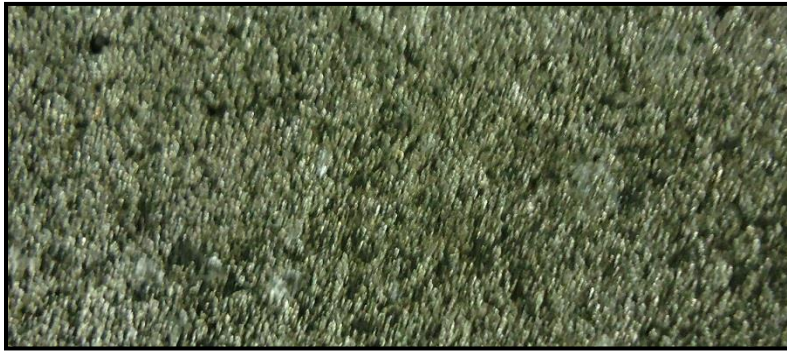
La porosidad en la pieza de la figura 38, corresponde a 0.10% y al igual que en la pieza sin desgasificación la capa de pintura no resistió, produciendo sobredimensionamiento y la salida de los gases de manera rápida.

### 5.3.- Pintura de Grafito.



**Figura 39.-** piezas obtenidas con pintura de grafito sin tratamiento al metal líquido de desgasificación (izquierda) y con 8 min de desgasificación (derecha).

Como se muestra en la figura 39, en dos barras no hubo llenado total, y se observa porosidad en la superficie que no corresponde al acabado superficial del EPS. Al momento de retirar las barras de la arena se observó que la pintura, con cinco y seis inmersiones, seguía adherida a la pieza, lo que no ocurrió con una inmersión o con la pintura de zircón.



**Figura 40.-** Defectos superficiales obtenidos en piezas con una inmersión en pintura de grafito sin desgasificación.

La pieza de la figura 40, presenta una rugosidad considerable, tal como la que presentaría una similar pero fabricada con molde de arena con Número AFS bajo.



**Figura 41.-** Defectos superficiales obtenidos en piezas con una inmersión en pintura de grafito con desgasificación.

La pieza de la figura 41, presenta los poros superficiales del EPS pero las huellas de las perlas no apreciables en muchas zonas, el acabado superficial es áspero parecido al obtenido en molde de arena. En la parte superior se observan rebabas lo que indica una fuga de material.



**Figura 42.-** Defectos internos en la pieza obtenida con una inmersión en pintura de grafito sin desgasificación (35X).

La pieza que se muestra en la figura 42, presenta una densidad de porosidad de 0.84, similar a las obtenidas con pintura de zircón.



**Figura 43.-** Defectos internos en la pieza obtenida con una inmersión en pintura de grafito con desgasificación (35X).

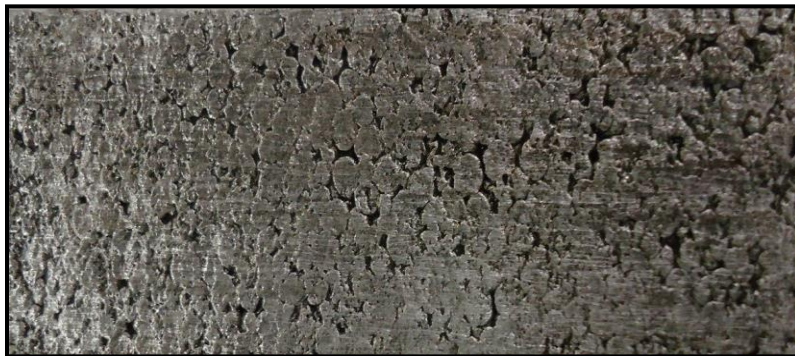
La porosidad en la pieza de la figura 43 es cercana a 1.3% y los poros son de tamaños similares, estos poros son generados por los gases producidos durante la combustión del EPS.





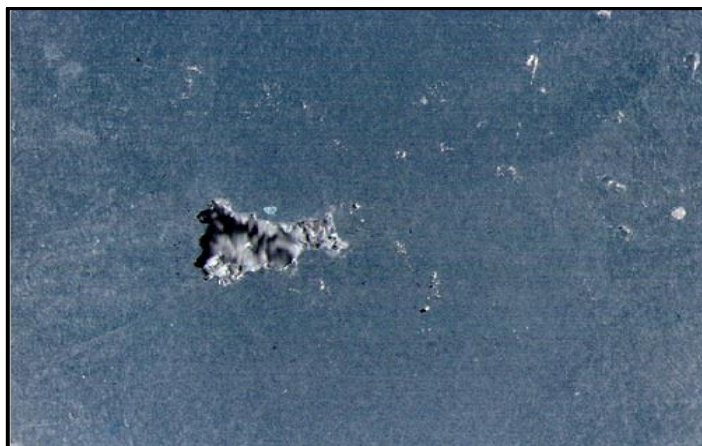
**Figura 44.-** Defectos superficiales obtenidos en piezas con cinco inmersiones en pintura de grafito sin desgasificación.

