



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

FACULTAD DE QUIMICA

**COMPARACIÓN DE LOS PROCESOS:
LOST FOAM Y MOLDEO EN VERDE,
PARA UNA ALEACIÓN A-356
MODIFICADA Y REFINADA.**

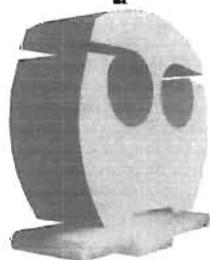
T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA METALÚRGICA

P R E S E N T A :

ALEJANDRA LÓPEZ LÓPEZ



MÉXICO, D.F.



2005

EXAMENES PROFESIONALES
FACULTAD DE QUIMICA

m. 341149



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

Presidente I.Q.M. Eusebio Cándido Atlatenco Tlapanco
Vocal I.Q.M. Gerardo Aramburo Pérez
Secretario I.Q.M. Adrián Manuel Amaro Villeda
1er. Suplente M. en C. Sergio García Galán
2do. Suplente I.Q.M. José Guadalupe Ramírez Vieyra

Sitio en donde se desarrolló el tema:

Laboratorio de Fundición
Departamento de Ingeniería Metalúrgica
Facultad de Química. Edificio "D"
Ciudad Universitaria, UNAM.

Asesor del Tema: _____



I.Q.M. Adrián Manuel Amaro Villeda

Supervisor Técnico: _____



M. en C. José Alejandro García Hinojosa

Sustentante: _____



Alejandra López López

AGRADECIMIENTOS

Quiero dar gracias al Señor por darme la oportunidad de realizar este sueño.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por darme la gran oportunidad de pertenecer a ella.

A la Facultad de Química por dejarme adquirir conocimientos en sus aulas y laboratorios.

A mi asesor I.Q.M. Adrián M. Amaro V. por confiar en mi y por darme su apoyo incondicional.

A mi asesor técnico M. en C. J. Alejandro García H. por compartir sus conocimientos y por la ayuda prestada a lo largo de toda la carrera.

Al I.Q.M. Eusebio Cándido Atlatenco Tlapanco por todo su apoyo, sus consejos y por compartir sus conocimientos.

Al M. en C. Sergio García Galán por su valiosa ayuda en la realización de este trabajo.

Al I.Q.M. Gerardo Aramburo Pérez por las mejoras aportadas a esta tesis.

A los profesores: Carlos González, J. Antonio Barrera, Agustín G. Ruiz T., Francisco J. Rodríguez, Leopoldo Rodríguez, Guillermo Salas, Bernardo Hernández, Ma. Eugenia Noguez, Ignacio Beltrán y José Vieyra por compartir sus conocimientos.

DEDICATORIAS

A ti que siempre has permanecido a mi lado, que has confiado en mi, y me ha impulsado a salir adelante con tu ejemplo y por tu apoyo incondicional, este logro también es tuyo. Muchas Gracias por Todo Yolanda.

A mi mamá, ya que gracias a ti llegué a esta familia tan maravillosa.

A ti que ahora eres parte de mi, que llegaste a cambiarlo todo, que compartes conmigo cada momento; que eres mi presente y mi futuro, gracias por existir. Eres un ser maravilloso. Te Amo Adrián.

A Dianitzia, Fam. Benítez Cruz, Valero Benítez, Benítez Jaimes, Ibáñez Benítez y Amaro Villeda, por que se que puedo contar con ustedes.

A mis amigos: Enrique, Salomón, Iris, Miriam, Lalo, Andrea, Carlos, Armando, Roberto, Maricruz, Tinoco, Kame, Pato, Mauro, Victor, Elvín, José, Christian y los que se me lleguen a pasar.

A Edith por compartir tantos momentos juntas y por ser una gran amiga.

INDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I. ANTECEDENTES	3
1.1 Procesos de Fundición	3
1.2 Clasificación del moldeo y los procesos de colada.	3
1.3 Procesos en Molde Unitario	5
1.3.1 Proceso en Modelo Permanente	5
1.3.1.1 Moldes de arena en verde.	5
1.3.1.1.1 Tipos de Arena.	5
1.3.1.1.2 Calidad de las arenas	7
1.3.2 Proceso en Modelo Desechable	8
1.4 Sistema de colada del molde.	8
1.5 El proceso Lost Foam con Modelos de Poliestireno Expandido (EPS)	9
1.5.1 Los Pasos Básicos del Proceso	10
1.5.2 Ventajas del proceso Lost Foam	10
1.5.3 Aplicaciones	12
1.5.4 Poliestireno.	13
1.5.4.1 Generalidades	13
1.5.4.2 Toxicidad	16
1.5.4.3 Riesgos	18
CAPITULO II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	19
2.1 Aleaciones de Aluminio	19
2.1.2 Influencia de la Rapidez de Solidificación Sobre la Microestructura	20
2.1.3 Modificación de Aleaciones Aluminio	20
2.1.3 Refinación de Aleaciones de Aluminio	23
2.1.4 Porosidad	25

CAPITULO III. FASE EXPERIMENTAL	28
3.1 Hipótesis	28
3.2 Diseño Experimental	29
3.3 Materiales y Equipo.	30
3.3.1 Materiales.	30
3.3.2 Equipo.	31
3.4 Desarrollo Experimental.	33
3.4.1 Fabricación de la Placa Modelo	33
3.4.2 Calculo de Sistema de Colada	33
3.4.3 Fabricación del Modelo de Poliestireno.	37
3.4.4 Fabricación de Moldes de Arena (Moldeo en Verde)	38
3.4.5 Fabricación de los Moldes con la pieza de Poliestireno (Lost Foam)	39
3.4.6 Fusión de la Aleación A-356 sin Tratamiento y vaciada En Molde de Arena en Verde.	40
3.4.7 Tratamiento de Refinación y Modificación de la Aleación A-356 y Vaciado en molde Arena en Verde.	41
3.4.8 Fusión de la Aleación A-356 sin Tratamiento y vaciada Por el proceso de Lost Foam (espuma pérdida)	42
3.4.9 Tratamiento de Refinación y Modificación de la Aleación A-356 y vaciada por el Proceso de Lost Foam.	43
3.5 Evaluación.	44
3.5.1 Barras obtenidas a partir del Proceso de Moldeo en Verde y Lost Foam.	44
3.5.1.1 Barras sin Tratamiento	44
3.5.1.2 Barras con tratamiento de Refinación y Modificación	45
3.5.2 Preparación Metalográfica.	45
3.5.3 Evaluación por Microscopía Óptica (MO)	46

CAPITULO IV. RESULTADOS.	49
4.1 Nivel de modificación	49
4.1.1 Aleación A-356 sin tratamiento por el proceso de Moldeo de Arena en Verde.	49
4.1.2 Aleación A-356 sin tratamiento por el proceso de Lost Foam.	50
4.1.3 Aleación A-356 con tratamiento de modificación (0.015% Sr) Fabricado por el proceso de Moldeo de Arena en Verde.	51
4.1.4 Aleación A-356 con tratamiento de modificación (0.015% Sr) Fabricado por el proceso de Lost Foam.	52
4.1.5 Aleación A-356 con tratamiento de modificación (0.025% Sr) Fabricado por el proceso de Moldeo de Arena en Verde.	53
4.1.6 Aleación A-356 con tratamiento de modificación (0.025% Sr) Fabricado por el proceso de Lost Foam.	54
4.1.7 Aleación A-356 con tratamiento de modificación (0.05% Sr) Fabricado por el proceso de Moldeo de Arena en Verde.	55
4.1.8 Aleación A-356 con tratamiento de modificación (0.05% Sr) Fabricado por el proceso de Lost Foam.	56
4.1.9 Aleación A-356 con tratamiento de modificación (0.10% Sr) Fabricado por el proceso de Moldeo de Arena en Verde.	57
4.1.10 Aleación A-356 con tratamiento de modificación (0.10% Sr) Fabricado por el proceso de Lost Foam	58
4.2 Espaciamiento Interdendrítico	60
4.3 Refinación de Grano	62
4.3.1 Aleación A-356 sin tratamiento fabricado tanto por el proceso De Moldeo en Verde así como por el proceso de Lost Foam	62
4.3.2 Aleación A-356 con tratamiento de Refinación con Ti, Fabricado tanto por el proceso de Moldeo en Verde Así como por el proceso de Lost Foam	63
4.3.3 Aleación A-356 con tratamiento de Refinación con Ti, Fabricado tanto por el proceso de Moldeo en Verde Así como por el proceso de Lost Foam	64
4.3.4 Aleación A-356 con tratamiento de Refinación con Ti, Fabricado tanto por el proceso de Moldeo en Verde Así como por el proceso de Lost Foam	65
4.3.5 Aleación A-356 con tratamiento de Refinación con Ti, Fabricado tanto por el proceso de Moldeo en Verde Así como por el proceso de Lost Foam	66

4.4 Tamaño de Grano ASTM	67
4.5 Evaluación de la Porosidad (% área)	70
CAPITULO V. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN	72
CAPITULO VI. CONCLUSIONES	89
BIBLIOGRAFÍA	90

INTRODUCCIÓN

El siguiente trabajo presenta una comparación del proceso de moldeo de arena en verde y el proceso de Lost Foam (Espuma Perdida), utilizando una aleación A-356 a la cual se le realizaron tratamientos de refinación y modificación con diferentes niveles; utilizando las aleaciones maestras: Al-5%Ti-1%B y Al-10%Sr respectivamente.

Los objetivos que se contemplan son los siguientes:

- ↻ **Determinar el efecto del proceso Lost Foam sobre el tamaño de grano de una aleación A-356 sin refinación y con refinación comparada con el proceso de moldeo de arena en verde.**
- ↻ **Determinar si el proceso de Lost Foam afecta la morfología de Silicio y el DAS (Espaciamiento Interdendrítico Secundario) en una aleación A-356 sin modificar y modificada comparada con el proceso de moldeo de arena en verde.**
- ↻ **Evaluar el porcentaje de porosidad generado en una pieza de A356 vaciada por Lost Foam y en moldeo de arena en verde realizando una desgasificación previa.**

Comparación del Proceso tradicional de Moldeo de Arena en Verde con el Proceso Lost Foam (Espuma Perdida). (35)

La colada de metales en moldes fabricados con arena es aún una práctica usual. Los moldes se hacen habitualmente en dos partes a fin de que los modelos puedan retirarse antes de la colada. El modelo es ensamblado en una placa generando una línea de partición ocupando la parte superior e inferior generalmente. Si las piezas coladas son huecas se requiere la presencia de corazones.

En el proceso Lost Foam, el modelo se elabora a partir de piezas de Poliestireno Expandido (EPS) mecanizadas o modeladas. En este proceso los modelos requieren un cuidado especial para evitar su distorsión, ya que el EPS no soporta las presiones a las que son sometidas los modelos para moldeo en verde. Los modelos son simples y se reducen las operaciones requeridas para su realización. La ausencia de líneas de partición es otra ventaja resultante del uso de un molde sin dividir; se reducen las operaciones de acabado y es más fácil hacer piezas de gran precisión.

En el proceso de colada por Lost Foam el metal líquido es vertido directamente en el modelo de Poliestireno previamente cubierto con pintura refractaria y enarenado en la caja de moldeo. El modelo de Poliestireno sufre una degradación térmica y se substituye progresivamente por el metal fundido.

En este caso los parámetros relevantes son la temperatura y el tipo de molde de la pieza, así como el tratamiento químico de la aleación de Aluminio A-356 en estado líquido, que en este caso se modifica la morfología del Si (eutéctico) con aleación maestra de Al-10% Sr y se refina el grano con aleación maestra de Al-5% Ti1% B. El cual será comparado con el proceso de moldeo en verde.

Las ventajas de esta técnica ha generado un notable interés en la industria de la fundición. Actualmente el proceso se emplea en la producción de una inmensa variedad de piezas de metales ferrosos y no ferrosos, inherente a la industria automotriz.

Como se trata de un proceso innovador, hay necesidad de entender la influencia del proceso en la microestructura y las características mecánicas de la pieza final. Además, la interacción de los productos por la degradación térmica del EPS con el metal líquido pueden producir defectos como: porosidad por gases e inclusiones.

Por medio de la evaluación metalográfica (nivel de modificación, tamaño de grano, Espaciamiento Interdendrítico y % de porosidad), se determina si el proceso de Lost Foam permite obtener piezas que cumplan y/o superen las propiedades obtenidas por el proceso de moldeo de arena en verde, el cual es el proceso más utilizado para la obtención de piezas metálicas por fundición.

CAPITULO I

ANTECEDENTES

1.1 Procesos de Fundición (48, 49, 50)

Los procesos de fundición existen desde la antigüedad, a través de los años se han desarrollado gran variedad de métodos de moldeo y colada.

La variación de estos procesos depende del tipo de material de colada, la complejidad de la forma y los requerimientos de calidad. Existen diferentes alternativas dependiendo de las necesidades que se requieran.

La producción de piezas de colada comienza con la fusión del metal en la cual se tienen que realizar balances de carga y aplicar las técnicas de fusión adecuadas dependiendo del tipo de aleación a fabricar, una vez fundido el metal en el homo este es llevado a una olla (cuchara) para poder verter el metal en la cavidad del molde.

1.2 Clasificación del moldeo y los procesos de colada. (48, 50)

Los procesos de fundición pueden ser clasificados en: proceso de molde permanente y proceso de molde unitario. Y así mismos puede ser subclasificados de acuerdo a los modelos: removibles ó unitarios, una segunda subclasificación puede ser de acuerdo al medio de moldeo usado para fabricar el molde.

En la tabla 1 se muestra una clasificación general de los procesos de fundición.

Tabla 1. Clasificación De Los Procesos De Fundición. (36)

Clasificación de los sistemas de fundición basado en el tipo de molde			
Procesos en molde Unitario	Modelos permanentes	Moledo de arena en verde	Arena sílica
			Arena Olivina
			Arena Cromita
			Arena de Zirconio
		Proceso de resinas curada	Proceso Shell
			Caja Caliente Furánica
			Caja Caliente Fenólica
			Homeado
		Proceso de resinas autofraguantes en caja fría.	Uretano Fenólico
			Furánico/SO ₂
			Acrílico/Epóxico
			Ester Fenólico
		Proceso de resinas autofraguantes (con catalizador)	Furánicas
			Fenólicas
	Aceite Uretano		
	Fenólico Uretano		
	Silicatos y Fosfatos	Poliuretano	
		Silicato de Sodio/CO ₂	
		Proceso Shaw (molde cerámico)	
	Yeso aglutinado	Fosfato de Alumina	
Yeso aglutinado	Yeso Aglutinado		
No aglutinados	Moldeado Magnético		
	Moldeado al Vacío		
Modelos desechables	Modelos de espuma	Colada a la Espuma Perdida (Lost Foam)	
	Modelos de Cera	Moldes de Blocks de Etil Silicato	
		Moldes Cerámicos de Shell de Etil Silicato	
		Mezcla Sílica Coloidal	
Colada por Gravedad a Baja Presión			
Proceso en molde permanente	Colada A presión	Colada a Alta Presión	
		Colada a Baja Presión	
	Colada centrífuga	Colada a Presión por Gravedad	
		Colada Centrífuga Vertical	
		Colada Centrífuga Horizontal	
	Procesos híbridos	Colada a Presión	
		Colada con Metal Semisólido	
		Proceso Atomización	

1. 3 Proceso en Molde Unitario (Arena en Verde).

1.3.1 Proceso en Modelo Permanente

En numerosos procesos se utilizan modelos permanentes, sin embargo para los diferentes tipos de moldeo el más usado es el moldeo de arena en verde.

Este tipo de modelos pueden ser fabricados con madera, plásticos, resinas, aluminio ó aceros son colocados en una placa integrando el sistema de colada el cual consta de una bajada (sprue), corredor(es) (runners), entradas (gates) y alimentadores (risers) que en conjunto son denominadas "placa modelo", esta es colocada en una caja de moldeo que consta de dos partes: caja superior (cope) y caja inferior (drag). La caja inferior es llenada con la mezcla de arena seleccionada de acuerdo al material de colada, es compactada y una vez fabricado el molde, la placa modelo es retirada dejando una cavidad en donde será vaciado el metal líquido.

1.3.1.1 Moldes de Arena en Verde.

Es el método más común y económico que consiste en la formación del molde, a partir de una mezcla de arena con un cierto grado de humedad. La mezcla de arena en verde es simplemente arena (sílica, olivina, cromita y zircón) que no se ha curado, es decir, que no se ha endurecido por homeado. El color natural de la arena va desde el blanco hasta el canela claro, pero con el uso se va ennegreciendo. La arena no tiene suficiente resistencia para conservar su forma, por ello se mezcla con un aglutinante para darle resistencia (Bentonita Cálcica y/o Bentonita Sódica); luego se agrega el % de humedad establecido. Esta arena puede ser reciclada constantemente añadiendo una cantidad determinada de aglutinante debido a la degradación de la bentonita.

1.3.1.1.1 Tipos de Arena.

Arena Sílica (SiO_2). Se encuentra en muchos depósitos naturales, y es adecuada para propósitos de moldeo por que puede resistir altas temperaturas sin descomponerse. Esta arena es de bajo costo, tiene gran duración y se consigue en una gran variedad de tamaño y formas de grano (angular, subangular o redonda). Por otra parte, tiene una alta relación de expansión cuando esta sometida al calor y tiene cierta tendencia a fusionarse con el metal.

La arena sílica pura no es conveniente por sí misma para el trabajo de moldeo puesto que adolece de propiedades aglomerantes. Las propiedades aglomerantes se pueden obtener por adición de 8 a 16% de arcilla. Los tres tipos de arcilla comúnmente usados son, la Caolinita, Illita y Bentonita. Esta última, usada con más frecuencia, proviene de cenizas volcánicas.

Arenas Naturales (semisintéticas). Estas se han formado por la erosión de las rocas ígneas; se mezclan adecuadamente con arcillas al extraerlos en las canteras y solo se requiere agregarles agua para obtener una arena conveniente para moldeos de piezas fundidas de hierro y metales no ferrosos. La materia orgánica encontrada en las arenas naturales impide que sea lo suficientemente refractaria para el uso a temperaturas elevadas.

Las Arenas de Moldeo Sintéticas. Se componen de Silice, a lo que se añade 3 a 5% de arcilla. Con las arenas sintéticas se genera menos gas ya que se requiere menos del 5% de humedad para que desarrolle la resistencia adecuada.

A medida que aumente el tamaño de las piezas conviene elegir también arena con grano más grueso, de mayor resistencia y refractariedad. La arena ideal, será aquella que se adapte para moldes destinados a distintos trabajos.

Este tipo de arena es recomendable ya que gracias al tamaño de partícula es posible obtener mayor permeabilidad, lo que conlleva a una disminución de los defectos de la pieza.

La fundición de piezas cuya superficie deben presentar excelente acabado superficial, es necesario el empleo de moldes fabricados con arena fina.

A continuación se indican algunos tipos de arena y la forma de empleo para construir moldes de fundición, según la naturaleza de cada metal.

Para el aluminio y sus aleaciones, se usa arena que no ha de ser ni muy gruesa ni demasiado fina, con un contenido de arcilla de 10 a 15% y de 2.5 a 3.5% de humedad.

1.3.1.1.2 Calidad de las arenas

Para determinar la calidad de la arena de fundición se hace necesaria algunas pruebas periódicas. Las propiedades cambian por contaminación con materiales extraños, por la acción del lavado en el recocido, por el cambio gradual y la distribución de los tamaños de grano y por la continua exposición de esta a altas temperaturas. Las pruebas pueden ser tanto químicas como mecánicas, aparte de la determinación de los elementos indeseables en la arena, las pruebas químicas son de poco uso. Varias de las pruebas están diseñadas para determinar las siguientes propiedades de la arena de moldeo:

Permeabilidad. La porosidad de la arena que permite el paso de los gases y vapores formados en el molde.

Refractariedad. La arena debe resistir las altas temperaturas sin fundirse.

La arena bien acondicionada es un factor importante en la obtención de una buena pieza fundida. Las arenas nuevas así como las usadas preparadas adecuadamente, deben tener las siguientes características:

- ↪ El aglutinante debe estar distribuido uniformemente en los granos de arena.
- ↪ El contenido de humedad esta controlado.
- ↪ Las partículas extrañas están eliminadas de la arena.
- ↪ La arena se ventila de tal manera que no se compacta y esté en condiciones propias para el moldeo.

Por razón de que acondicionar la arena a mano es difícil la mayoría de las fundiciones tienen equipos apropiados para esta operación.

Los molinos para la preparación de la mezcla de arena para moldeo en verde tienen dos rodillos o ruedas en los cuales esta montado una combinación de aspas. Las dos ruedas o rodillos están dispuestas de tal manera que la arena pueda ser procesadas de forma continua. Las ruedas proporcionan una acción intensa de frotamiento y mezclado. El resultado es una distribución de los granos de arena con el material aglutinante.

1.3.2 Proceso en Modelo Desechable

En este tipo de modelos no hay tanta variedad como en el caso de los modelos permanentes, ya que en estos el modelo es fabricado y usado una sola vez. Uno de los materiales más comunes en es tipo de modelos es el Poliestireno (en el caso del proceso Lost Foam y Replicast) ó la cera pérdida. Ambos procesos actualmente incrementan su uso. Estos procesos de colada son conocidos desde hace poco menos de 6000 años, pero este tipo de colada está teniendo un gran auge a partir de la segunda mitad del siglo 20, para la producción de piezas comerciales.

1.4 Sistema de colada del molde.

El conjunto de ductos que llevan el metal líquido a la cavidad de molde se llama sistema de colada, generalmente están constituidos por una tina de vaciado, comunicando a un ducto vertical conocido como bajada, y este con un canal o corredor a través del cual el metal fluye desde la base de la bajada a la cavidad del molde. El propósito de este sistema es, conducir el metal líquido hasta la cavidad del molde.

Un buen diseño del sistema de colada debe promover las siguientes condiciones:

- El metal debe entrar a la cavidad con el mínimo de turbulencia.
- La erosión de los ductos o superficie de la cavidad deben ser evitadas con una regulación apropiada del flujo del metal.
- Se debe prever que no entre la escoria u otras partículas extrañas a la cavidad del molde. La tina de vaciado debe estar próxima a la parte superior a la entrada de la bajada, facilitando el vaciado y eliminando la escoria. El metal debe ser vaciado de tal manera que la copa de vaciado y el agujero del bebedero estén llenos todo el tiempo.
- El metal debe promover una solidificación direccional.

1.5 El proceso Lost Foam con Modelos de Poliestireno Expandido (EPS) (20, 21, 25, 27, 31, 35, 41)

El proceso de colada por Lost Foam fue originado en 1958 cuando H.F. Shroyer gano la patente por un método de colada al que llamo de cavidad perdida, usando un modelo de espuma de Poliestireno inmerso en arena en verde tradicional. El patrón de Poliestireno se descompone en la arena al ser vaciado el metal fundido, este remplaza al modelo de Poliestireno, duplicando exacta y completamente la forma original del modelo. Así como otros métodos de fundición, éste requiere que un modelo sea producido para cada colada porque se evapora (se pierde) en este proceso.

Este proceso se puede utilizar para materiales ferrosos y no ferrosos ya que la temperatura a la que se descompone la espuma de Poliestireno es mucho menor que la temperatura requerida para fundir el mayor número de metales y aleaciones.

Por medio del proceso de Lost Foam se pueden producir piezas de todos los tamaños, aunque para tamaños muy grandes se recomiendan tecnologías más avanzadas.

Las tolerancias típicas son de +/- 0.005 in/in para un proceso de Lost Foam. Esta tolerancia va a variar dependiendo del tamaño de las piezas, la complejidad y la geometría. Subsecuentemente se debe tener cuidado con la continuidad de el modelo ya que este se reproducirá perfectamente al vaciar el metal fundido, esto tiene muy buenos resultados ya que si se tiene un modelo muy bien hecho, la pieza terminada puede estar ausente de procesos de maquinado.

El proceso de Lost Foam es usado para aplicaciones críticas, incluyendo cabezas de motor, motores de barcos, válvulas para alta presión, etc. Si este tipo de piezas se someten a pruebas de rayos-X muestran características comparables a otros procesos de fundición.

1.5.1 Los Pasos Básicos del Proceso son:

- Se fabrica el modelo y el sistema de colada usando espuma de Poliestireno moldeada a presión, de forma automatizada ó manual.
- El modelo de espuma de Poliestireno y el sistema de colada son pegados juntos para formar un patrón en forma de árbol.
- El árbol es cubierto con una capa de pintura refractaria permeable y secado bajo condiciones controladas.
- El árbol cubierto y seco es invertido en un sistema vibratorio junto con arena y se realiza la compactación por medio de vibración.
- El metal fundido es vertido sobre la copa del sistema de colada el cual entra directamente a través del árbol y reemplaza al modelo de poliestireno.
- Las operaciones restantes (mezclado, corte, acabado, etc.), son similares a los otros procesos de colada.

Las principales ventajas que tiene el proceso de Lost Foam en comparación con el Moldeo de arena en Verde son las siguientes:

1.5.2 Ventajas del proceso Lost Foam

- Hay gran precisión en las piezas coladas, ya que la utilización del EPS permite tolerancias ajustadas.
- Sencillez en sus etapas y facilidad de reciclado de la arena debido a la ausencia de aglutinante, lo que supone un ahorro en algunos de sus materiales.
- La cantidad de arena empleadas es, generalmente, menor que en un método tradicional.
- No es necesaria la utilización de corazones y la intervención del personal especializado en su producción.
- Los modelos pueden prepararse uniendo partes más sencillas con adhesivos adecuados.

- ↻ Facilidad de automatización lo que supone una disminución de costos de operación y defectos en modelos, moldes y piezas.
- ↻ Mejores condiciones de acabado superficial que con el moldeo de arena en verde, y ausencia de rebabas y líneas de partición en la pieza final.
- ↻ Libertad de diseño, siendo ilimitada.
- ↻ Posibilidad de incorporar insertos metálicos en la pieza de fundición.

En la literatura se reportan algunas comparaciones prácticas del proceso Lost Foam con algunos otros procesos de fundición. (36) esto se muestra en la tabla 2.

Tabla 2

Propiedades de Tracción de una aleación de Aluminio 319		
Obtenida mediante un Proceso de Lost Foam		
Condiciones	Resistencia a la Cedencia (MPa)	Resistencia a la Tensión (MPa)
Colada por proceso de Lost Foam sin tratamiento	112.1	137.5
	107.2	152.4
	134.9	149.8
	130.1	159.9
Colada por proceso de Lost Foam refinación y modificación de grano	127.1	144.4
	125.1	140.0
	117.9	137.9
Colada en Arena	136.8	165.0
	125.0	148.6
Colada en molde permanente	138.0	199.0

1.5.3 Aplicaciones

El principal campo de aplicación es la industria automotriz. Así, muchos fabricantes producen piezas con modelos de EPS. Últimamente se ha extendido el proceso de Lost Foam, desde la industria automotriz a otros sectores que precisan de piezas o componentes de fundición.

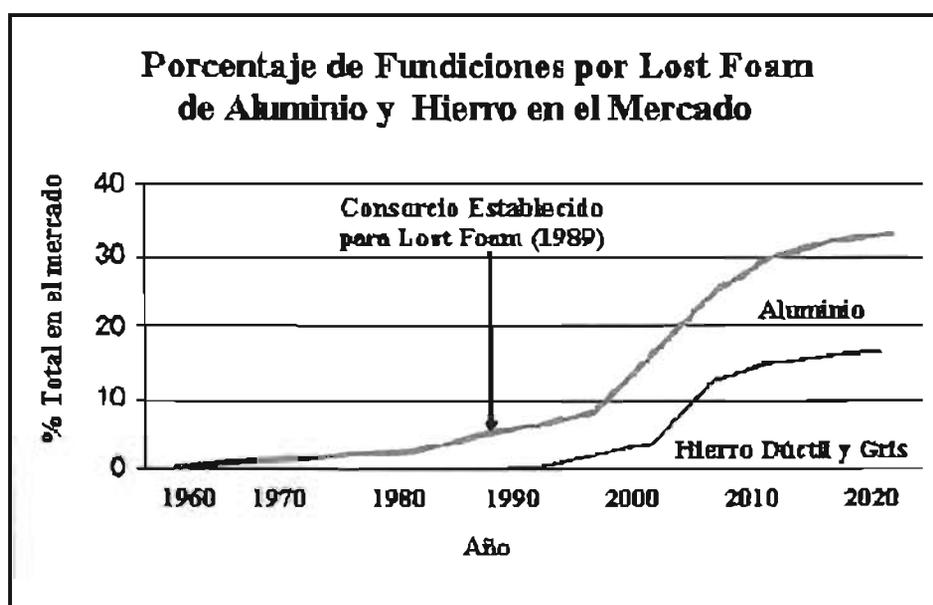
Otra aplicación es la escultura ya que en este caso, el modelo perdido, y comparado con el de cera perdida, no solo permite la supresión del molde negativo, sino que prescinde de todo un repertorio de operaciones tediosas como la elaboración de un patrón, la preparación del molde por pieza, la fabricación del corazón, el vertido de la cera y la eliminación de la misma, la cocción del molde, etc.

En la actualidad, se están integrando en la masa de EPS materiales heterogéneos que serán incorporados plásticamente a la obra escultórica.

La gráfica 1 muestra algunos datos encontrados en la literatura que indican la tendencia que puede llegar a tener el uso del proceso de Lost Foam. (47)

Gráfica 1.

Un estimado de 9.4 millones de toneladas de coladas fabricadas por Lost Foam (1994-2005) ahorrando un estimado de 3 trillones de BTU



1.5.4 Poliestireno. (52)

1.5.4.1 Generalidades

El Poliestireno Expandido deriva principalmente del monómero de estireno y es expandido para formar una estructura celular esencialmente cerrada.

Cuando se considera el comportamiento al fuego de cualquier material de construcción es importante darse cuenta de que la evaluación debe estar basada en su comportamiento en condiciones finales de uso. Este comportamiento dependerá no sólo de la naturaleza química del material sino en gran manera de su estado físico.

De este modo, los factores importantes que deben ser considerados a la hora de determinar el potencial riesgo de incendio del EPS son:

- La densidad de la espuma y la forma del producto
- Su configuración relativa a una fuente de ignición
- El uso de cualquier adhesión a un substrato o revestimiento
- La situación del producto (que influirá en el transporte del calor)

Cuando se quema, el Poliestireno Expandido se comporta como un material semejante a la madera, el papel, etc. Los productos de combustión son básicamente monóxido de carbono y estireno: durante un incendio el estireno puede descomponerse aún más, despidiendo óxidos de carbono, agua y una cierta cantidad de hollín (humo).

El EPS se fabrica en dos clases: calidad estándar y calidad modificada con retardantes de ignición, designándose esta última con el código "SE". Las clases con retardantes de llama o grados "SE" hacen al material expandido mucho más difícil de arder, reducen considerablemente las tasas de propagación de la llama.

En algunos países como los escandinavos, sólo se utiliza la clase Standard, mientras que en otros, como en Alemania, sólo se emplea la clase SE. Sin embargo, en muchos países europeos, se utilizan las dos clases.

Si el EPS se expone a temperaturas superiores a los 100°C, empieza a ablandarse, a contraerse y finalmente se funde. A temperaturas más altas se forman productos combustibles gaseosos por descomposición de la masa fundida. La duración de la exposición al calor y la cantidad de aire que fluya alrededor del material (la disponibilidad de oxígeno).

El EPS fundido no arderá normalmente debido a chispas de soldadura o cigarrillos encendidos, sin embargo, pequeñas llamas harán arder fácilmente al EPS a no ser que contenga aditivos retardantes de llama (grado SE). La temperatura umbral de ignición del EPS Standard "Pirolisis" sucede aproximadamente de 350 °C a 400 °C (662 °F a 752 °F) (ASTM E1591-00) y su temperatura de ignición espontánea es de aproximadamente 427 °C (800,6 °F) (ASTM D2883-95), estos valores indican que si el EPS fundido se desintegra, los gases combustibles se formarán únicamente alrededor de los 350 °C. En ausencia de una fuente de energía (una llama) la temperatura de auto ignición del EPS fundido en su clase Standard es 450°C. Después de la ignición del EPS de clase Standard, se propagará el fuego por la superficie expuesta de EPS con un calor de combustión de aproximadamente 17,400 BTU/ libra (ASTM E1623-99), y continuará hasta que se haya consumido todo el EPS. La baja densidad de la espuma contribuye a la facilidad de arder debido a una mayor cantidad de aire (98%) frente a la cantidad de Poliestireno (2%), la masa del material presente es baja y por lo tanto la cantidad de calor desprendida es también menor.

El contenido global de calor de los materiales influye en la severidad del fuego en términos de aumento del fuego y la tasa de liberación de calor contenido es de gran importancia. Esto depende en gran medida de las condiciones de combustión. La liberación de calor por parte de los productos de EPS es aproximadamente tres veces más rápida que la de la madera blanda, pero es de mucha menor duración (6, 7, 8).

En la tabla 3 se muestran las propiedades físicas del Poliestireno expandido

Tabla 3. Propiedades Físicas del Poliestireno (52)

PROPIEDADES FÍSICAS DEL POLIESTIRENO EXPANDIDO						
		Ensayo Según	Unidad	Resultado del Ensayo con Poliestirenos de tres diferentes densidades		
Densidad		DIN 53420	Kg/m ³	15	20	30
Coeficiente de Conductividad térmica medido a +10°		DIN 52612	W/(m°k)	0,036	0,034	0,031
Resistencia a la compresión con un 10% de deformación instantánea		DIN 53421	N/mm ²	0,05-0,11	0,10-0,16	0,19-0,25
Esfuerzo continuado de compresión con deformación < 2%			N/mm ²	0,012-0,025	0,020-0,035	0,036-0,062
Resistencia al Corte		DIN 53427	N/mm ²	0,08-0,13	0,12-0,17	0,21-0,26
Resistencia a la Flexión		DIN 53423	N/mm ²	0,06-0,030	0,15-0,39	0,36-0,62
Resistencia a la Tracción		DIN 53430	N/mm ²	0,13-0,19	0,18-0,36	0,30-0,48
Modulo de elasticidad (ensayo de compresión)		DIN 53457	N/mm ²	1,6-5,2	3,4-7,0	7,7-11,3
Estabilidad Dimensional con elevadas temperaturas	Breve duración	En base a DIN 53424	°C	100	100	100
	Larga duración con 5000N/m ²	En base a DIN 18164	°C	80-85	80-85	80-85
	Larga duración con 20000N/m ²	DIN 18164	°C	75-80	80-85	80-85
Coeficiente de Dilatación lineal			1/K	5,7-10 ⁻⁵	5,7-10 ⁻⁵	5,7-10 ⁻⁵
Calor Específico		DIN 4108	J/(kg°k)	1210	1210	1210
Absorción de agua con Inmersión (%V)	Después de 7 días	DIN 53434	φ ₁ -%	0,5-1,5	0,5-1,5	0,5-1,5
	Después de 28 días		φ ₁ -%	1,0-3,0	1,0-3,0	1,0-3,0
Permeabilidad al vapor de agua		DIN 52615	g/(m ² °d)	40	35	20
Factor de resistencia a la difusión del vapor de agua		DIN 4108	1	20/50	30/70	40/100

1.5.4.2 Toxicidad (53)

La combustión del EPS produce humo negro, la toxicidad de los humos liberados es considerablemente menor que aquellos liberados por otros materiales de uso común, para las dos clases de EPS (std. y tratado con ignífugantes). La toxicidad de los humos se midió para madera, lana, seda, algodón, algodón tratado con retardantes de llama, y dos tipos de EPS. En el caso del EPS, la toxicidad de humos fue considerablemente menor que en los otros materiales. Una investigación más profunda de la toxicidad de humos de EPS también ha sido realizada de acuerdo con el método DIN 53436, un ensayo de toxicidad de combustión a pequeña escala, el cual aporta resultados relevantes para fuegos a escala real.

En estos ensayos las probetas se calientan a 300, 400, 500 y 600 °C. Además de diversos tipos de EPS, productos naturales como la madera de pino, aglomerado, corcho expandido y 'triplex', caucho, fieltro y cuero también fueron estudiados

Los humos del EPS presentaban, un nivel de toxicidad equivalente o incluso inferior al de los humos procedentes de los productos naturales en todo el rango de temperaturas estudiado. El resultado del EPS es muy bueno basado en el volumen de las probetas, debido a la baja densidad y ligereza del EPS (98% de aire). Además, no se ha encontrado ningún efecto negativo en la presencia de retardantes de llama en el EPS ignífugado.

La tabla 4 muestra que cantidades de monóxido de carbono y estireno (monómero) que se desprenden cuando se quema el EPS. Su toxicidad relativa puede ser estimada a partir de los niveles de su valor de toxicidad por inhalación aguda. (50 ppm con un periodo de inhalación de 30 minutos) siendo estos de 0,5 % en volumen para el monóxido de carbono y del 1,0 % en volumen para el estireno.

La toxicidad por inhalación aguda del estireno es menor que la del monóxido de carbono y su concentración en la composición de los productos de EPS es también menor a las elevadas temperaturas que encontramos durante un incendio.

El monóxido de carbono puede ser fatal si se inhala entre 1 y 3 minutos a concentraciones de 10,000 ppm a 15,000 ppm. El estireno tiene un olor característico que puede ser detectado en concentraciones entre 25 ppm y 50 ppm y que llega a ser insoportable entre 200 ppm y 400 ppm. Esto previene la necesidad de una evacuación inmediata de la zona. La irritación de los ojos y náuseas pueden ocurrir a 600 ppm y algunos daños neuronales pueden ocurrir a 800 ppm.

En un incendio el estireno es probable que se descomponga para formar monóxido de carbono, dióxido de carbono y agua.

Tabla 4. Toxicidad de humos de EPS (53)

TOXICIDAD DE HUMOS DE EPS					
Muestra	Fracciones emitidas (volumen) en ppm a diferentes temperaturas				
	Gases desprendidos	300°C	400°C	500°C	600°C
EPS (std)	Monóxido de Carbono	50 *	200 *	400 *	1000 *
	Estireno Monómero	200	300	500	50
	Componentes Aromáticos I	fracción	10	30	10
	Bromuro de Hidrógeno	0	0	0	0
EPS con retardantes	Monóxido de Carbono	10 *	50 *	500 *	1000 *
	Estireno Monómero	50	100	500	50
	Componentes Aromáticos	fracción	20	20	10
	Bromuro de Hidrógeno	10	15	13	11

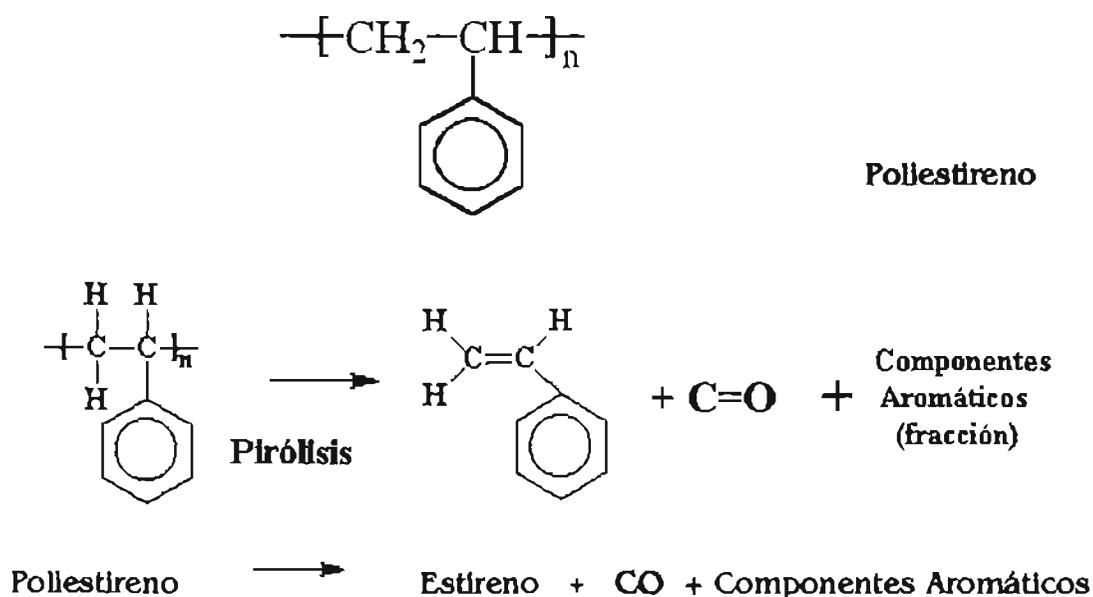
* ardiendo sin llama. Notas: condiciones de ensayo según DIN 53436; índice de flujo de aire 100 l/h; Probetas de ensayo de 300 mm x 15 mm x 20 mm comparadas en condiciones normales de uso final.

1.5.4.3 Riesgos (51)

El Poliestireno (PS) presenta una amplia gama de aplicaciones como espumas aislantes y aplicaciones rígidas como tazas y juguetes. Su producción implica el uso del benceno, sustancia clasificada como cancerígena en humanos y otras, como el estireno y el 1,3-butadieno que son posibles carcinógenos en humanos. El estireno también se conoce por afectar al sistema reproductor. El Poliestireno puede representar un grave peligro en los incendios. La quema de Poliestireno supone la formación de sustancias como el estireno e hidrocarburos aromáticos policíclicos y, si están presentes pirorretardantes bromados o clorados, se liberan cloruro de hidrógeno y dioxinas; el carcinógeno óxido de estireno se libera durante el proceso (DTI, 1993).

Técnicamente, el Poliestireno es reciclable, sin embargo las tasas de reciclaje reales son pequeñas, aunque más altas que las del PVC. Aunque el Poliestireno es menos problemático que el vinilo porque contiene muchos menos aditivos y no tiene cloro en su composición, no es aconsejable como sustituto de este plástico, a causa de los peligros asociados con las materias primas que utiliza, algunas de las cuales son carcinogénicas o tóxicas para el sistema reproductor.

Reacción de descomposición del Poliestireno.



CAPITULO II.