Al aplicar 5 inmersiones se observa, en la figura 434 que la porosidad superficial se incrementó, las huellas de las perlas no son apreciables, y la pieza no se llenó por completo como se muestra en la figura 39, tampoco se muestran signos de que la arena externa entrara en el material.



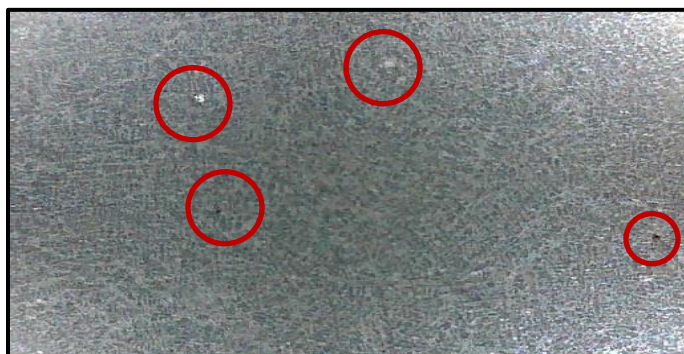
**Figura 45.-** Defectos superficiales obtenidos en piezas con cinco inmersiones en pintura de grafito con desgasificación.

El acabado superficial, como se muestra en la figura 45, es muy parecido a los obtenidos con las pinturas base zircón, ya que se obtiene un mínimo de asperezas y las huellas de las perlas de EPS es apreciable, pero en los últimos 4cm de la pieza estos son nulos y presenta un llenado parcial.



**Figura 46.-** Defectos internos en la pieza obtenida con cinco inmersiones en pintura de grafito sin desgasificación (35X).

La pieza, de la figura 46, no solo muestra una porosidad si no un rechupe, la porosidad es cercana al 0.84%.



**Figura 47.-** Defectos internos en la pieza obtenida con cinco inmersiones en pintura de grafito con desgasificación (35X).

La porosidad obtenida en la pieza de la Figura 47, es cercana al 0.18% en este caso la pintura dejó escapar de manera eficiente los gases y los poros son generados por la combustión del EPS.



**Figura 48.-** Defectos superficiales obtenidos en piezas con seis inmersiones en pintura de grafito sin desgasificación.

Las huellas de las perlas son prácticamente nulas en la pieza de la figura 48, la pieza no fue llenada por completo, en el momento de la fusión esta fue la primera en vaciarse por lo que no se debe a una baja temperatura de colada.



**Figura 49.-** Defectos superficiales obtenidos en piezas con seis inmersiones en pintura de grafito con desgasificación.

Con seis capas comienzan a ser poco apreciables las huellas de las perlas en la pieza de la figura 49, y las asperezas son menores, siendo todavía un acabado superficial deficiente.



**Figura 50.-** Defectos internos en la pieza obtenida con seis inmersiones en pintura de grafito sin desgasificación.

La pieza de la figura 50, no muestra rechupes como en el caso de la fabricada con cinco inmersiones, pero si una porosidad parecida a las demás de 0.84%.



**Figura 51.-** Defectos internos en la pieza obtenida con seis inmersiones en pintura de grafito con desgasificación.

Los poros en la pieza de la figura 51, corresponden a un 0.10% y los gases difundieron de manera aceptable.

## **6.- Análisis Generales.**

### **Pintura de Zirconio.**

El acabado superficial al aumentar el espesor de las capas de pintura de zirconio se incrementa con un máximo de tres inmersiones (2400-2500 $\mu$ m), ya que la rugosidad disminuye. Sin embargo con una capa delgada se incrementa el riesgo de tener ruptura de capa o que esta no sea lo suficientemente rígida para que la arena externa deje huella en el material.

Un exceso de pintura no solo repercute en el tiempo de preparación de la pieza, que se traduce en dinero, sino que estas son cada vez más frágiles y difíciles de manejar sin que se desprendan del modelo de EPS. Así mismo tienen un efecto en el incremento de los poros (micro) en la pieza, ya que una capa más gruesa significa mayor obstáculo a los gases de combustión generados, produciendo una presión que lleva a la fractura de dicha capa y una pieza defectuosa.