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Aleaciones de Aluminio (48, 49, 50)

El aluminio y sus aleaciones se caracterizan por su relativa baja densidad, elevada conductividad eléctrica y térmica, elevada ductilidad (esto es evidente en el aluminio puro, que se puede convertir en papel) y resistencia a la corrosión en algunos medios, incluyendo el atmosférico. El Aluminio tiene una estructura cúbica centrada en las caras y es dúctil incluso a temperatura ambiente. La resistencia mecánica del aluminio se logra por deformación, aleación y por tratamiento térmico; sin embargo ambos procesos disminuyen la resistencia a la corrosión.

Algunas de las aplicaciones más comunes de las aleaciones de aluminio son: partes estructurales de los aviones, latas para bebidas refrescantes, partes de las carrocerías de autobuses y de los automóviles (culatas, pistones y colectores de escape). Actualmente se presta mucha atención a las aleaciones de aluminio y de otros metales de baja densidad (Mg, Ti) como materiales utilizados en los transportes, debido al efecto de ahorro de combustible. Una importante característica de estos materiales es la resistencia específica, cuantificada como la relación entre resistencia a la tracción y densidad. Aunque una aleación de estos metales tenga una resistencia a la tracción inferior a la de un material más denso (acero), para un peso determinado puede aguantar una carga mucho mayor.

En cuanto a la calidad de las aleaciones de Aluminio por fundición, se debe tener control sobre la cantidad de inclusiones, partículas de fases secundarias así como el contenido de gas disuelto dentro del metal (principalmente hidrógeno). Por otro lado es muy importante controlar otros factores como el tamaño de grano, ya que este determina en cierta forma la homogenización de las propiedades de la aleación. Regularmente se prefieren tamaños de grano pequeño y homogéneo, esto se puede lograr haciendo un tratamiento al metal líquido como lo es la Refinación de Grano con Ti ó B.

También es muy importante la morfología de la fase eutéctica Al-Si, pues dependiendo de ésta se pueden modificar las propiedades mecánicas de las aleaciones de Aluminio. Las aleaciones hipoeutécticas de Aluminio en el momento de solidificar normalmente se obtiene una microestructura que contiene silicio en forma de placas aciculares las cuales crean concentradores de esfuerzos en la matriz y disminuyen las propiedades.

2.1.1 Influencia de la Rapidez de Solidificación Sobre la Microestructura. (1)

Lograr la microestructura deseada en una aleación hipoeutéctica Al-Si puede ser influenciada por diversos factores como la velocidad de solidificación, la temperatura de colada, el tipo de molde, etc. Cuando nos encontramos que la velocidad de solidificación es elevada se producen microestructuras muy finas que por lo regular presentan mejores propiedades mecánicas en comparación con aleaciones que presentan una velocidad de solidificación lenta, ya que el tamaño de grano incrementa su tamaño.

Como en la mayoría de los casos resulta complicado controlar la velocidad de solidificación se recurre a tratamientos adicionales al metal líquido como la refinación de grano y Modificación de silicio eutéctico, ya que su efecto repercute directamente sobre la macroestructura y microestructura respectivamente, por lo tanto en las propiedades mecánicas.

2.1.2 Modificación de Aleaciones Aluminio. (2, 3, 6, 7, 8, 9)

Las aleaciones de Aluminio más utilizadas comercialmente son las aleaciones Al-Si, estas tiene una gran gama de aplicaciones industriales, como en la industria automotriz (monoblocks, pistones rines, etc.). Pero estas aleaciones tienen un problema debido a que durante la solidificación de las aleaciones Al-Si hipoeutécticas, la fase líquida que rodea al arreglo dendrítico sufre una transformación que provoca la formación de fases eutécticas, el silicio precipita en forma de placas aciculares, lo cual hace que sus propiedades mecánicas

sean bajas, esto porque la punta de los cristales de silicio eutéctico actúan como concentradores de esfuerzos y pueden generar grietas.

Para evitar este problema se realiza un tratamiento de modificación, el cual ayuda al control de la microestructura, ya que hace que la fase eutéctica de las aleaciones Al-Si se transformen a una estructura fibrosa fina (estructura de coral). Este tratamiento regularmente es aplicado para lograr un aumento en la resistencia a la tracción y un aumento en la elongación. La microestructura va a depender del nivel de modificación, ya que ésta puede asumir diferentes morfologías a través de la alteración de la nucleación y el crecimiento del eutéctico Al-Si.

La modificación de la estructura puede llevarse a cabo a través de pequeñas adiciones de ciertos elementos químicos de los grupos IA, IIA y lantánidos. De estos elementos, sodio, estroncio y antimonio han mostrado ser los únicos que se pueden aplicar a nivel comercial. El sodio fue el primer elemento que se usó en un tratamiento de modificación. Sin embargo, este elemento es un modificador temporal que pierde su efecto debido a la alta temperatura del baño líquido y al tiempo de permanencia. Hoy en día, el estroncio ha reemplazado al sodio, debido a que tiene altos niveles de recuperación y a que no pierde su efecto modificador tan rápido como el sodio. Debido a las desventajas asociadas con el uso de sales de sodio o sodio metálico, éstos se han substituido por aleaciones maestras Al-Sr. En el caso de una aleación A356 modificada con una aleación maestra de estroncio, se reporta un incremento en su resistencia a la tracción y en el porcentaje de elongación.(37)

Los modificadores contienen compuestos intermetálicos que promueven la modificación. La combinación de algunos modificadores, en ocasiones inhibe la modificación si no se controlan sus cantidades. Existen modificadores disponibles, básicamente en dos formas: sales y aleaciones maestras. Los elementos más comúnmente utilizados como modificadores son: Na (en forma de sales o puro, pero su eficiencia es muy baja debido a su alta reactividad; pérdidas por oxidación, emisión de gases tóxicos y poco control sobre las impurezas residuales y esto lo hace costoso) y Sr (en forma de sales o aleaciones maestras). Para poder elegir el modificador adecuado hay que tomar en cuenta diversos factores como: composición química, presentación física, adición y recuperación, solubilidad y temperatura de trabajo, formación de

compuestos intermetálicos, tiempo de reacción, pérdida del efecto modificador, interacción con otros elementos, influencia sobre la fluidez y porosidad de la matriz base.

Por lo tanto las aleaciones maestras son más utilizadas, principalmente las aleaciones que contienen Sr. Cuando aplicamos un tratamiento de modificación con una aleación maestra que contiene Sr, lo que se busca es que está se funda y se disuelva en el Al líquido, de otro modo el tratamiento no se realizará de forma adecuada. Se sabe que las aleaciones con mayor contenido de Sr, se caracterizan por una reacción exotérmica en el momento de la disolución (700° aprox.) y las aleaciones con bajos contenidos de Sr su disolución aumenta proporcionalmente con el incremento de temperatura (700°-750°).

La cantidad de modificador adicionado va a depender del nivel de modificación que se desee, para Sr se recomiendan niveles de 0.01 % wt a 0.02 %wt Sr, aunque se puede llegar a 0.1% wt Sr para una modificación completa.

Si se quiere obtener buenos resultados al utilizar aleaciones maestras como modificadores, es necesario un tiempo de permanencia en el metal líquido, a esté tiempo se le conoce como tiempo de contacto, y va a variar dependiendo de la aleación a tratar, el nivel de modificación que se requiere, la técnica de fusión utilizada, la temperatura de fusión de la aleación, la temperatura de trabajo, el nivel de agitación y la rapidez de disolución.

El efecto del modificador va a depender de la pérdida o disminución de la concentración del elemento modificante, después de la adición en el metal líquido, y esto es por la oxidación o volatilización de dicho elemento. Esta disminución es más rápidamente observada en aleaciones que son tratadas con Na, por eso resulta difícil controlar el nivel de modificación. En el caso contrario el Sr tiene una disminución mucho menor.

La rapidez de la pérdida del efecto, modificador depende de las condiciones en que se encuentre el metal líquido, como lo son el área superficial fundida, la temperatura del metal, nivel de agitación, etc. En el caso de las aleaciones Al-Si, es importante asegurar que la composición química de llegada contenga un nivel de P controlado (< 5 ppm), ya que este al igual que el Sb nulifica la acción modificadora del Sr y el Na. Sin embargo se ha demostrado que se pueden utilizar Na y Sr juntos ya que estos no reaccionan entre sí.

2.1.3 Refinación de Aleaciones de Aluminio (3, 4, 15)

Las aleaciones de Aluminio así como otras aleaciones ligeras, normalmente presentan un crecimiento heterogéneo (granos columnares y equiaxiales) durante la solidificación. El grado de heterogeneidad de una macroestructura va a depender de diversos factores como: la composición química, la temperatura de vaciado del metal, los gradientes térmicos provocados por el molde y la presencia de agentes nucleantes (inclusiones, intermetálicos y de las características superficiales del molde). Comúnmente los elementos aleantes provocan un decremento en el tamaño de grano. Cantidades considerables de elementos aleantes que tiene una alta solubilidad en Aluminio (cobre, magnesio y zinc) desarrollan naturalmente un grano equiaxial compacto más pequeño que las aleaciones que contienen silicio. Las aleaciones de Cobre son más fáciles de refinar que aquellas que contiene grandes cantidades de Silicio.

El refinamiento de grano se efectúa a través de la adición de nucleantes al metal fundido. Los elementos normalmente empleados como refinadores de grano son el titanio o mezclas Ti/B. El titanio y el boro fueron originalmente introducidos dentro de las aleaciones líquidas comercialmente, en forma de titanio metálico, en sales refinadoras y en forma de tabletas que contenían fluorotitanato de potasio (K_2TiF_6) y fluoroborato de potasio (KBF_4) como ingredientes activos. Las sales refinadoras de grano reaccionan con el metal fundido para formar las fases intermetálicas diboruro de titanio (TiB_2) y/o aluminuro de titanio ($TiAl_3$), las cuales funcionan como agentes nucleantes y favorecen el refinamiento de grano. Sin embargo, debido a las inherentes desventajas asociadas con el uso de sales (una cantidad de dichas sales se va a la escoria), éstas han sido substituidas por aleaciones maestras Al-Ti y Al- Ti-B.

Las aleaciones maestras más comunes para realizar tratamientos de refinación son: Al-5Ti-1B, Al-6Ti-1B, Al-10Ti-1B, se utilizan dependiendo de la composición química de la aleación que se va a refinar y el nivel de refinación que se quiere obtener. Los niveles de refinación que comúnmente se emplean en la industria son de 0.02% wt a 0.20% wt de Ti. La aleación más utilizada para refinar aleaciones de Aluminio es la aleación maestra Al-Ti-B. Estas contienen dos fases intermetálicas activas, $TiAl_3$ y TiB_2 . En aleaciones maestras que contienen el intermetálico $TiAl_3$ en forma de bloques reaccionan más rápido (2 a 5 minutos) cuando se agregan a aluminio fundido que aquellas que lo contienen en la forma de placas (10 a 15 minutos).

El efecto de refinamiento de grano de aleaciones maestras Al-Ti se desvanece rápidamente cuando éstas tienen concentraciones menores a 0.10 % Ti debido a la disolución de $TiAl_3$. En contraste, la adición de boro como en el caso de aleaciones maestras Al- Ti-B, permite tanto realzar la potencia del refinamiento de grano, como incrementar la resistencia a la pérdida del efecto refinador.

El refinamiento de grano es uno de los tratamientos más comúnmente efectuados en el metal líquido para alterar la estructura de las fundiciones, ya que este causa diversos efectos a la fundición como:

➤ Metales con grano grueso son más propensos a presentar grietas en caliente durante la solidificación, porque estas desarrollan áreas de esfuerzo más localizadas, por el contrario con granos más pequeños se puede prevenir las líneas de contracción y las grietas en la pieza final.

➤ Mejoramiento de propiedades mecánicas en secciones más gruesas. Las propiedades mecánicas de una pieza con un grano refinado son mejoradas, ya que el refinador reduce el tamaño de la fase primaria de Al_3Ti , evitando la presencia de un tamaño de grano grande y columnar; conduce también a una dispersión de una segunda fase. Produce una distribución más homogénea de los elementos aleantes la cual también es responsable de la mejora de las propiedades mecánicas.

➤ Se logra una mejor alimentación del metal líquido y acabado superficial. Controlando el tamaño de grano, la fricción puede reducirse en partes que requieren un acabado fino.

➤ El nivel de refinamiento de grano es directamente proporcional a la homogenización de la resistencia y la vida a la fatiga normalmente se incrementa.

El refinamiento de grano es un tratamiento adecuado para homogeneizar el tamaño de grano, se tienen que tomar en cuenta diversos factores como: efecto refinador, tiempo de contacto, composición química del metal y de la adecuada selección del agente refinador.

El tiempo de contacto comprende desde el momento en que se adiciona el refinador al metal líquido hasta que se obtiene el tamaño de grano deseado y adecuado de acuerdo al nivel de refinación. Este depende del tipo de aleación, la técnica de adición, la temperatura de trabajo y la agitación del metal líquido.

Las aleaciones de aluminio a las cuales se les somete a un tratamiento de refinamiento responden dependiendo de la composición del metal de llegada ya que muchas veces se parte de chatarra y está pudo haber sido refinada antes y contener aun trazas de algunos elementos como Ti ó B, principalmente de B, ya que este tiene un efecto refinador permanente a diferencia del Ti que tiene un efecto refinador no permanente. Esta diferencia en la composición del metal puede mejorar la respuesta de las aleaciones ante el tratamiento de refinación. Cuando se quiere realizar una adecuada refinación de grano es muy importante hacer una buena selección de aleaciones maestras de acuerdo al nivel de refinación que se quiere obtener, junto con una adecuada técnica de fusión. Cuando se tiene un exceso de Ti (mayor a 0.25%) se puede formar un intermetálico de aluminio de Titanio ($TiAl_3$), el material puede fragilizarse y además aumentar la contracción.

El tratamiento de refinación se hace en estado líquido para que la aleación maestra pueda incorporarse de una manera eficaz, el baño líquido debe agitarse para asegurar la homogénea dispersión de agentes nucleantes

2.1.4 Porosidad. (1,13)

En las últimas dos décadas la producción de piezas coladas base aluminio han experimentado un crecimiento sostenido. Este auge en la industria de la fundición de aluminio se debe principalmente a la necesidad de utilizar componentes automotrices y aeroespaciales de baja densidad y elevada resistencia mecánica, características que satisfacen los productos base Al, los cuales además presentan una excelente resistencia a la corrosión. Es así que los aceros y las fundiciones de hierro han sido desplazadas paulatinamente por las piezas coladas de Al.

Dependiendo de las aplicaciones de las piezas coladas, así como las exigencias durante el desempeño de las piezas, será la calidad de las mismas. Es evidente que en aplicaciones automotrices y aeroespaciales donde se requieren satisfacer estrictos patrones de calidad, la fabricación de las piezas coladas juega un papel fundamental para lograr cumplir con los estándares de calidad.

Dentro de las dificultades que se presentan durante el procesamiento del aluminio por la vía de la fundición, se encuentra la facilidad del Al a oxidarse (formación de inclusiones no metálicas) y la tendencia a absorber gases, los cuales presentan una alta solubilidad en Al líquido pero una baja solubilidad en Al sólido, por lo que durante la solidificación estos gases disueltos pueden producir micro y macro-porosidades. Especialmente dañino a las propiedades mecánicas de las piezas coladas de Al es la presencia de hidrógeno, contracciones interdendríticas o a ambas.

El hidrógeno se genera por el contacto del Al líquido con la humedad de acuerdo a la siguiente reacción:

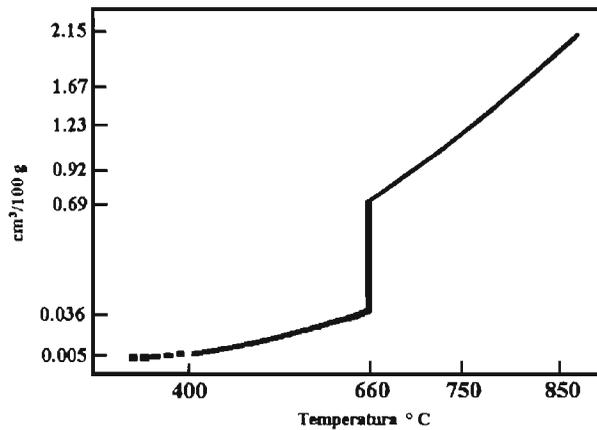


En el caso de la presencia de hidrógeno, al formarse una capa de óxido sobre el aluminio líquido esta capa evita que el hidrógeno salga, quede atrapado y se mezcle con el metal líquido durante la turbulencia generada durante el vaciado.

Una forma simple de distinguir entre un microrechupe y una porosidad por gas (sopladura), basado en análisis de imágenes ha demostrado que es más común que se presente porosidad por hidrógeno atrapado y una combinación de atrapamiento de gas y microrechupes; que sólo microrechupes, ya que estos sólo se dan cuando los niveles de gas son muy bajos, es decir que hubo una desgasificación previa a la colada del metal líquido. Dicha desgasificación se hace con un gas inerte (regularmente Ar), con la cual se reduce el contenido de hidrógeno.

En la grafica 2 se muestra como se incrementa rápidamente el contenido de hidrógeno en función de la temperatura. (1)

Grafica 2. Efecto de la temperatura sobre la solubilidad de Hidrógeno en Aluminio.



Históricamente, la cantidad relativa de microrechupes en comparación con la microporosidad por gas que se dan dentro de una fundición de Aluminio, muestra que hasta ahora se han tenido dificultades para determinar si es microrechupe o porosidad por gas (sopladura), recientemente se han llevado a cabo estas comparaciones usando mediciones de densidad (principio de Arquímedes), el cual provee valores de microporosidad dentro del metal. Con el desarrollo de sistemas de cómputo basados en análisis de imagen, es posible estudiar la microporosidad poro por poro, haciendo una factible discriminación entre microrechupes y porosidad por gas (sopladuras), basado en diferencias en las características microestructurales.

Se sabe que la porosidad es una característica de las aleaciones de rango largo, como lo es la aleación de Aluminio A356. Esta puede ser clasificada en:

Porosidad Difusa, la cual se caracteriza por pequeñas cavidades distribuidas en la pieza, las cuales se forman durante la solidificación.

Porosidad Axial o Localizada, en esta las pequeñas cavidades se presentan en la parte central de la pieza (microrechupe), y esto se debe a la velocidad de solidificación.

CAPITULO III.

FASE EXPERIMENTAL

3.1 Hipótesis

↷ En la producción de piezas por el proceso de Lost Foam, a partir de una aleación A-356 (sin refinar y sin modificar) se obtiene un tamaño de grano heterogéneo, debido a que la degradación del polímero en la frontera del metal se presenta por medio de una pirolisis, está exige energías mayores a 1 kJ/g. Debido a estas pérdidas en la frontera del metal, se generan al interior de la pieza fuertes gradientes térmicos.

↷ Para el proceso de moldeo en verde a partir de una aleación A-356 (sin refinar y sin modificar) se obtiene un tamaño de grano grande debido a la baja conductividad térmica de la arena.

↷ El tratamiento de refinación con una aleación maestra Al-5%Ti-1%B, para el proceso de Lost Foam a partir de una aleación A-356 promueve un grano homogéneo y fino comparable con el proceso de moldeo en verde.

↷ El tratamiento de modificación con una aleación maestra Al-10%Sr, para el proceso de Lost Foam a partir de una aleación A-356 modifica favorablemente la morfología de la fase eutéctica Al-Si de la matriz metálica comparable con el proceso de moldeo en verde.

↷ El porcentaje de porosidad de una aleación A-356 colada mediante el proceso de Lost Foam será mayor en comparación con el proceso de moldeo en verde.

3.3 Materiales y Equipo.

3.3.1 Materiales.

Los materiales utilizados se enlistan a continuación:

- ↪ Aleación de Aluminio A-356.
 - ↪ Refinador: aleación maestra Al-5% Ti -1%B.
 - ↪ Modificador: aleación maestra Al -10% Sr.
 - ↪ Mezcla de moldeo: Arena Sílica Oklahoma (No. AFS 110) y 10% de bentonita (6% Sódica y 4% Cállica) Humedad de 3.5%.
 - ↪ Poliestireno de alta densidad para el modelo utilizado en el proceso de Lost Foam.
 - ↪ Gas Argón, como desgasificador del Aluminio líquido.
 - ↪ Pintura Refractaria de Zirconio base alcohol para recubrir el modelo de Poliestireno.
 - ↪ Reactivo de Keller para realizar el micro ataque.
 - ↪ Solución 1: 20g de CuCl_2 en 100 mL de agua *
 - ↪ Solución 2: 6 partes de HNO_3 concentrado, por una parte de HF concentrado *
- * Soluciones 1 y 2 utilizadas para realizar el macro ataque.

3.3.2 Equipo.

El equipo utilizado para la realización de la parte experimental fue el siguiente:

- ↪ Homo eléctrico de resistencia con intervalo de temperaturas de trabajo de 25-850°C.
- ↪ Adquisidor de temperaturas de 15 canales para homo y crisol.
- ↪ Controlador de temperaturas para el homo eléctrico de resistencia.
- ↪ Sistema de desgasificación provisto de una lanza.
- ↪ Cortadora de Poliestireno de resistencia.
- ↪ Caja adobera
- ↪ Moldeadora con pisoneta
- ↪ Molino Chileno
- ↪ Espectrómetro de emisión
- ↪ Crisol de carburo de Silicio con capacidad de 3 Kg (Al 2).
- ↪ Termopar tipo "K" (Cromel - Alumel)
- ↪ Pinzas para crisol
- ↪ Maneral para crisol
- ↪ Cucharilla para limpieza de metal
- ↪ Equipo de Seguridad

- ↪ Placa modelo
- ↪ Balanza digital
- ↪ Lijas de Carburo de Silicio (60, 240, 320, 400 y 600)
- ↪ Puldora de paño fino
- ↪ Pasta de diamante
- ↪ Microscopio metalográfico óptico
- ↪ Adquisidor de imágenes
- ↪ Estereoscopio
- ↪ Cámara Fotográfica Digital
- ↪ Molde permanente para obtención de pieza preliminar
- ↪ Cortadora de Disco

3.4 Desarrollo Experimental.

3.4.1 Fabricación de la Placa Modelo

Se fabricó una pieza modelo de madera de 2.5 x 2.5 x 30 cm, la cual se montó en un placa de madera para formar lo que es la placa modelo. Se calculó el sistema de colada para un sistema no presurizado, por ser una aleación sensible, y la relación que se utilizó es la siguiente: 1:2:2

En el caso del modelo de Poliestireno se fabrico de las mismas dimensiones que el modelo de madera, con una cortadora de resistencia y con la misma relación de colada.

3.4.2 Calculo de sistema de colada

La Aleación A-356 es vaciada a un gasto igual a

$$q = A \rho f r \sqrt{2gH}$$

$q = f(\text{espesor})$ el espesor critico de la pieza es mayor a 7/16" por lo tanto de acuerdo a AFS, course No 7-250, Gating and Riserling 1989.

$$q = 0.698\sqrt{W}$$

$$q = 0.698\sqrt{1.106} = 0.734 \text{ lb / seg}$$

Las dimensiones de la pieza son : 2.5 X 2.5 X 30 cm

Factor de descarga $C = 0.88$

Vol. De la pieza = 187.5 cm³

$\rho_{A-356} = 2.68 \text{ g/ cm}^3 = 0.0967 \text{ lb/in}^3$ Vol. De la pieza = 11.44 in³

H = altura efectiva de la bajada = 4 in.

W= peso de la pieza = 11.44 in³ * 0.0967 lb/ in³ = 1.106 lb

Paso 1. Cálculo del tiempo de llenado.

W = peso de la pieza (lb)

q = gasto (lb/s)

$$t = \frac{W}{q} = \frac{1.106 \text{ lb}}{0.734 \text{ lb/s}} = 1.506 \text{ seg.}$$

Paso 2. Cálculo del área inferior de la bajada.

$$A_{ob} = \frac{w}{\rho C \sqrt{2gH}} = \frac{1.106 \text{ lb}}{(0.0967)(1.506)(0.88)\sqrt{2(386.4)}} = 0.155 \text{ in}^2$$

$$A = \pi r^2 \quad r = \sqrt{\frac{0.155}{\pi}} = 0.2222 \text{ in} \quad \phi = 0.367 \text{ in} = 1.129 \text{ cm}$$

Paso 3. Cálculo del área superior de la bajada

$$A_r = A_{ob} \sqrt{\frac{H_1}{b}} = 0.155 \sqrt{\frac{4}{1.5}} = 0.253 \text{ in}^2$$

$$A = \pi r^2 \quad r = \sqrt{\frac{0.253}{\pi}} = 0.283 \text{ in} \quad \phi = 0.567 \text{ in} = 1.44 \text{ cm}$$

Paso 4. Cálculo del área del corredor

$$A_{\text{corredor}} = 2A_{\text{lb}}$$

$$A_{\text{corredor}} = 2 (0.155) = 0.31 \text{ in}^2$$



$$W = 2D$$

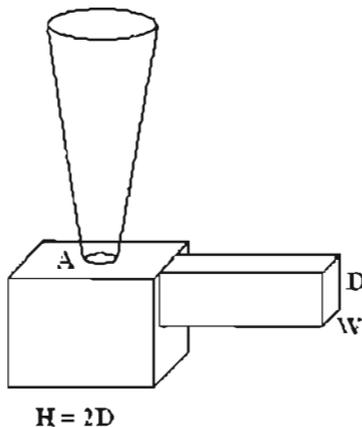
$$W = 2D^2$$

$$A_o = 2D^2$$

$$D = \sqrt{\frac{A_c}{2}} = \sqrt{\frac{0.31}{2}} = 0.3937 \text{ in} = 0.999 \text{ cm} = 1 \text{ cm}$$

$$W = 2(0.3937) = 0.7874 \text{ in} \left(\frac{2.54 \text{ cm}}{\text{in}} \right) = 1.999 \text{ cm} = 2 \text{ cm}$$

Cálculo del colchón:



El colchón es cuadrado

$$A = 4.999 \text{ cm}^2 = 5 \text{ cm}^2$$

$$a = \sqrt{A}$$

$$a = 2.236$$

$$H = 2D$$

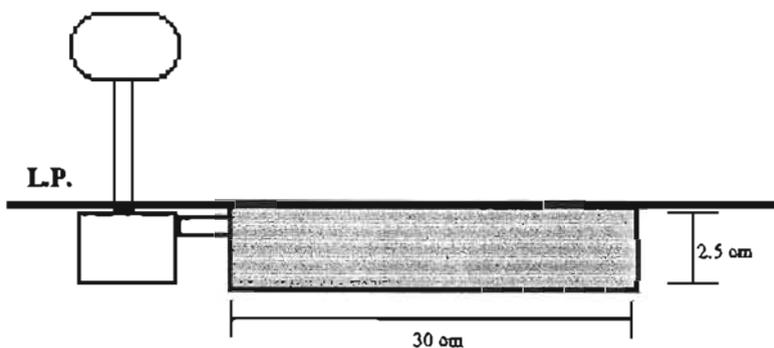
$$H = 2(1 \text{ cm.})$$

$$H = 2 \text{ cm.}$$

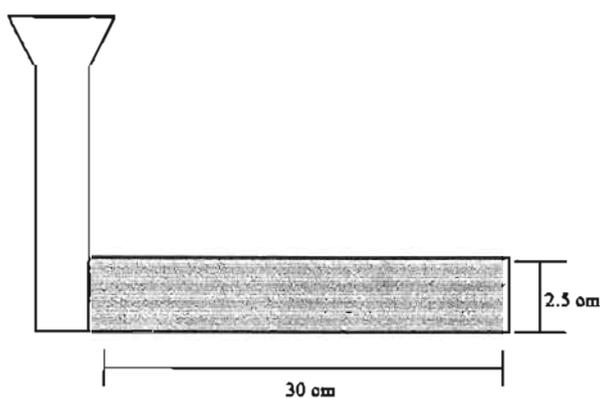


Nota: Como la relación de colada es 1:2:2 el área del corredor es de la misma dimensión que la entrada.

A continuación se presenta un esquema de los modelos utilizados para fabricar las barras de aleación A-356 por los procesos de Lost Foam y Moldeo de Arena en Verde.



Esquema del modelo con el sistema de colada para Moldeo en Verde.



Esquema del modelo con el sistema de colada para Lost Foam.

Nota: El sistema de colada para el proceso de Lost Foam no requiere el cálculo de un colchón, ya que el gasto es considerablemente menor comparada con el Moldeo en Verde y por lo tanto el arrastre de arena es nulo.

En las siguientes fotografías se muestra la placa modelo para el moldeo de arena en verde.

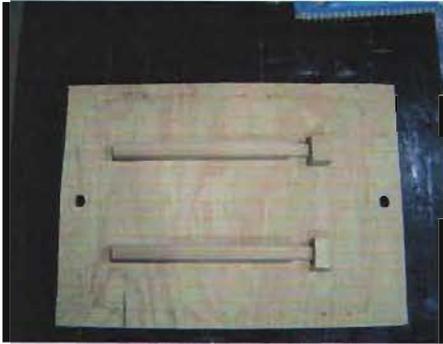


Foto 1 Sistema de Colada



Foto 2 Placa Modelo en la caja de moldeo

3.4.3 Fabricación del Modelo de Poliestireno.

El modelo de Poliestireno, se fabricó a partir de un bloque de Poliestireno de alta densidad, el cuál fue seccionado con una cortadora de resistencia obteniendo una barra cuadrada de las siguientes dimensiones: 2.5 x 2.5 x 30 cm.

Se recubrió con pintura refractaria de zirconilo base alcohol

Las fotos 3 y 4 muestran la forma en que se aplico el recubrimiento a los modelos de Poliestireno.



Foto 3 Pintado del Modelo de Poliestireno

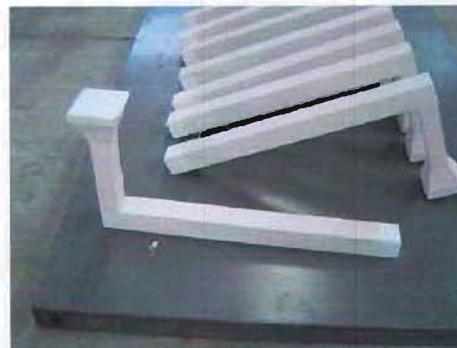


Foto 4 Modelo de Poliestireno

3.4.4 Fabricación de Moldes de Arena (Moldeo en Verde)

Se fabrica la mezcla de arena en verde en un molino chileno con capacidad de 90 Kg y un tiempo de mezclado de 5 minutos totales. Se coloca la placa modelo en la caja de moldeo, se aplica un desmoldante en la superficie de la placa modelo, la mezcla de arena es pasada a través de una malla para cubrir la superficie de la placa modelo, para evitar que la generación de grumos, posteriormente se llena la caja de moldeo con la mezcla de arena para ser compactada con una pisoneta neumática, este proceso se realiza por ambos lados de la placa modelo para obtener así un molde de arena en verde.

En la foto 5 se muestra la vista superior del molde de arena fabricado.



Foto 5 Molde de Arena en Verde

3.4.5 Fabricación de los Moldes con la pieza de Poliestireno (Lost Foam)

Obtenidas las barras de 2.5 x 2.5 x 30 cm de Poliestireno, sobre una caja de moldeo que ya posee una primera capa de arena se coloca el modelo, el cual se recubren con arena refractaria sílica Oklahoma 100-110 AFS, que se compacta por vibración. Cuando la arena llega a la altura adecuada se procede a la colada del metal la cual se realiza siguiendo la misma técnica empleada en el moldeo convencional (moldeo en verde). Con eso se mejora el acabado superficial de las piezas y se tiene buena permeabilidad de la pintura refractaria que actúa como molde. Esto se puede observar en las fotos 6, 7, 8 y 9.



Foto 6 Colocación del modelo de Poliestireno en la caja de moldeo



Foto 7 Llenado de la caja de moldeo con Arena Sílica



Foto 8 Llenado de la caja de moldeo con Arena Sílica



Foto 9 Compactado de la Arena Sílica mediante vibración

3.4.6 Fusión de la Aleación A-356 sin Tratamiento y vaciada en molde de Arena en Verde.

Se fundió la aleación de Aluminio A-356 en el horno eléctrico de resistencias hasta alcanzar una temperatura de 775°C, seguido de una desgasificación con un gas Inerte (Ar) durante 8 minutos, se deja que el metal fundido alcance una temperatura de 750°C fuera del horno, para vaciar en moldes de arena en verde, y de esta forma obtener una barra de las siguientes dimensiones 2.5 cm x 2.5cm x 30 cm sin tratamiento. Esto lo podemos observar en las fotos 10, 11, 12, 13 y 14.



Foto 10 Fusión de la Aleación A-356 en horno de resistencias



Foto 11 Desgasificación de la Aleación A-356 con gas Argón



Foto 12 Llenado del molde de arena en verde con la Aleación A-356.



Foto 13 Desmoldeo de la pieza fabricada con la Aleación A-356 por el proceso de moldeo en verde.



Foto 14 Pieza fabricada con la Aleación A-356 por el proceso de moldeo en verde.

3.4.7 Tratamiento de Refinación y Modificación de la Aleación A-356 y Vaciada en molde de Arena en Verde.

En el metal líquido, se realiza el tratamiento de refinación con la aleación maestra Al- 5% Ti-1% B y modificación con la aleación maestra Al-10% Sr dejando un tiempo de permanencia de 10 minutos seguido de una desgasificación con un gas Inerte (Ar) durante 8 minutos, Se deja que el metal fundido alcance una temperatura de 750°C fuera del horno, para vaciar en moldes de arena en verde.

Una vez realizados los tratamientos de Modificación y Refinación se tomo una muestra preliminar y se analizó químicamente con un espectrómetro de emisión.

Este procedimiento se realizó para cuatro niveles, los cuales se presentan en la tabla 5:

Tabla 5 Niveles Experimentales

Modificación % Sr	Refinación % Ti
0.015	0.025
0.025	0.050
0.050	0.100
0.100	0.200

Cada prueba se efectuó por triplicado para obtener reproducibilidad. Cabe mencionar que los tratamientos de refinación y modificación se realizaron al mismo tiempo.

En las fotos 15 y 16 se la realización de los tratamientos y la muestra preliminar para análisis químico.



Foto 15 Tratamiento de Modificación y Refinación de la Aleación A-356.



Foto 16 Muestra preliminar de la Aleación A-356 modificada y refinada.

3.4.8 Fusión de la Aleación A-356 sin Tratamiento y vaciada por el Proceso de Lost Foam.

Se fundió la aleación de Aluminio A-356, de la misma forma que las anteriores, para posteriormente vaciar en moldes de Poliestireno en arena (Lost Foam), de manera que se obtuviera una barra de las siguientes dimensiones 2.5 cm x 2.5cm x 30 cm sin tratamiento. Se analizó químicamente.

Las fotos 17a y 17b muestran el momento de la colada del metal líquido, en el modelo de Poliestireno.



Foto 17a Llenado del molde de Poliestireno con la Aleación A-356.

Foto 17b Llenado del molde de Poliestireno con la Aleación A-356.



3.4.9 Tratamiento de Refinación y Modificación de la Aleación A-356, Vaclada por el Proceso de Lost Foam.

Se realizaron los tratamientos de Modificación y Refinación para después vaclar en moldes de Poliestireno en arena (Lost Foam), para obtener una barra de las siguientes dimensiones 2.5 cm x 2.5cm x 30 cm sin tratamiento.

Al igual que con el proceso de Moldeo en Verde, este procedimiento se realizó por triplicado para los cuatro niveles, tanto de refinación como modificación. (tabla 5)

En las fotos 18 y 19 se muestra el desmoldeo de la pieza fabricada por el proceso de Lost Foam.



Foto 18 Desmoldeo de la pieza fabricada con la Aleación A-356 por el proceso de Lost Foam.



Foto 19 Pieza fabricada con la Aleación A-356 por el proceso de Lost Foam.

3.5 Métodos de Evaluación.

3.5.1 Barras obtenidas a partir del Proceso de Moldeo en Verde y Lost Foam.

3.5.1.1 Barras sin Tratamiento

Para evaluar el Espaciado Interdendrítico Secundario (DAS) en diferentes puntos de la barra se realizaron 3 cortes transversales a una distancia de: 1, 15 y 29 cm de la bajada y se prepararon metalográficamente para verificar si hay diferencia en el DAS en cuanto a la distancia de la bajada. Esto se muestra en la figura 1.

Para medir el tamaño de grano a lo largo de la pieza se realizó un corte longitudinal en el centro de la barra para ver si conforme aumenta la distancia de la bajada, el tamaño de grano tiene variaciones significativas.

La degradación del polímero en el molde tiene un efecto relevante en la velocidad del flujo del metal líquido. Éstos son respectivos del orden de 10 cm/s y 100 cm/s para el proceso de colada por Lost Foam y de Moldeo en Verde respectivamente (24). Por lo tanto se realizó un corte longitudinal en el centro de la barra para comparar cualitativamente el porcentaje de porosidad en ambos procesos.

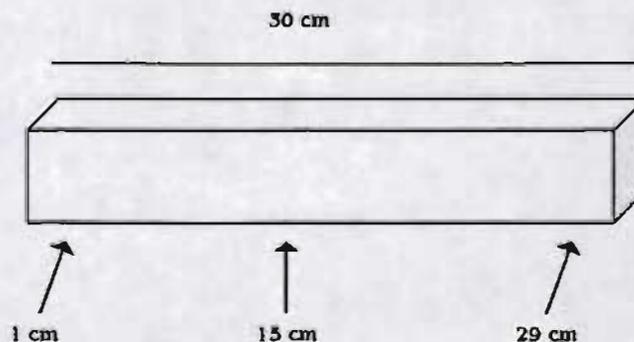


Figura 1 Secciones de la Barra para la evaluación del DAS

3.5.1.2 Barras con tratamiento de Refinación y Modificación

Para medir el DAS en diferentes puntos de la barra se realizaron 3 cortes transversales a una distancia de: 1, 15 y 29 cm de la bajada para verificar si hay diferencias en el DAS en la misma medida en cuanto a la distancia de la bajada.

Para evaluar el refinamiento de grano a lo largo de la pieza se realizó un corte longitudinal de la barra para ver si conforme aumenta la distancia de la bajada, el tamaño de grano tiene variaciones significativas.

Al igual que la barra sin tratamiento se le realizó un corte longitudinal para evaluar cualitativamente el porcentaje de porosidad. Esto se puede observar en la foto 20.



Foto 20 Corte de las Barras fabricadas por ambos Procesos

3.5.2 Preparación Metalográfica.

Todas las secciones obtenidas de los cortes, se les dio la siguiente preparación metalográfica:

1. Desbaste ligero hasta eliminar planos con una lija 60.
2. Eliminación de rayas de desbaste en lijas grados 240 hasta 600 con flujo de agua.
3. Pulido Fino con pasta de diamante.

3.5.3 Evaluación por Microscopía Óptica (MO)

Las secciones transversales se analizaron por MO con el fin de determinar el nivel de modificación de las placas de Silicio del eutéctico Al-Si de la matriz metálica por comparación con los estándares mostrados en la figura 2. Además de hacer una evaluación del DAS y adquirir fotografías con un analizador de imágenes.

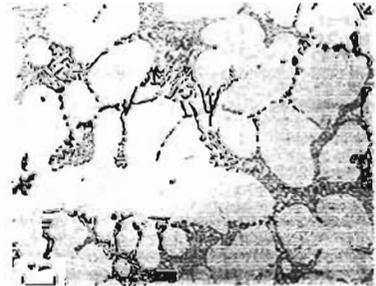
El nivel de modificación se evaluó después de que se pullieron las secciones de las barras con pasta de diamante en paño fino seguido de un ataque químico con HF al 0.5 % vol por un tiempo de 5 a 15 segundos, una vez que la estructura del eutéctico se revelo perfectamente. En particular, para el nivel de modificación, la comparación con el estándar correspondiente se realizo observando la muestra al microscopio a 100X.



Nivel 1 Estructura sin Modificar, placas de Si largas en forma acicular



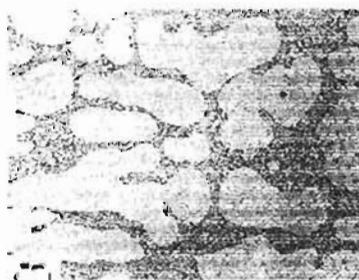
Nivel 2 Estructura Laminar, con bajos niveles de Sr. Con remanentes de Si acicular.



Nivel 3 Estructura Parcialmente modificada, el Si comienza a fragmentarse



Nivel 4 Ausencia de Estructura Laminar, la estructura sigue fragmentándose y todavía hay remanentes de fase acicular



Nivel 5 Estructura Fibrosa eutéctica, libre de fase acicular, solo hay Si fibroso. Completamente modificado



Nivel 6 Estructura Fibrosa muy fina. Supermodificado. Esta aparece cuando hay tiempos de permanencia muy largos.

Figura 2 Estándar para Evaluar el Nivel de Modificación (1)

La evaluación del tamaño de grano se realizó después de ser pasada por la lija 600 y atacada con el reactivo: 20g CuCl_2 en 100 mL de agua, sumergiendo la probeta por varios segundos, removiendo la capa de cobre depositada con una mezcla de 6 partes de HNO_3 concentrado y 1 parte de HF, se repite hasta obtener los resultados deseados y lavando con agua entre cada paso. Una vez que la macroestructura de los granos se había revelado completamente se evaluaron los diámetros en forma axial y se compararon con el estándar de la tabla 6.