Para el caso del Óxido de Zircón, 4 inmersiones es el límite ya que las capas posteriores a esta no se adhieren bien entre si y la pieza es muy frágil por lo que la hace difícil de manejar antes de la fusión.

## **Pintura de Grafito.**

Con la pintura de grafito se obtuvieron piezas con una calidad superficial baja, debido a que esta pintura no es lo suficientemente rígida, aplicando de una a cuatro inmersiones, el efecto de rugosidad disminuye al llegar a la quinta inmersión, pero esto significó que las piezas no se obtuvieran con la dimensión deseada, al momento de retirar las piezas de la arena, en varias secciones, la pintura aún estaba adherida a la pieza, no se presentaron rastros de arena incrustada en la pieza, por lo que la capa resistió lo suficiente para no dejar que la arena deje huella en la barra, pero también obstruyó la difusión de los gases de combustión, quedando atrapados en la interfase metal-cerámico, creando una presión que evitó que el material llenara el molde.

La pintura de grafito es apreciablemente más fina que la de zircón y esto influye directamente en la difusión de los gases de combustión.

Los gases deben difundir por la capa refractaria libremente y no deben de tener que escapar por defectos de la misma.

El proceso como tal presenta a comparación del moldeo en verde [11], piezas con propiedades más homogéneas debido a que la solidificación es más lenta, no está presente el agua, en este caso es arena seca, la cual conserva mejor la temperatura y su extracción del calor es menor, por lo tanto, el tiempo de solidificación es mayor.

El tratamiento de desgasificación sólo elimina el hidrógeno disuelto durante la fundición del aluminio, con esto podemos afirmar que los poros en las muestras con desgasificación son del proceso de combustión del EPS, y en unas muestras la porosidad es similar, no se debe dejar de realizar este tratamiento.

## 7.- Conclusiones:

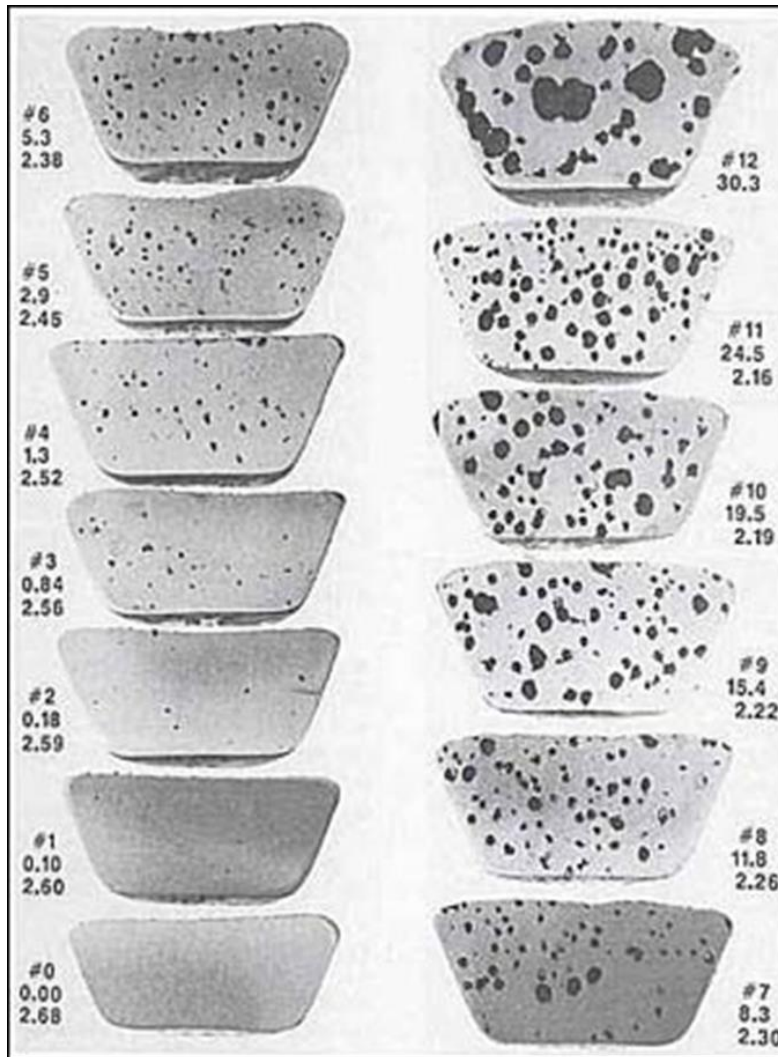
Las conclusiones que se obtuvieron en el presente trabajo son:

- La pintura de zircón base agua presente un acabado superficial aceptable aplicándolo de 2 a 3 inmersiones (820 $\mu$ m-850 $\mu$ m y 2400 $\mu$ m-2500 $\mu$ m respectivamente) y una porosidad baja.
- La pintura de Zircón permite una buena difusión de los gases de combustión del EPS.
- La pintura de grafito base alcohol no permite una buena difusión de los gases de la combustión del EPS.
- Al usar pintura de grafito es necesario un maquinado posterior.
- Se recomienda el tratamiento de desgasificación de 8 minutos en esta técnica.
- La combinación de variables, con las que se obtuvieron la mejor calidad en las piezas son con pintura de Zircón base agua, con 3 inmersiones (2400  $\mu$ m-2500 $\mu$ m) y tratamiento de desgasificación de 8 minutos.

## Anexo I.

Patrón de porosidad.

El patrón de porosidad se emplea como herramienta comparativa para determinar el nivel y porcentaje de porosidad en una pieza de aluminio, éste patrón fue obtenido con presión reducida, al no contar con un patrón a presión normal se decidió usar éste para fines comparativos entre las piezas obtenidas.





## **Bibliografía.**

- [1] Fernández M. P. y Martínez V., Marco F. Valencia, Cruz R. J. (2006) Optimización del proceso de lost foam casting (lfc) para la fabricación de autopartes Grupo de Investigación sobre Nuevos Materiales. En: Universidad Pontificia Bolivariana. Medellín, Colombia .Congreso Iberoamericano de Metalurgia y Materiales, Habana, Cuba.
- [2] King F. (1992). El aluminio y sus aleaciones. .México, Editorial: Limusa, Primera edición.
- [3] González Escárcega O. (2011, 5 de diciembre). Reciclaje de aluminio, negocio poco explotado. En: El universal, México, D.F.
- [4] Cubero Debess Daada V. y Tagliaferro Rodríguez L. M. (2002) Modificación de la morfología del silicio en la aleación de aluminio A356 mediante ciclos de calentamiento y enfriamiento, Tesis de licenciatura, Caracas.
- [5] Haro R. S. (2008). Aplicación de refinador de grano y modificador a una aleación vaciada Al-12 Si, En: CONAMET/SAM, Asociación Argentina de materiales. Realizada en Santiago, Chile del 28 al 31 de octubre.
- [6] Instituto Nacional de tecnologías, Consultado el 27 de noviembre 2011 <http://centros5.pntic.mec.es/ies.victoria.kent/Rincon-C/Curiosid/Rc-38/RC-38>.
- [7] Freire Torres M. A. (2008).Estudio de las Pinturas Refractarias en el Proceso de Fundición por el Método de Espuma Perdida en Aleaciones no Ferrosas, Tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción. Guayaquil, Ecuador.
- [8] López López A. (2005). Comparación de los procesos: lost foam y moldeo en verde, para una aleación A-356 modificada y refinada, Tesis de licenciatura, Facultad de Química, UNAM. México.

- [9] Kang, B. (2007). Density and Mechanical Properties of Aluminum Lost Foam Casting by Pressurization during Solidification, En: Journal of Materials Science & Technology, Vol. 23, pp. 828-832.
- [10] DeGarmo E. P. (1988) Materiales y procesos de fabricación. Barcelona. Editorial reverté, segunda edición.
- [11] Jianling Wang, Xiuwei Sun y Fuheng Tan, (2008) Analysis of Defects of Aluminum Alloys in the Lost Foam Process and Prevention Methods, En: Advanced Materials Research, Vols 148-149, pp. 191-194.
- [12] Wu Guo Ha, (2000), Porosity of aluminum alloy in lost foam casting process, En: Trans. Nonferrous Mat. Soc. China. Vol. 10 No. 5. Pp. 645-649.
- [13] Jer-Haur Kuo . (2003) Mold Filling Analysis in Lost Foam Casting Process for Aluminum Alloys and Its Experimental Validation, En: Materials Transactions, Vol. 44, No. 10, pp. 2169 y 2174.
- [14] Griffiths W. D., Davies P. J. (2008) The permeability of Lost Foam pattern coatings for Al alloy Castings, En: J Mater Sci. pp.5441-5447.