Tabla 6. Relación de tamaño de macro-grano determinada por comparación visual directa con fotografías estándar (1X) (norma ASTM E91-51T)

Tamaño de macro-grano ASTM	Tamaño de micro-grano ASTM	Diámetro de grano promedio calculado		Área promedio calculada para una sección del grano en in^2	Granos por in^2
		in.	mm		
M-0	****	1.40	36	2.00	0.5
M-0.5	****	1.20	30	1.41	0.7
M-1	****	1.00	25	1.00	1.0
M-1.5	****	0.80	21	0.71	1.4
M-2	****	0.70	18	0.50	2.0
M-2.5	****	0.60	15	0.35	2.8
M-3	****	0.50	13	0.25	4.0
M-3.5	****	0.40	11	0.18	5.7
M-4	****	0.35	9	0.125	8.0
M-4.5	****	0.30	7.5	0.088	11.3
M-5	****	0.25	6.5	0.062	16.0
M-5.5	****	0.20	5.5	0.044	22.6
M-6	****	0.18	4.5	0.031	32.0
M-6.5	****	0.15	3.5	0.022	45.2
M-7	****	0.12	3.0	0.016	64.0
M-7.5	****	0.10	2.6	0.011	90.5
M-8	****	0.090	2.2	0.0078	128
M-8.5	****	0.075	1.9	0.0055	181

Tabla 6 Continuación

Tamaño de macro-grano ASTM	Tamaño de micro-grano ASTM	Diámetro de grano promedio calculado		Área promedio calculada para una sección del grano en in ²	Granos por in ²
		in.	mm		
M-9	****	0.060	1.6	0.0039	256
M-9.5	****	0.055	1.3	0.0028	362
M-10	****	0.045	1.1	0.0020	512
M-10.5	****	0.035	0.95	0.0014	724
M-11	****	0.030	0.80	0.0010	1024
M-11.5	****	0.025	0.65	0.0007	1448
M-12	****	0.022	0.55	0.0005	2048
****	00..	0.020	0.50	0.0004	2500
M-12.5	****	0.019	0.45	0.00035	2896
M-13	****	0.016	0.40	0.00025	4096
****	0..	0.014	0.36	0.00020	5000
M-13.5	****	0.013	0.33	0.00017	5792
****	0.5	0.012	0.30	0.00014	7071
M-14	****	0.011	0.28	0.00012	8192
****	1.0	0.010	0.25	0.00010	10000
M-14.5	****	0.009	0.23	0.00009	11584
****	1.5	0.008	0.21	0.00007	14142
M-15	****	0.0075	0.20	0.00006	16384
****	2	0.007	0.18	0.00005	20000
M-15.5	****	0.0062	0.16	0.00004	23168

Para la evaluación del porcentaje de porosidad, se tomo una barra seccionada longitudinalmente, se desbaste hasta lija 600, se tomo fotografia con una cámara digital y se evaluó cuantitativamente el porcentaje de área de poros con un analizador de imágenes.

CAPITULO IV.

RESULTADOS.

4.1 Evaluación del Nivel de Modificación en diferentes secciones de la barra

4.1.1 Aleación A-356 sin tratamiento por el proceso de moldeo en verde.



Foto 21 sección cortada a 1 cm de la bajada.
(estructura sin modificar, nivel 1)

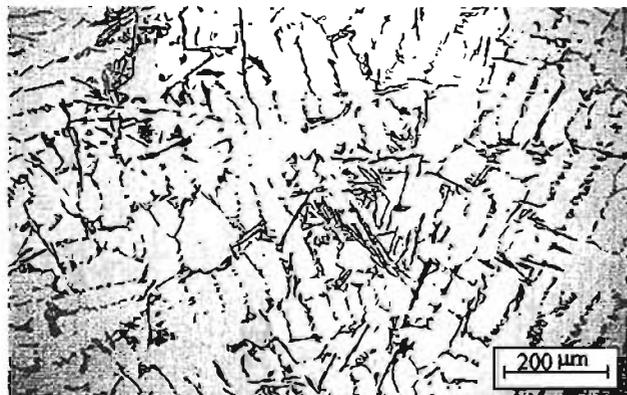


Foto 22. sección cortada a 15 cm de la bajada.
(estructura sin modificar, nivel 1)



Foto 23. sección cortada a 29 cm de la bajada.
(estructura sin modificar, nivel 1)

4.1.2 Aleación A-356 sin tratamiento por el proceso de Lost Foam.

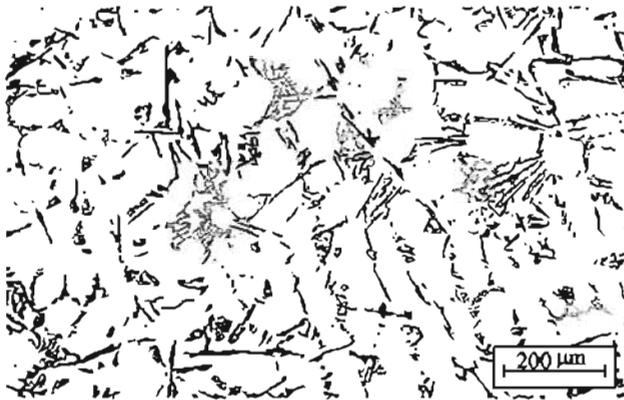


Foto 24. sección cortada a 1 cm de la bajada.
(estructura sin modificar, nivel 1)



Foto 25. sección cortada a 15 cm de la bajada.
(estructura sin modificar, nivel 1)



Foto 26. sección cortada a 29 cm de la bajada.
(estructura sin modificar, nivel 1)

4.1.3 Aleación A-356 con tratamiento de modificación (0.0151 % Sr) y refinación (0.2133 % Ti) fabricado por el proceso de Moldeo en Verde.

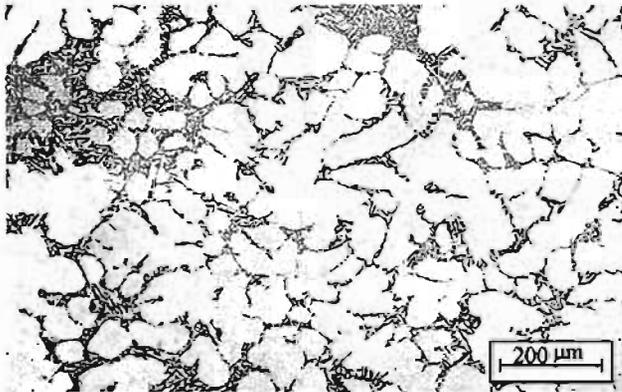


Foto 27. sección cortada a 1 cm de la bajada.
(estructura parcialmente modificada, nivel 3)

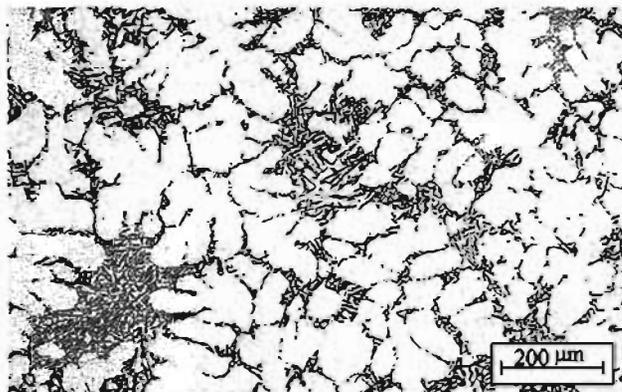


Foto 28. sección cortada a 15 cm de la bajada.
(estructura laminar, nivel 2)

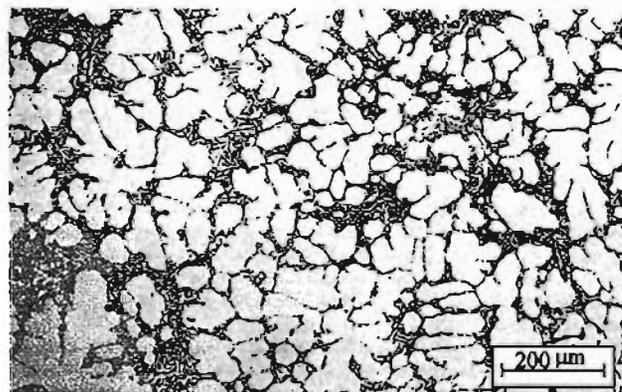


Foto 29. sección cortada a 29 cm de la bajada.
(estructura parcialmente modificada, nivel 3)

4.1.4 Aleación A-356 con tratamiento de modificación (0.0149 % Sr) y refinación (0.1911 % Ti) fabricado por el proceso de Lost Foam.

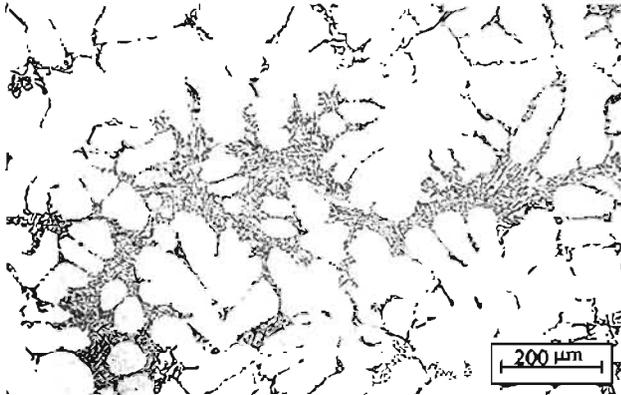


Foto 30. sección cortada a 1 cm de la bajada.
(estructura parcialmente modificada, nivel 3)

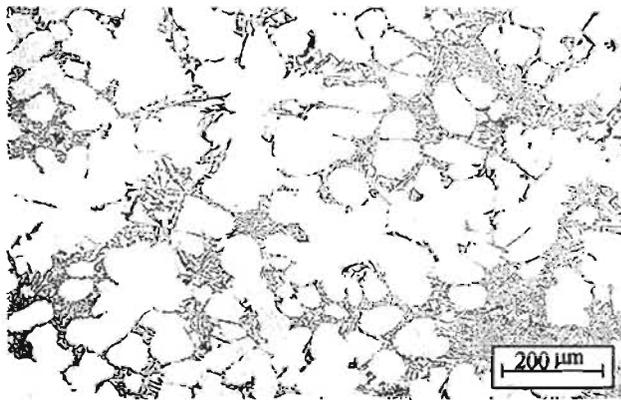


Foto 31. sección cortada a 15 cm de la bajada.
(estructura parcialmente modificada, nivel 3)

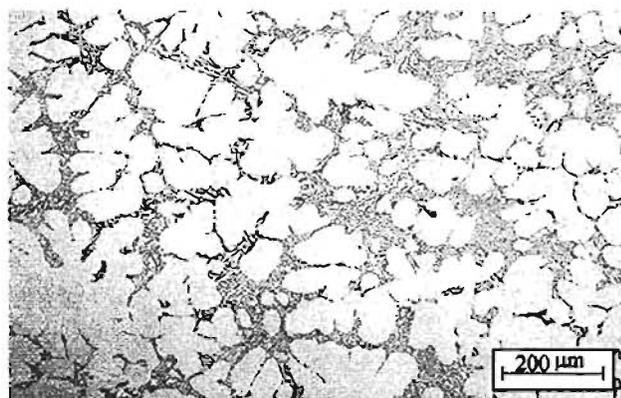


Foto 32. sección cortada a 29 cm de la bajada.
(estructura parcialmente modificada, nivel 3)

4.1.5 Aleación A-356 con tratamiento de modificación (0.023 % Sr) y refinación (0.0287 % Ti) fabricado por el proceso de Moldeo en Verde.

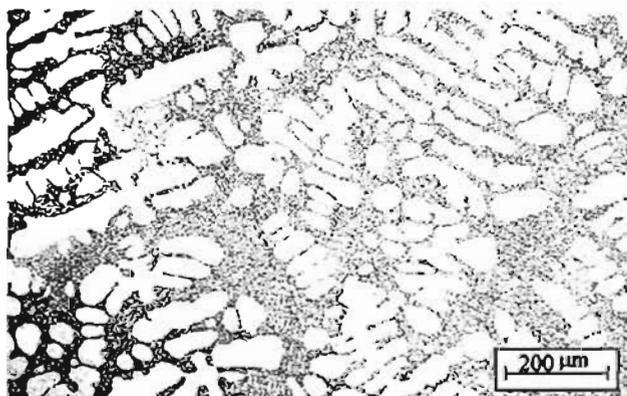


Foto 33. sección cortada a 1 cm de la bajada.
(estructura suficientemente modificada, nivel 4)

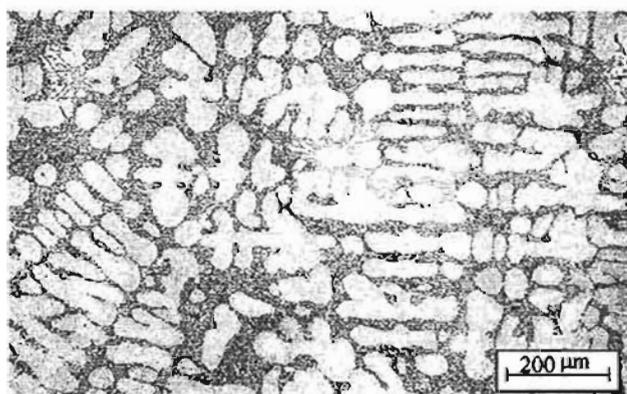


Foto 34. sección cortada a 15 cm de la bajada.
(estructura bien modificada, nivel 5)

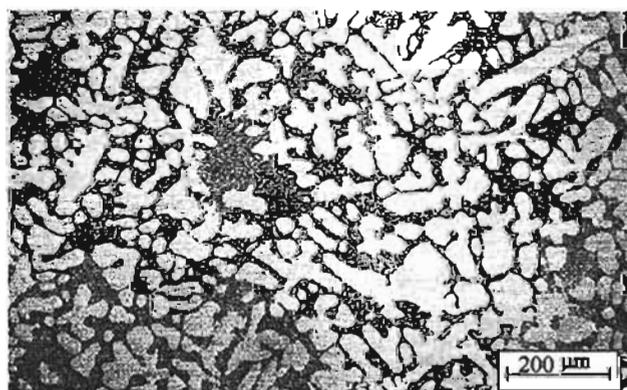


Foto 35. sección cortada a 29 cm de la bajada.
(estructura bien modificada, nivel 5)

4.1.6 Aleación A-356 con tratamiento de modificación (0.0228 % Sr) y refinación (0.0259 % Ti) fabricado por el proceso de Lost Foam.

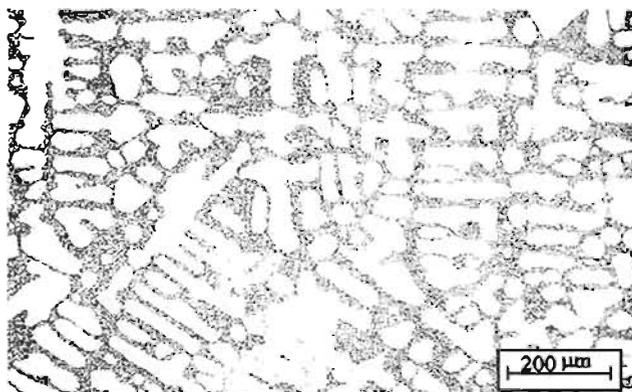


Foto 36. sección cortada a 1 cm de la bajada.
(estructura bien modificada, nivel 5)

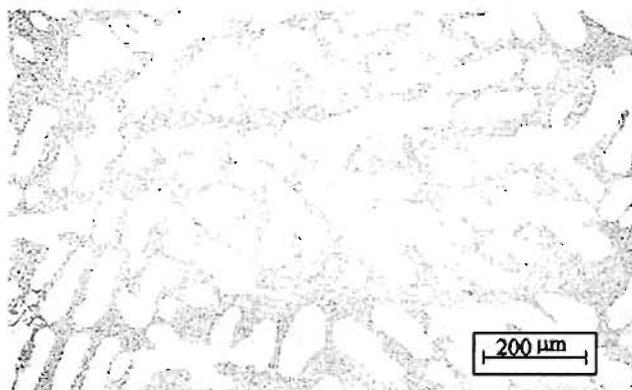


Foto 37. sección cortada a 15 cm de la bajada.
(estructura supermodificada, nivel 6)

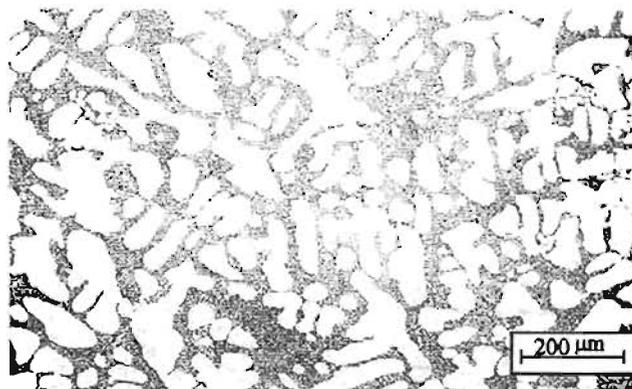


Foto 38. sección cortada a 29 cm de la bajada.
(estructura supermodificada. Nivel 6)

4.1.7 Aleación A-356 con tratamiento de modificación (0.0475 % Sr) y refinación (0.0553 % Ti) fabricado por el proceso de Moldeo en Verde.

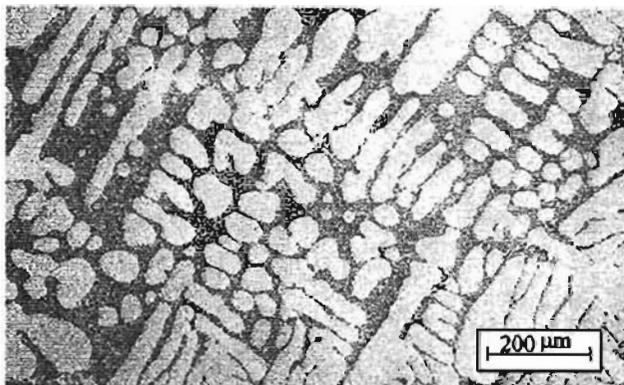


Foto 39. sección cortada a 1 cm de la bajada.
(estructura bien modificada, nivel 5)

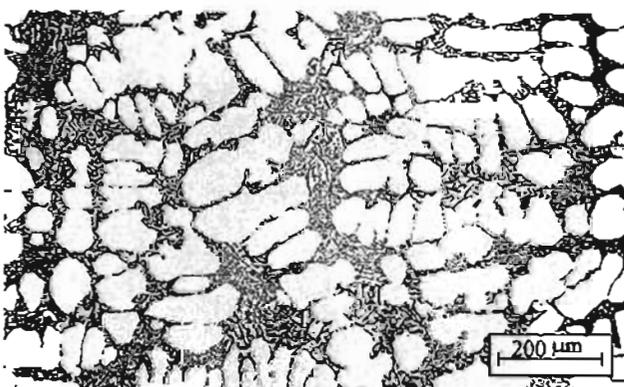


Foto 40. sección cortada a 15 cm de la bajada.
(estructura parcialmente modificada, nivel 3)

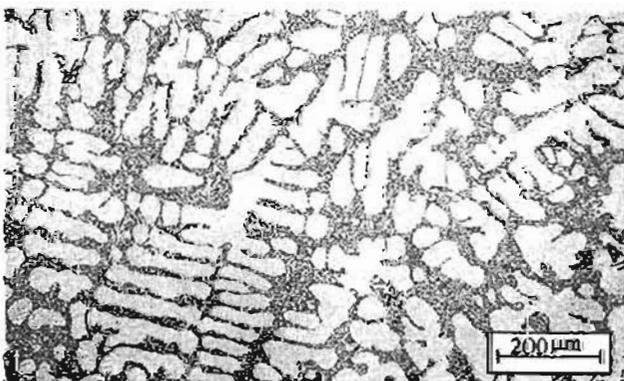


Foto 41. sección cortada a 29 cm de la bajada.
(estructura parcialmente modificada, nivel 3)

4.1.8 Aleación A-356 con tratamiento de modificación (0.0504 % Sr) y refinación (0.0551 % Ti) fabricado por el proceso de Lost Foam.

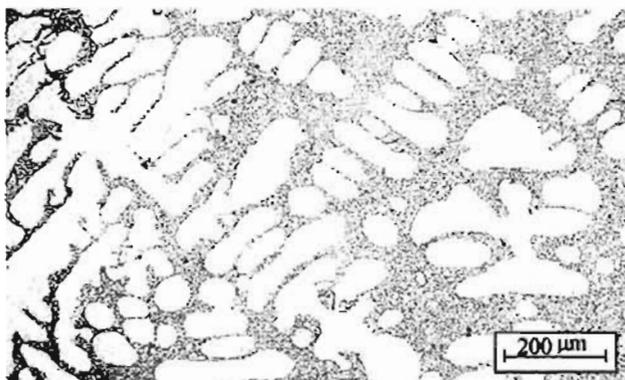


Foto 42. sección cortada a 1 cm de la bajada.
(estructura suficientemente modificada, nivel 4)

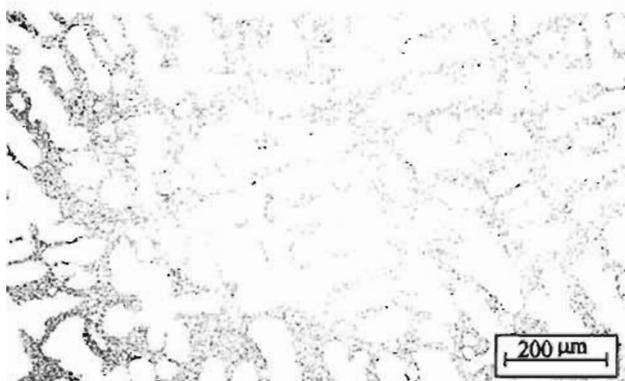


Foto 43. sección cortada a 15 cm de la bajada.
(estructura bien modificada, nivel 5 con)

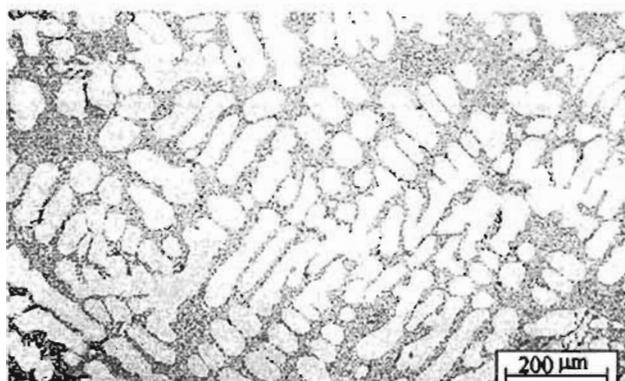


Foto 44. sección cortada a 29 cm de la bajada.
(estructura suficientemente modificada, nivel 4)

4.1.9 Aleación A-356 con tratamiento de modificación (0.1017 % Sr) y refinación (0.1014 % Ti) fabricado por el proceso de Moldeo en Verde.

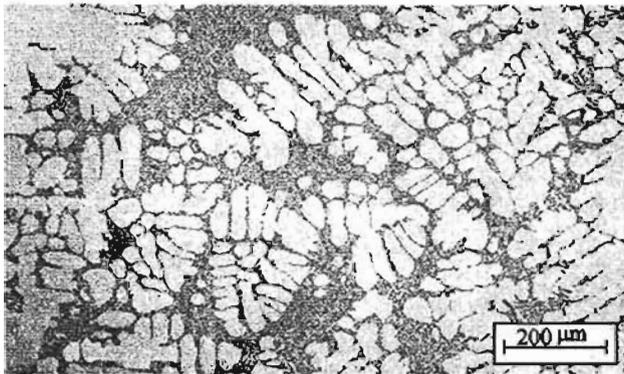


Foto 45. sección cortada a 1 cm de la bajada.
(estructura suficientemente modificada, nivel 4)

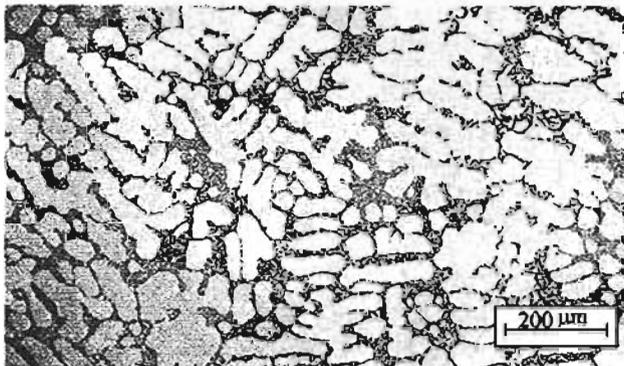


Foto 46. sección cortada a 15 cm de la bajada.
(estructura parcialmente modificada, nivel 3)

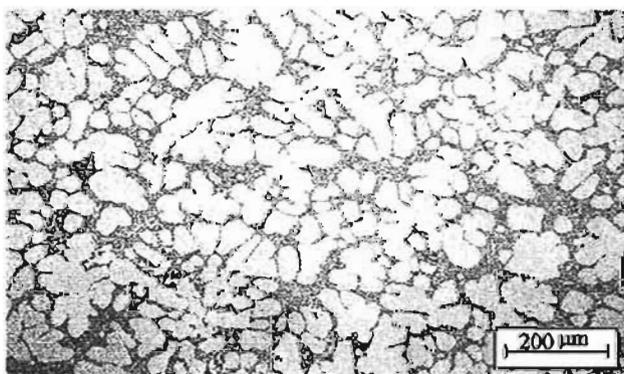


Foto 47. sección cortada a 29 cm de la bajada.
(estructura parcialmente modificada, nivel 3)

4.1.10 Aleación A-356 con tratamiento de modificación (0.1040% Sr) y refinación (0.1337 % Ti) fabricado por el proceso de Lost Foam.

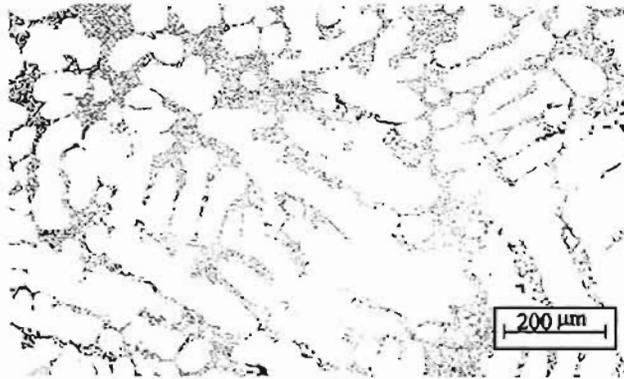


Foto 48. sección cortada a 1 cm de la bajada.
(estructura parcialmente modificada, nivel 3)

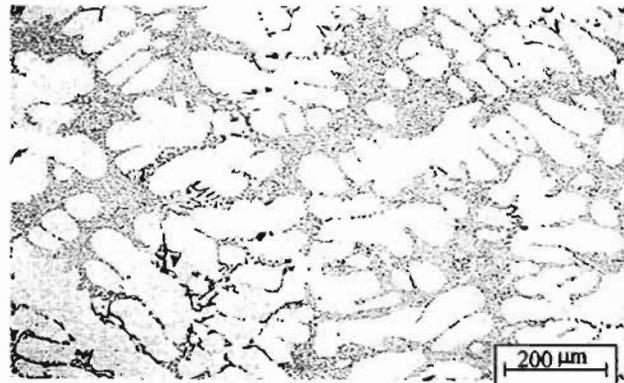


Foto 49. sección cortada a 15 cm de la bajada.
(estructura parcialmente modificada, nivel 3)

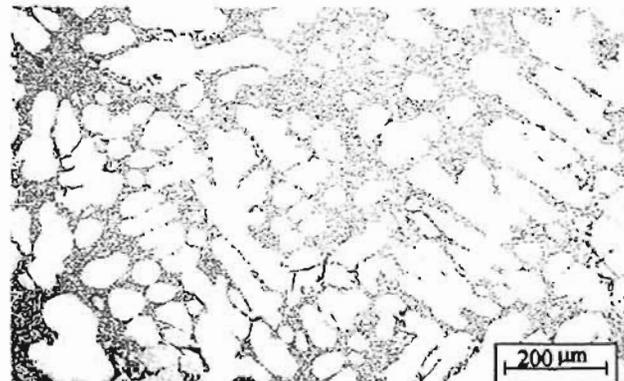


Foto 50. sección cortada a 29 cm de la bajada.
(estructura parcialmente modificada, nivel 3)

De acuerdo las mediciones realizadas por comparación después de observar en el microscopio óptico a un aumento de 100X se comparo cada foto con el patrón para los niveles de modificación (figura 2). Los resultados se muestran en la tabla 7.

Tabla 7. Nivel de Modificación de acuerdo a la morfología de la fase eutéctica, con respecto a la distancia de la bajada.

Proceso de Fabricación	Nivel de Modificación n (%Sr) calculado	Nivel de Modificación n (%Sr) residual	Nivel de Modificación por comparación (figura 2)		
			Distancia con respecto a la bajada		
			1 cm	15 cm	29 cm
M. en verde	0.000	0.000	1	1	1
M. en verde	0.015	0.0151	3	2	3
M. en verde	0.025	0.0230	4	5	5
M. en verde	0.050	0.0475	5	3	3
M. en verde	0.100	0.1017	4	3	3
Lost Foam	0.000	0.000	1	1	1
Lost Foam	0.015	0.0149	3	3	3
Lost Foam	0.025	0.0259	5	6	6
Lost Foam	0.050	0.0504	4	5	4
Lost Foam	0.100	0.1040	3	3	3

4.2 Espaciamento Interdendrítico Secundario (DAS)

Los resultados obtenidos a partir de las evaluaciones del espaciamento dendrítico secundario (DAS) para la aleación A-356 fabricada tanto por el proceso de Moldeo en Verde como por el proceso de Lost Foam se muestran en la tabla 8.

El DAS fue evaluado en cada una de las secciones de cada barra por medio de un analizador de imágenes y tomando cinco medidas de cada uno de los cortes, de la forma en que se muestra en la figura 3.

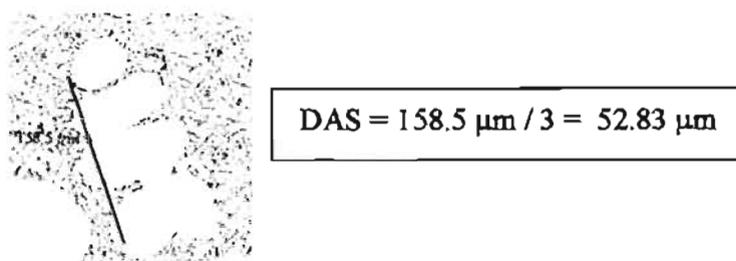


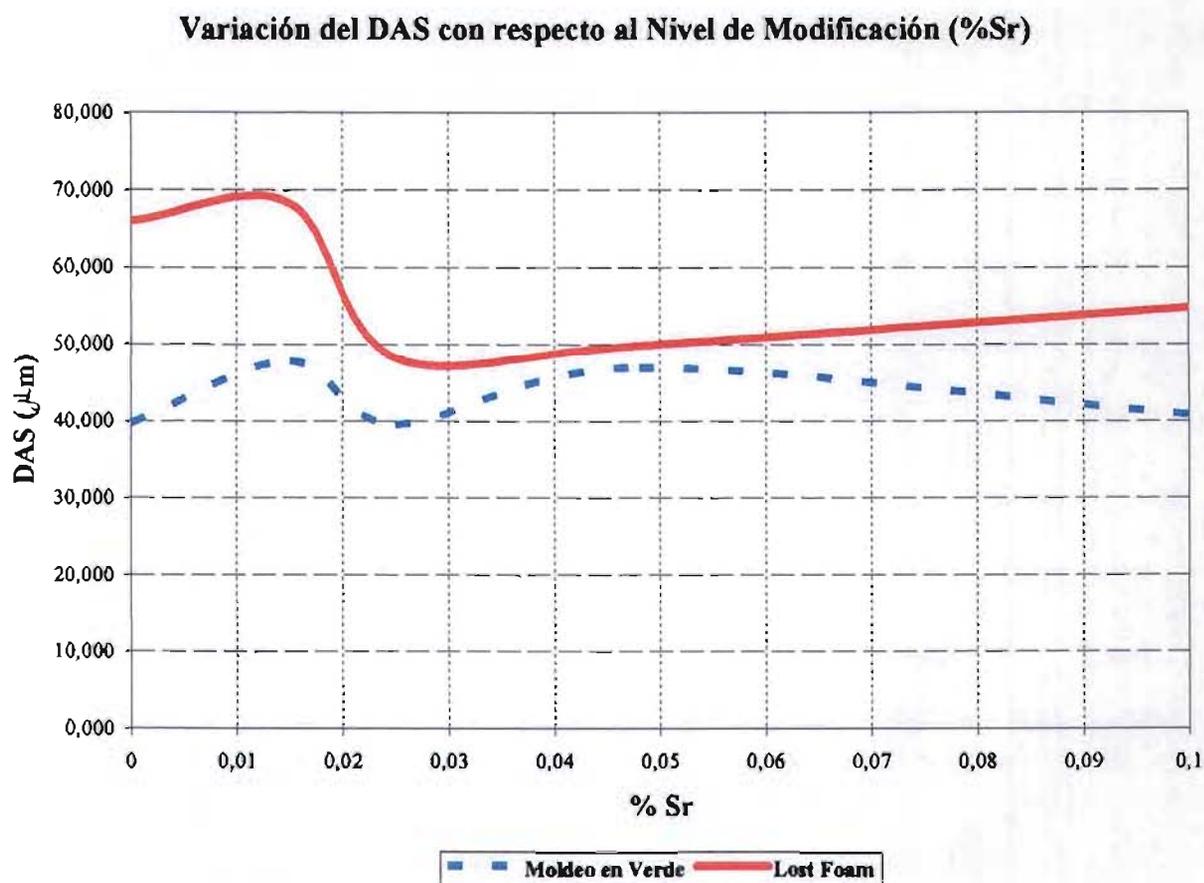
Figura 3. Ejemplo de la evaluación del Espaciamento Interdendrítico

Tabla 8. Tamaño de DAS promedio con respecto a la distancia de la bajada

Proceso de Fabricación	Nivel de Modificación (%Sr) obtenido	DAS promedio (μm) con respecto a la distancia de la bajada			DAS Promedio en toda la barra (μm)
		1 cm	15 cm	29 cm	
M. en verde	0.000	43.7898	47.6281	30.8408	39.587
M. en verde	0.0151	48.5998	50.8778	44.3102	47.739
M. en verde	0.023	38.769	44.3533	36.1782	39.533
M. en verde	0.0475	47.3013	50.5503	42.8326	46.933
M. en verde	0.1017	39.101	45.8981	37.1402	40.721
Lost Foam	0.000	66.3544	72.1152	56.4133	65.960
Lost Foam	0.0149	68.8183	77.6468	62.2699	68.217
Lost Foam	0.0259	48.9344	56.8132	40.2105	48.199
Lost Foam	0.0504	50.9144	54.3768	45.8148	49.822
Lost Foam	0.1040	54.4751	57.67001	45.2309	54.712

En la gráfica 3 se presenta la variación del DAS con respecto al % de Sr residual en cada una de las barras, y se puede observar que el DAS es ligeramente mayor en las barras fabricadas por el proceso de Lost Foam comparado con el DAS evaluado en las barras fabricadas por el proceso de Moldeo en Arena en Verde.

Grafica 3. Variación del DAS con respecto al nivel de modificación



4.3 Evaluación del Tamaño de Grano

4.3.1 Aleación A-356 sin tratamiento. Fabricada tanto por el proceso de Moldeo en Verde así como por el proceso de Lost Foam.



Foto 51. (1.5X) Sección de 0 a 15 cm de la bajada de la Aleación A-356 sin tratamiento de refinación colada por el proceso de Moldeo en Verde



Foto 52. (1.5X) Sección de 0 a 15 cm de la bajada de la Aleación A-356 sin tratamiento de refinación de la colada por el proceso de Lost Foam.



Foto 53. (1.5X) Sección de 15 a 30 cm de la bajada de la Aleación A-356 sin tratamiento de refinación colada por el proceso de Moldeo en Verde.



Foto 54. (1.5X) Sección de 15 a 30 cm de la bajada de la Aleación A-356 sin tratamiento de refinación de la colada por el proceso de Lost Foam.

4.3.2 Aleación A-356 con tratamiento de Refinación con Ti. Fabricada tanto por el proceso de Moldeo en Verde así como por el proceso de Lost Foam.



Foto 55. (1.5X) Sección de 0 a 15 cm de la bajada de la Aleación A-356 con tratamiento de refinación de 0.0287% Ti, colada por el proceso de Moldeo en Verde.



Foto 56. (1.5X) Sección de 0 a 15 cm de la bajada de la Aleación A-356 con tratamiento de refinación de 0.0259% Ti, colada por el proceso de Lost Foam.

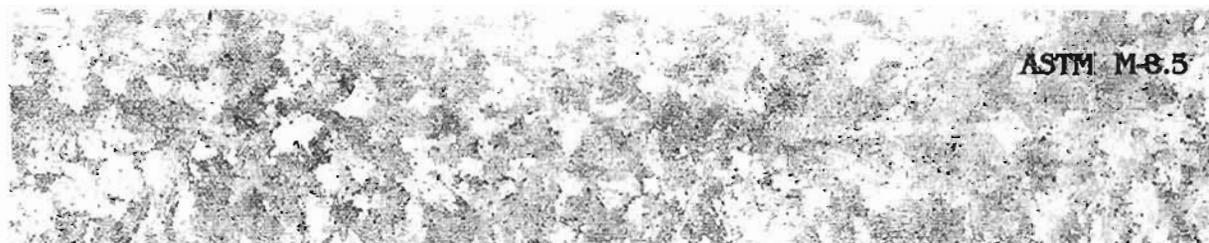


Foto 57. (1.5X) Sección de 15 a 30 cm de la bajada de la Aleación A-356 con tratamiento de refinación de 0.0287% Ti, colada por el proceso de Moldeo en Verde.

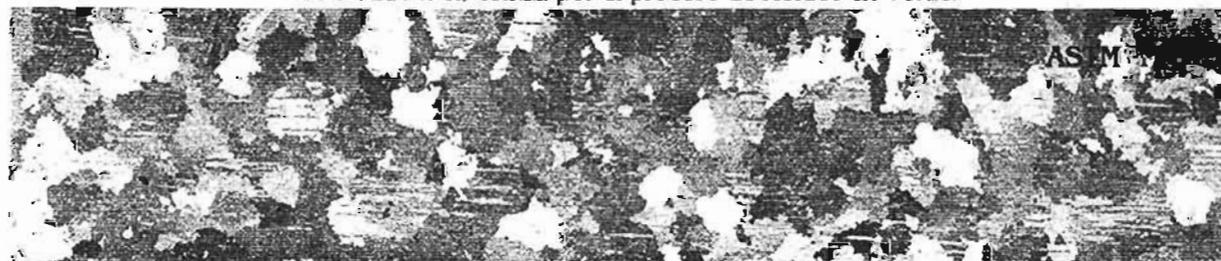


Foto 58. (1.5X) Sección de 15 A 30 cm de la bajada de la Aleación A-356 con tratamiento de refinación de 0.0259% Ti, colada por el proceso de Lost Foam.

4.3.3 Aleación A-356 con tratamiento de Refinación con Ti. Fabricada tanto por el proceso de Moldeo en Verde así como por el proceso de Lost Foam.

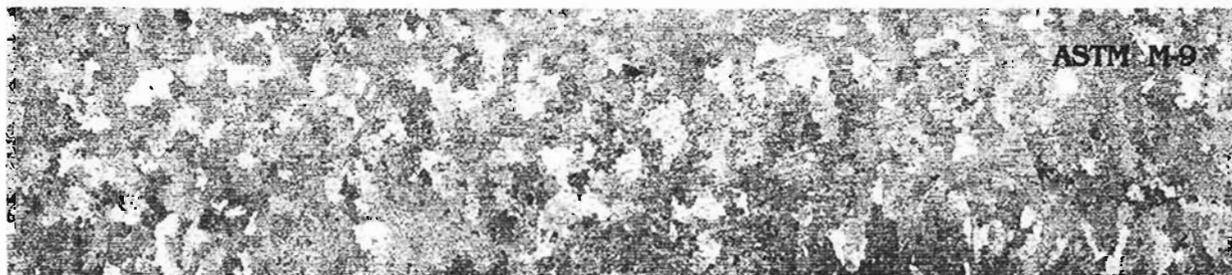


Foto 59. (1.5X) Sección de 0 a 15 cm de la bajada de la Aleación A-356 con tratamiento de refinación de 0.0553% Ti, colada por el proceso de Moldeo en Verde.



Foto 60. (1.5X) Sección de 0 a 15 cm de la bajada de la Aleación A-356 con tratamiento de refinación de 0.0551% Ti, colada por el proceso de Lost Foam.

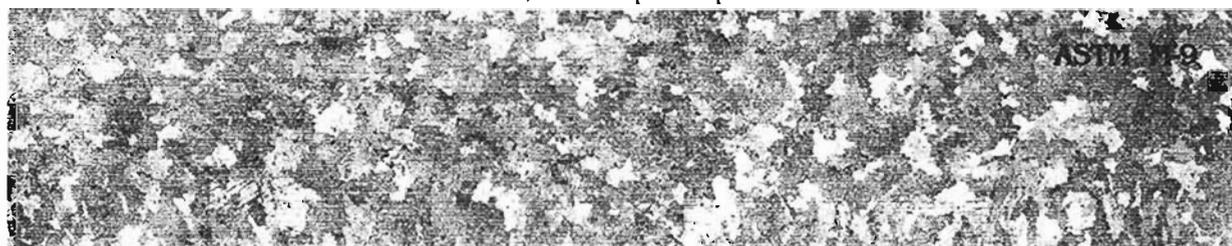


Foto 61. (1.5X) Sección de 15 a 30 cm de la bajada de la Aleación A-356 con tratamiento de refinación de 0.0553% Ti, colada por el proceso de Moldeo en Verde.

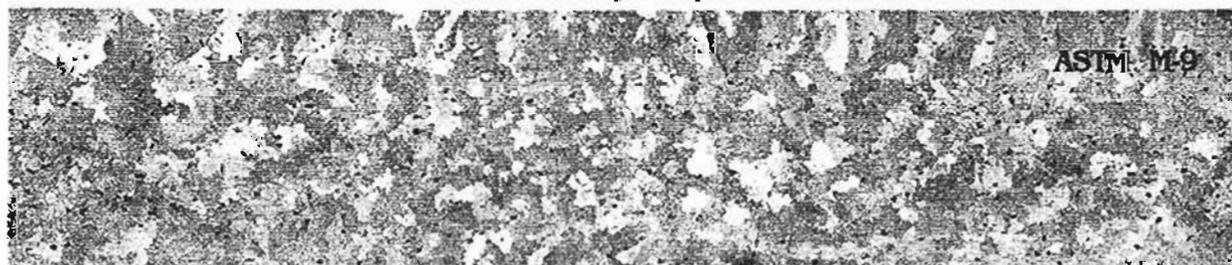


Foto 62. (1.5X) Sección de 15 a 30 cm de la bajada de la Aleación A-356 con tratamiento de refinación de 0.0551% Ti, colada por el proceso de Lost Foam.

4.3.4 Aleación A-356 con tratamiento de Refinación con Ti. Fabricada tanto por el proceso de Moldeo en Verde así como por el proceso de Lost Foam.



Foto 63. (1.5X) Sección de 0 a 15 cm de la bajada de la Aleación A-356 con tratamiento de refinación de 0.1014% Ti, colada por el proceso de Moldeo en Verde.

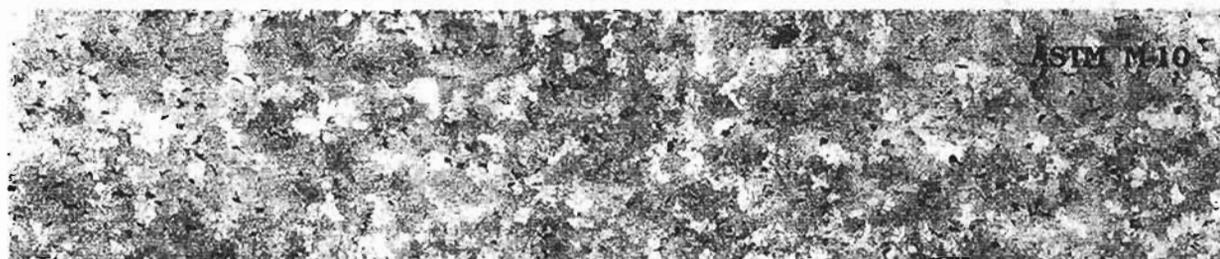


Foto 64. (1.5X) Sección de 0 a 15 cm de la bajada de la Aleación A-356 con tratamiento de refinación de 0.1337% Ti, colada por el proceso de Lost Foam.



Foto 65. (1.5X) Sección de 15 a 30 cm de la bajada de la Aleación A-356 con tratamiento de refinación de 0.1014% Ti, colada por el proceso de Moldeo en Verde.

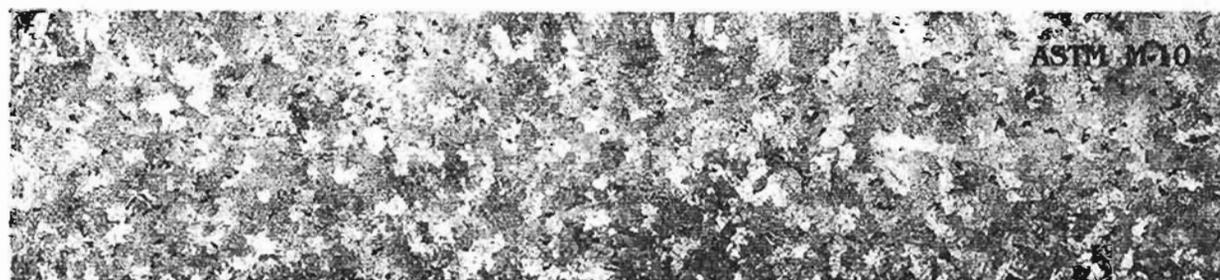


Foto 66. (1.5X) Sección de 15 a 30 cm de la bajada de la Aleación A-356 con tratamiento de refinación de 0.1337% Ti, colada por el proceso de Lost Foam.

4.3.5 Aleación A-356 con tratamiento de Refinación con Ti. Fabricada tanto por el proceso de Moldeo en Verde así como por el proceso de Lost Foam.

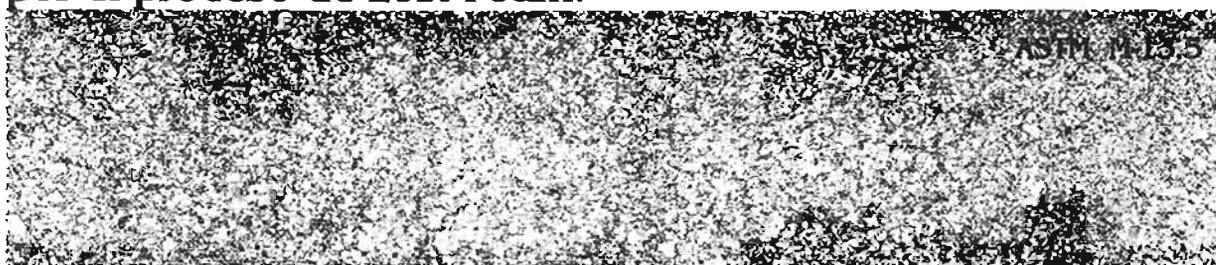


Foto 67. (1.5X) Sección de 0 a 15 cm de la bajada de la Aleación A-356 con tratamiento de refinación de 0.2133% Ti, colada por el proceso de Moldeo en Verde.



Foto 68. (1.5X) Sección de 0 a 15 cm de la bajada de la Aleación A-356 con tratamiento de refinación de 0.1911% Ti, colada por el proceso de Lost Foam.

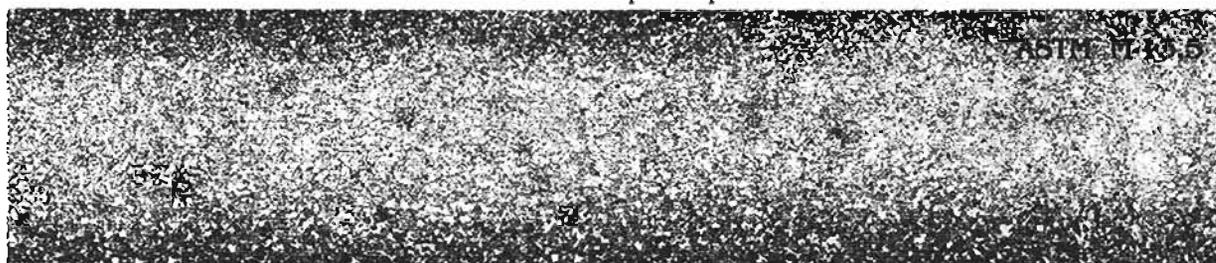


Foto 69. (1.5X) Sección de 15 a 30 cm de la bajada de la Aleación A-356 con tratamiento de refinación de 0.2133% Ti, colada por el proceso de Moldeo en Verde.



Foto 70. (1.5X) Sección de 15 a 30 cm de la bajada de la Aleación A-356 con tratamiento de refinación de 0.1911% Ti, colada por el proceso de Lost Foam.

Evaluación del Tamaño de Grano ASTM

Los resultados obtenidos a partir de las evaluaciones del tamaño de grano (# ASTM) para la aleación A-356 fabricada tanto por el proceso de Moldeo en Verde como por el proceso de Lost Foam se muestran en la tabla 9.

El tamaño fue evaluado utilizando un analizador de imágenes y tomando mediciones de diez granos de cada sección de barra midiendo cada grano en forma axial como se muestra en las figuras 4 y 5:



Figuras 4 y 5. Ejemplos de la evaluación del Tamaño de Grano

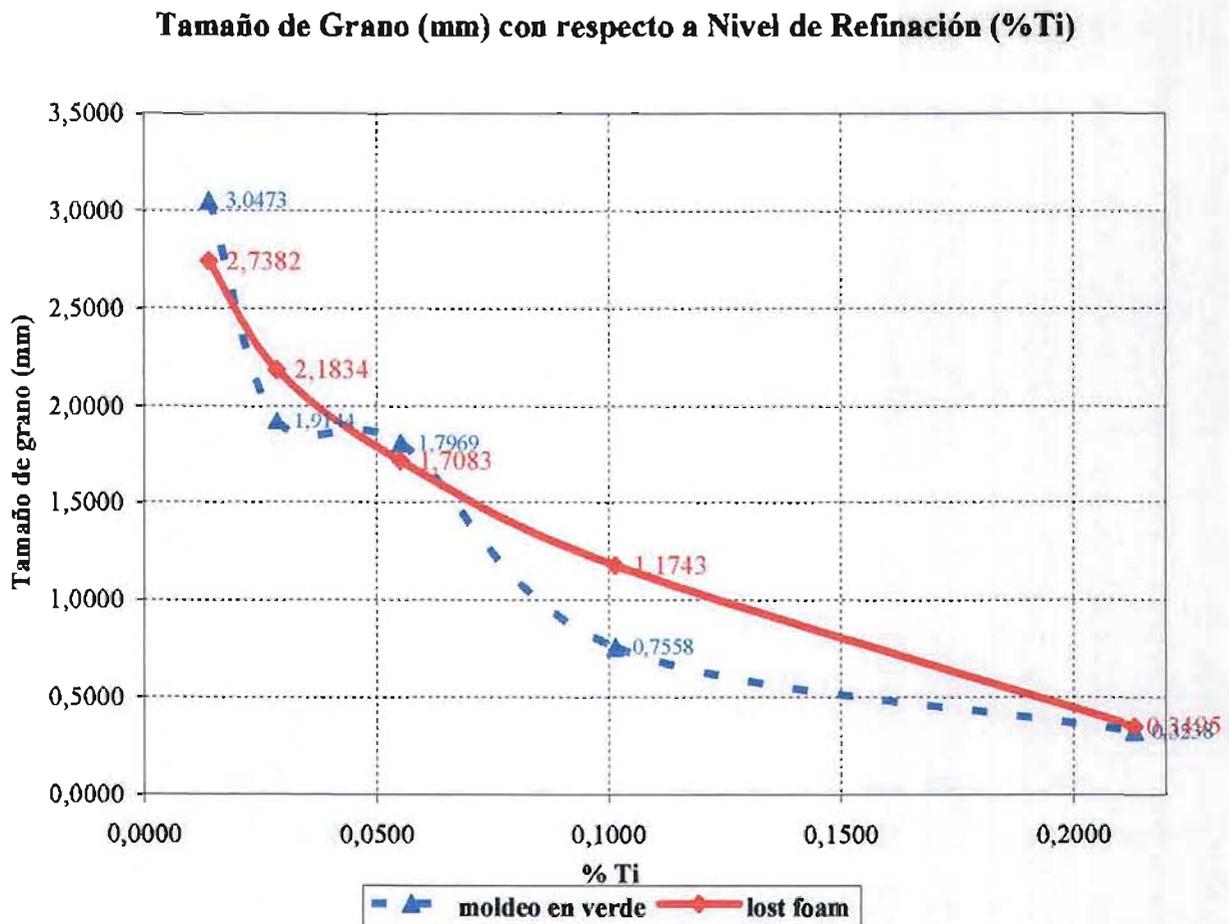
En la tabla 9 se muestra el tamaño de grano promedio de cada barra fabricada por los procesos de Lost Foam y Moldeo de Arena en Verde.

Tabla 9 Tamaño de Grano ASTM

Proceso de fabricación	Nivel de Refinación % TI	Sección longitudinal de 0 a 15 cm de la bajada		Sección longitudinal de 15 a 30 cm de la bajada		Promedio	
		Tamaño de grano mm	Tamaño de grano ASTM	Tamaño de grano mm	Tamaño de grano ASTM	Tamaño de grano mm	Tamaño de grano ASTM
		M. en Verde	0.000	3.176	M-7	2.918	M-7
M. en Verde	0.0287	1.976	M-8.5	1.879	M-8.5	1.914	M-8.5
M. en Verde	0.0553	1.810	M-9	1.780	M-9	1.796	M-9
M. en Verde	0.1014	1.031	M-10	0.450	M-12.5	0.755	M-11
M. en Verde	0.2133	0.321	M-13.5	0.326	M-13.5	0.323	M-13.5
Lost Foam	0.000	2.702	M-7.5	2.771	M-7.5	2.738	M-7.5
Lost Foam	0.0259	2.176	M-8	2.190	M-8	2.183	M-8
Lost Foam	0.0551	1.755	M-9	1.654	M-9	1.708	M-9
Lost Foam	0.1337	1.229	M-10	1.104	M-10	1.174	M-10
Lost Foam	0.1911	0.353	M-13	0.345	M-13	0.349	M-13

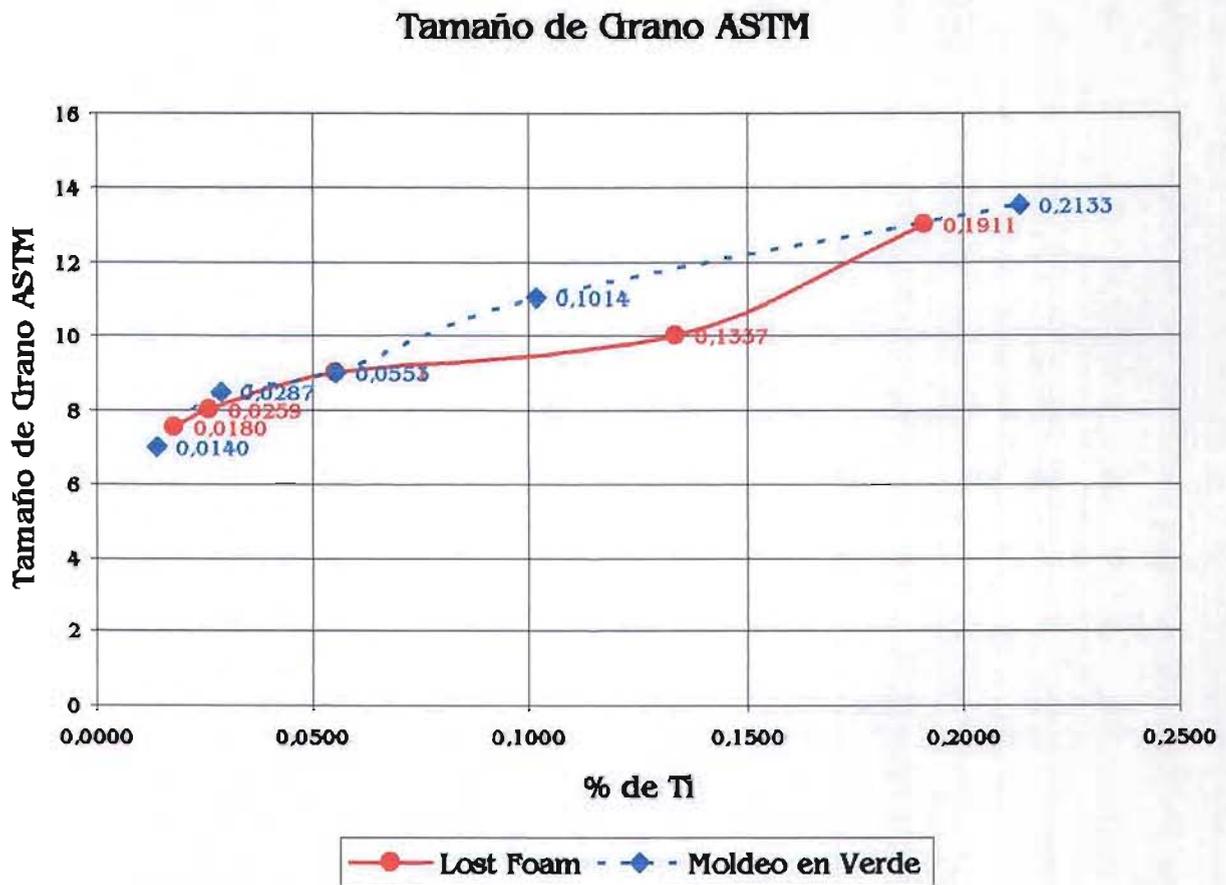
En la grafica 4 se presenta la tendencia del tamaño de grano en mm con respecto al porcentaje de Ti y se puede observar que el tamaño de grano decrece con la adición de Ti en ambos procesos, sin embargo la tendencia es más homogénea en el proceso de Lost foam.

Grafica 4. Variación del Tamaño de Grano (mm) con respecto al nivel de refinación.



En la grafica 5 se presenta la tendencia en ambos procesos (Lost Foam y Moldeo en Verde) del tamaño de grano ASTM con respecto al % de Ti.

Grafica 5. Variación del Tamaño de Grano (ASTM) con respecto al nivel de refinación.



4.4 Evaluación de la Porosidad (% de área)

La evaluación del porcentaje de área de poros se realizó tomando una fotografía a 1.5x en un analizador de imágenes.

En la tabla 10 se presentan los resultados obtenidos de la evaluación del porcentaje de área de poros.

Tabla 10. Evaluación de % de porosidad cualitativo

Proceso de Fabricación	Nivel de Modificación % Sr		Nivel de Refinación % Tl		Porosidad (% área) Sección longitudinal de 0 a 15 cm de la bajada	Porosidad (% área) Sección longitudinal de 15 a 30 cm de la bajada	Porosidad (% área) promedio a lo largo de toda la barra
	Calculado	Residual	Calculado	Residual			
M. en Verde	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.025
M. en Verde	0.025	0.023	0.025	0.0287	0.10	0.10	0.10
M. en Verde	0.050	0.0475	0.050	0.0553	0.00	0.05	0.025
M. en Verde	0.10	0.1017	0.10	0.1014	0.00	0.84	0.42
M. en Verde	0.015	0.0151	0.20	0.2133	0.00	0.10	0.05
Lost Foam	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.025
Lost Foam	0.025	0.0228	0.025	0.0259	0.05	0.18	0.115
Lost Foam	0.050	0.0504	0.050	0.0551	0.84	0.10	0.47
Lost Foam	0.10	0.1040	0.10	0.1337	1.30	1.00	1.15
Lost Foam	0.015	0.0149	0.20	0.1911	0.84	0.10	0.47

En la grafica 6 se presenta la comparación entre el proceso de Lost Foam y el proceso de Moldeo en Verde del porcentaje de área de poros promedio con respecto a los diferentes niveles de tratamiento aplicados.

Se observa que el porcentaje de área de poros es notablemente mayor en las barras fabricadas por el proceso de Lost Foam.

En donde se obtiene el mayor porcentaje de área de poros es cuando el tratamiento de modificación (0.100 % de Sr) y refinación (0.100 % de Ti).

Grafica 6. Porosidad Promedio a lo largo de cada barra

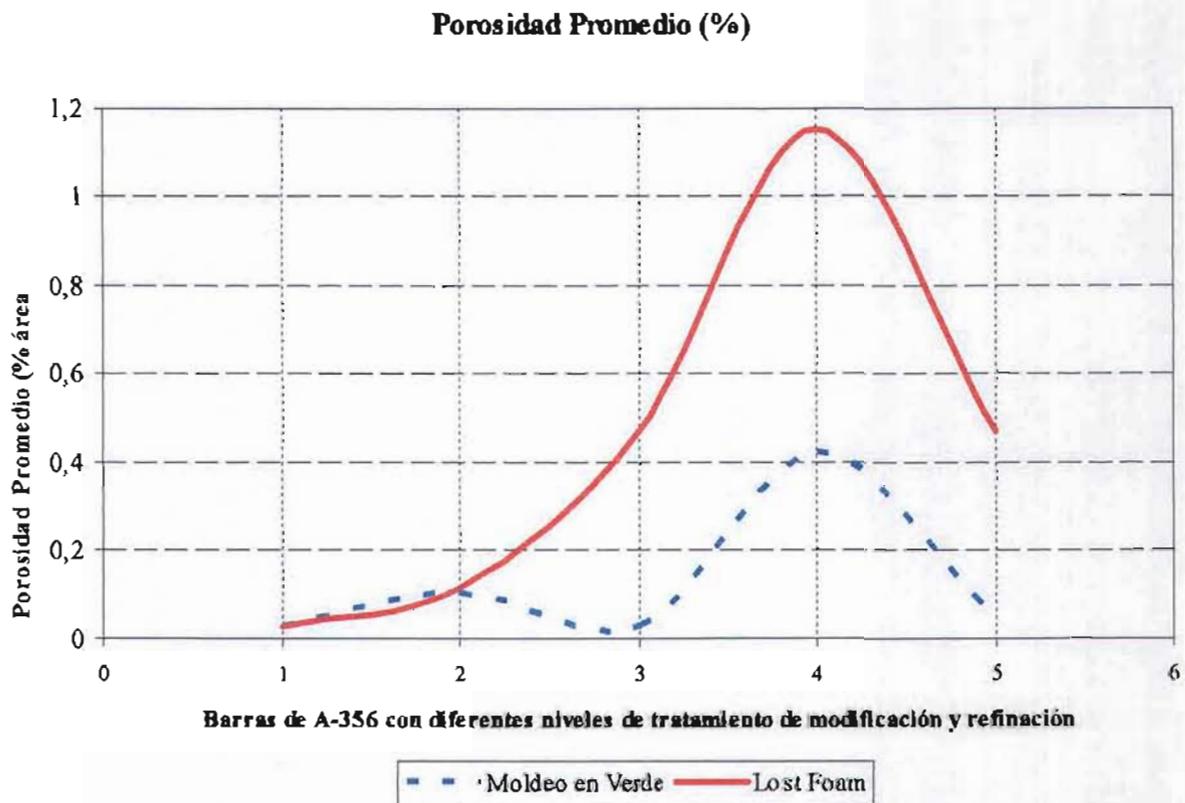


Tabla 11. Tratamiento aplicado a cada barra.

Barra	Modificación (%Sr)	Refinación (%Ti)	Barra	Modificación (%Sr)	Refinación (%Ti)
1	0.000	0.000	4	0.100	0.100
2	0.025	0.025	5	0.015	0.200
3	0.050	0.050			

CAPITULO V

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

La discusión y análisis de resultados se hace en base a los tratamientos de modificación y refinación aplicada en los procesos de Lost Foam y Moldeo de Arena en Verde.

Aleación A-356 sin tratamiento fabricado por el proceso de Moldeo en Verde.

Morfología del Silicio

Como se puede observar para la aleación A-356 sin tratamiento fabricada por el proceso de moldeo en verde (fotos 21, 22, 23), se tiene una estructura con placas alargadas en forma acicular y tienen un nivel I de modificación.

Con respecto a la distancia de la bajada podemos observar que la morfología del Silicio presente a 1 cm de distancia de la bajada (foto 21) es ligeramente más gruesa que la morfología presente a 15 cm (foto 22) y está a su vez es más gruesa que la que se encuentra a 29 cm (foto 23) esto se puede deber a la velocidad de enfriamiento, en la parte final de la pieza el enfriamiento es más rápido que en la parte central y la inicial.

Tamaño de Grano

El tamaño de grano es grande ya que no se tienen centros de nucleación. Se tiene un tamaño de grano promedio de 3.047 mm (M-7) a lo largo de toda la barra. El tamaño de grano en la sección de 0 a 15 cm de la bajada (foto 51) es ligeramente más grande que en la sección de 15 a 30 cm de la bajada (foto 53), aunque la diferencia no es significativa, la pequeña diferencia se debe a la velocidad de enfriamiento, ya que esta es mayor en la sección más lejana de la bajada. Además se pueden observar granos de tipo columnar en la Intercara molde-metal por lo tanto el grano es heterogéneo a lo largo de la pieza.

Espaciamiento Interdendrítico (DAS)

El espaciamiento Interdendrítico secundario es ligeramente diferente a lo largo de la pieza. En la parte que esta a 1 cm de la bajada (foto 21) se tiene un DAS promedio de 43.7898 μm que es ligeramente menor a la parte que esta a 15 cm (foto 22) que es de 47.6281 μm , sin embargo en donde hay una diferencia más significativa es en la sección que esta a 29 cm (foto 23) en está el DAS es menor y tiene un valor de 30.8408 μm , influenciado por la velocidad de enfriamiento.

Porosidad (%)

El porcentaje de porosidad es relativamente bajo, debido a que se realizo una desgasificación. En la única parte que se observa una mínima cantidad de poros es en la sección final de la pieza de 15 a 30 cm (foto 73). En la sección de 0 a 15 cm (foto 71) se observan algunos microrechupes muy cerca de la bajada, estos pueden ser ocasionados por la velocidad de solidificación, está parte es una de las últimas en solidificar y por lo tanto se pueden presentar pequeñas contracciones además que debido a la geometría de la pieza tenemos en esa parte una zona caliente.

Aleación A-356 sin tratamiento fabricado por el proceso de Lost Foam.

Morfología del Silicio

En el caso de la aleación sin tratamiento fabricada por el proceso de Lost Foam, se puede observar (fotos 24, 25, 26), se tiene una estructura con placas alargadas en forma acicular y tienen un nivel 1 de modificación.

Con respecto a la distancia de la bajada se puede observar que la morfología del Silicio presente a 1 cm de distancia de la bajada (foto 24) es ligeramente más gruesa que la morfología presente a 15 cm (foto 25) y está a su vez es más gruesa que la que se encuentra a 29 cm (foto 26) esto se puede deber a la velocidad de enfriamiento, en la parte final de la pieza el enfriamiento es más rápido que en la parte central y la Inicial.

En comparación con el proceso de moldeo en verde, este proceso tiene la misma tendencia a mayor distancia de la bajada la morfología del Silicio es más delgada aunque sigue siendo en forma de placas aciculares.

Tamaño de Grano

Al igual que en el proceso de Moldeo en Verde, el tamaño de grano es grande ya que no se tienen centros de nucleación. Se tiene un tamaño de grano promedio de 2.738 mm (M-7) a lo largo de toda la barra. El tamaño de grano en la sección de 0 a 15 cm de la bajada (foto 52) es ligeramente más heterogéneo, contiene más granos columnares, que en la sección de 15 a 30 cm de la bajada (foto 54), aunque la diferencia no es significativa, la pequeña diferencia se debe a la velocidad de enfriamiento, ya que esta es mayor en la sección más lejana de la bajada. Si se compara el tamaño de grano obtenido en esta pieza con la pieza obtenida por el proceso de Moldeo en Verde, no se encontrarán diferencias significativas.

Espaciamento Interdendrítico (DAS)

El espaciamento Interdendrítico secundario es ligeramente diferente a lo largo de la pieza. En la parte que está a 1 cm de la bajada (foto 24) se tiene un DAS promedio de 66.3544 μm que es ligeramente menor a la parte que está a 15 cm (foto 25) que es de 72.1152 μm , sin embargo en donde hay una diferencia más significativa es en la sección que está a 29 cm (foto 26) el cual es mucho menor y tiene un valor de 56.4133 μm el cual al igual que los demás casos es influenciado por la velocidad de enfriamiento. Se puede suponer que las propiedades no van a ser del todo homogéneas.

Al comparar los valores de DAS de la aleación fabricada por el proceso de Moldeo en Verde con está de Lost Foam, se puede ver que la aleación fabricada por el proceso de Lost Foam tiene un DAS más grande, esto puede indicar que la velocidad de enfriamiento es más lenta debida a que el medio de moldeo carece de humedad, lo contrario que en el Moldeo en Verde, además que la pintura refractaria con la que es cubierto el modelo de Poliestireno va a ayudar a que la temperatura se conserve por más tiempo.

Porosidad (%)

El porcentaje de porosidad es relativamente bajo, debido a que se realizó una desgasificación. En la única parte en la que se observa una mínima cantidad de poros es en la sección final de la pieza de 15 a 30 cm de la bajada (foto 74), estos pueden ser ocasionados porque al entrar el metal sustituye al modelo de Poliestireno y pueden quedar atrapados algunos gases. En la sección de 0 a 15 cm de la bajada (foto 72) no se observan poros.

Aleación A-356 fabricado por el proceso de Moldeo en Verde con tratamientos de Modificación con aleación maestra Al-10%wt Sr y Refinación con aleación maestra Al-5%wt Ti- 1 % wt B.

Aleación A-356 con tratamiento de Modificación con 0.023% de Sr y Refinación con 0.0287% de Ti.

Modificación

En el caso de la aleación con tratamiento de modificación con 0.023% Sr y refinación con 0.0287% de Ti fabricada por el proceso de Moldeo en Verde (fotos 33,34, 35), la morfología del Sllcio presente a 1 cm de distancia de la bajada (foto 33) es una estructura suficientemente modificada, nivel 4. La morfología presente a 15 cm (foto 34) es una estructura fibrosa eutéctica libre de fase acicular, nivel 5. Y la sección que se encuentra a 29 cm (foto 35), presenta también una estructura fibrosa, nivel 5. Esto se puede deber a la rapidez de enfriamiento, en la parte final de la pieza el enfriamiento es más rápido y refuerza la modificación con Sr.

Refinación de Grano

El tamaño de grano es mediano. Se tiene un tamaño de grano promedio de 1.914mm (M-8.5) a lo largo de toda la barra. El tamaño de grano en la sección de 0 a 15 cm de la bajada (foto 55) es igual que en la sección de 15 a 30 cm (foto 57). En estas barras se puede observar que el nivel de refinación es bajo y que el grano es equiaxial pero no es muy homogéneo a lo largo de toda la pieza, se observan granos equiaxiales cercanos a ser de tipo columnar.

Espaciamiento Interdendrítico (DAS)

El espaciamiento Interdendrítico es ligeramente diferente a lo largo de la pieza. En la parte que esta a 1 cm de la bajada (foto 33) se tiene un DAS promedio de 38.796 μm que es ligeramente menor a la parte que esta a 15 cm (foto 34) que es de 34.3533 μm , sin embargo en donde hay una diferencia más significativa es en la sección que esta a 29 cm (foto 35) el cual es mucho menor y tiene un valor de 36.1782 μm el cual al igual que los demás casos es influenciado por la velocidad de enfriamiento, ya que en el centro que es una de las partes que tarda más en solidificar es donde se encuentra un DAS mayor.

Porosidad (%)

El porcentaje de porosidad es relativamente bajo, debido a que se realizó una desgasificación. En la parte que se observan una mínima cantidad de poros es en la sección final de la pieza de 15 a 30 cm de la bajada (foto 77), y en la sección inicial de 0 a 15 cm de la bajada (foto 75). También se pueden observar algunos microrechupes muy cerca de la bajada, estos pueden ser ocasionados por la velocidad de solidificación, esta parte es una de las últimas en solidificar y por lo tanto se pueden presentar pequeñas contracciones además que debido a la geometría de la pieza tenemos en esa parte una zona caliente.

Aleación A-356 con tratamiento de Modificación con 0.0475% de Sr y Refinación con 0.0553% de Ti.

Modificación

En el caso de la aleación con tratamiento de modificación con 0.0475% Sr y refinación con 0.0553% de Ti fabricada por el proceso de Moldeo en Verde (fotos 39,40,41), la morfología del Silicio presente a 1 cm de distancia de la bajada (foto 39) es una estructura bien modificada, nivel 5. La morfología presente a 15 cm (foto 40) es una estructura parcialmente modificada, nivel 3. Y la sección que se encuentra a 29 cm (foto 41), presenta también una estructura parcialmente modificada, nivel 3.

Esto puede suceder porque en las zonas en donde se obtuvo un nivel 3 de modificación, iba decayendo el efecto modificador del Sr.

Refinación de Grano

El tamaño de grano es mediano. Se tiene un tamaño de grano promedio de 1.796mm (M-9) a lo largo de toda la barra. El tamaño de grano en la sección de 0 a 15 cm de la bajada (foto 59) es igual que en la sección de 15 a 30 cm de la bajada (foto 61). En estas barras se puede observar que el nivel de refinación es bajo y que el grano es equiaxial pero no es muy homogéneo a lo largo de toda la barra.

Espaciamento Interdendrítico (DAS)

El Espaciamento Interdendrítico es ligeramente diferente a lo largo de la pieza. En la parte que esta a 1 cm de la bajada (foto 39) se tiene un DAS promedio de 47.3013 μm que es ligeramente menor a la parte que esta a 15 cm (foto 40) que es de 50.5503 μm , sin embargo en donde hay una diferencia más significativa es en la sección que esta a 29 cm (foto 41) el cual es mucho menor y tiene un valor de 42.8326 μm el cual al igual que los demás casos es influenciado por la velocidad de enfriamiento, ya que en el centro que es donde tarda más en solidificar es donde se encuentra un DAS mayor.

Porosidad (%)

El porcentaje de porosidad es relativamente bajo, debido a que se realizó una desgasificación. En la parte que se observan una mínima cantidad de poros es en la parte media de la sección final de la pieza de 15 a 30 cm de la bajada (foto 81), y en la sección inicial de 0 a 15 cm de la bajada (foto 79). Al igual que en todas las barras fabricadas por el proceso de Moldeo en Verde, también se pueden observar algunos microrechupes muy cerca de la bajada, estos pueden ser ocasionados por la velocidad de solidificación, esta parte es la última en solidificar y por lo tanto se pueden presentar pequeñas contracciones además que debido a la geometría de la pieza tenemos en esa parte una zona caliente.

Aleación A-356 con tratamiento de Modificación con 0.1017% de Sr y Refinación con 0.1014% de Ti.

Modificación

En el caso de la aleación con tratamiento de modificación con 0.1017% Sr y refinación con 0.1014% de Ti fabricada por el proceso de Moldeo en Verde (fotos 45,46,47), la morfología del Silicio presente a 1 cm de distancia de la bajada (foto 45) es una estructura suficientemente modificada, nivel 4. La morfología presente a 15 cm (foto 46) es una estructura parcialmente modificada, nivel 3. Y la sección que se encuentra a 29 cm (foto 47), presenta también una estructura parcialmente modificada, nivel 3. Esto puede suceder porque en las zonas en donde se obtuvo un nivel 3 de modificación, iba decayendo el efecto modificador del Sr.

Refinación de Grano

El tamaño de grano es pequeño. Se tiene un tamaño de grano promedio de 0.755mm (M-11) a lo largo de toda la barra. El tamaño de grano en la sección de 0 a 15 cm de la bajada (foto 63) es más grande que en la sección de 15 a 30 cm de la bajada (foto 65). Mientras que en la primera sección el tamaño de grano es M-10 y en la segunda sección es de M-12.5. En esta barra se obtuvieron tamaños de grano muy heterogéneos. En este caso se puede suponer la presencia de algunos intermetálicos los cuales pudieron generar más centros de nucleación.

Espaciamiento Interdendrítico (DAS)

El espaciamiento Interdendrítico es ligeramente diferente a lo largo de la pieza, siguiendo la misma tendencia que las demás barras, el tamaño de DAS mayor se encuentra en el centro de la barra debido a que es la parte que tarda más en solidificar y permite un mayor crecimiento Interdendrítico. En la parte que esta a 1 cm de la bajada (foto 45) se tiene un DAS promedio de 39.101 μm que es ligeramente menor a la parte que esta a 15 cm (foto 46) que es de 45.8981 μm , sin embargo en donde hay una diferencia más significativa es en la sección que esta a 29 cm (foto 47) el cual es mucho menor y tiene un valor de 37.1402 μm .

Porosidad (%)

En el caso de esta barra en particular se puede notar que hubo un aumento considerable con respecto a los otros niveles de modificación ya que se obtuvo una porosidad promedio de 0.42% a pesar de haber realizado una desgasificación, pero cabe señalar que la porosidad se obtuvo en mayor medida en la sección de 15 a 30 cm de la bajada, en la cual se evaluó un 0.82 %. Por otro lado al igual que los demás casos de fabricación mediante el proceso de moldeo en verde hay pequeños microrechupes en la parte cercana a la bajada.

Aleación A-356 con tratamiento de Modificación con 0.0151% de Sr y Refinación con 0.2133% de Ti.

Modificación

En el caso de la aleación con tratamiento de modificación con 0.0151% Sr y refinación con 0.2133% de Ti fabricada por el proceso de Moldeo en Verde (fotos 27,28,29), la morfología del Silicio presente a 1 cm de distancia de la bajada (foto 27) es una estructura parcialmente modificada, nivel 3. La morfología presente a 15 cm de la bajada (foto 28) es laminar con remanentes de fase acicular, nivel 2. Y la sección que se encuentra a 29 cm (foto 29), presenta una estructura parcialmente modificada, nivel 3. Esto se puede deber a la rapidez de enfriamiento, en la parte final de la pieza el enfriamiento es más rápido y refuerza la modificación con Sr. Y en el caso de la sección que está a 1 cm de la bajada, también tiene una rapidez de enfriamiento mayor que en el centro.

Refinación de Grano

El tamaño de grano es muy pequeño. Se tiene un tamaño de grano promedio de 0.323mm (M-13.5) a lo largo de toda la barra. El tamaño de grano en la sección de 0 a 15 cm de la bajada (foto 67) es igual que en la sección de 15 a 30 cm de la bajada (foto 69). En estas barras podemos ver que el nivel de refinación es alto y que el grano además de ser totalmente equiaxial y pequeño es homogéneo a lo largo de toda la pieza, ya no observamos granos de tipo columnar.

Espaciamiento Interdendrítico (DAS)

El espaciamiento Interdendrítico es ligeramente diferente a lo largo de la pieza. En la parte que está a 1 cm de la bajada (foto 27) se tiene un DAS promedio de $48.5998 \mu\text{m}$ que es ligeramente menor a la parte que está a 15 cm (foto 28) que es de $50.8778 \mu\text{m}$, sin embargo en donde hay una diferencia más significativa es en la sección que está a 29 cm (foto 29) el cual es mucho menor y tiene un valor de $44.3102 \mu\text{m}$ el cual al igual que los demás casos es influenciado por la velocidad de enfriamiento. Se puede intuir que las propiedades mecánicas van a ser heterogéneas.

Porosidad (%)

El porcentaje de porosidad es relativamente bajo, debido a que se realizó una desgasificación. En la única parte que se observa una mínima cantidad de poros es en la sección final de la pieza de 15 a 30 cm de la bajada (foto 89). En la sección de 0 a 15 cm de la bajada (foto 87) se pueden observar algunos microrechupes muy cerca de la bajada, estos pueden ser ocasionados por la velocidad de solidificación, esta parte es la última en solidificarse y por lo tanto se pueden presentar pequeñas contracciones además que debido a la geometría de la pieza tenemos en esa parte una zona caliente.

Aleación A-356 fabricada por el proceso de Lost Foam con tratamientos de Modificación con aleación maestra Al-10%wt Sr y Refinación con aleación maestra Al-5%wt Ti- 1%wt B.

Aleación A-356 con tratamiento de Modificación con 0.0228% de Sr y Refinación con 0.0259% de Ti.

Modificación

En el caso de la aleación con tratamiento de modificación con 0.0228% Sr y refinación con 0.0259% de Ti fabricada por el proceso de Lost Foam (fotos 36,37,38), la morfología del Silicio presente a 1 cm de distancia de la bajada (foto 36) es una estructura bien modificada, nivel 5.

La morfología presente a 15 cm (foto 37) es una estructura supermodificada, nivel 6. Y la sección que se encuentra a 29 cm (foto 38), presenta también una estructura supermodificada, nivel 6. Esto se puede deber a la rapidez de enfriamiento, en la parte final de la pieza, el enfriamiento es más rápido y refuerza la modificación con Sr.

Si se compara el nivel de modificación con el obtenido para la barra fabricada por el proceso de Moldeo en Verde se puede notar que los niveles de modificación son mayores en la misma proporción. Para explicar este fenómeno, se puede suponer que en el molde de arena hay cierta cantidad de oxígeno antes de que entre el metal, esto puede contribuir a que el Sr se oxide en cierta proporción y así tener realmente un porcentaje de Sr menor. Por el contrario en el caso del proceso de Lost Foam en la arena se encuentra el modelo de Poliestireno que va a evitar que en el interior exista la presencia de oxígeno.

Refinación de Grano

El tamaño de grano es mediano. Se tiene un tamaño de grano promedio de 2.183 mm (M-8) a lo largo de toda la barra. El tamaño de grano en la sección de 0 a 15 cm de la bajada (foto 56) es igual que en la sección de 15 a 30 cm de la bajada (foto 58). En estas barras se puede observar que el nivel de refinación es bajo y que el grano es equiaxial pero no es muy homogéneo a lo largo de toda la pieza, se pueden observar granos equiaxiales cercanos a ser de tipo columnar.

En comparación con la barra a la que se le aplicó el mismo tratamiento fabricada por el proceso de moldeo en verde, no hay grandes diferencias, el promedio del tamaño de grano ASTM es el mismo. Por lo tanto en ese nivel de refinación el comportamiento para ambos procesos es el mismo.

Espaciamento Interdendrítico (DAS)

El espaciamento Interdendrítico es ligeramente diferente a lo largo de la pieza. En la parte que esta a 1 cm de la bajada (foto 36) se tiene un DAS promedio de 48.9344 μm que es ligeramente menor a la parte que esta a 15 cm (foto 37) que es de 56.8132 μm , sin embargo en donde hay una diferencia más significativa es en la sección que esta a 29 cm (foto 38) el cual es mucho menor y tiene un valor de 40.2105 μm el cual al igual que los demás casos es influenciado por la velocidad de enfriamiento, ya que en el centro que es donde tarda más en solidificar es donde se encuentra un DAS mayor. Se puede suponer que las propiedades no van a ser del todo homogéneas.

Al comparar los resultados obtenidos con los obtenidos por el proceso de Moldeo en Verde, se puede observar que el comportamiento lleva la misma tendencia, pero los valores de DAS obtenidos en el proceso de Lost Foam son ligeramente mayores, y esto se puede explicar porque al vaciar el metal líquido en el modelo de Poliestireno no sufre un choque térmico como en el molde de arena en verde debido a la ausencia de humedad, y la velocidad de enfriamiento puede ser menor.

Porosidad (%)

El porcentaje de porosidad es relativamente bajo, se obtuvo un porcentaje promedio de 0.115% a lo largo de toda la pieza, aunque en donde se acentúa en mayor proporción es en la sección de 15 a 30 cm de distancia de la bajada, esto como ya se menciona, a diferencia del proceso de Moldeo en Verde, en el proceso de Lost Foam, al ser vaciado el metal líquido y sustituir el modelo de Poliestireno se lleva a cabo la pirolisis en la cual se generan diversos gases, los cuales tienen que salir por medio de la arena y la pintura refractaria y no siempre alcanzan a salir completamente.

Aleación A-356 con tratamiento de Modificación con 0.0504% de Sr y Refinación con 0.0551% de Ti.

Modificación

En el caso de la aleación con tratamiento de modificación con 0.0504% Sr y refinación con 0.0551% de Ti fabricada por el proceso de Lost Foam (fotos 42, 43, 44), la morfología del Silicio presente a 1 cm de distancia de la bajada (Foto 42) es una estructura suficientemente modificada, nivel 4. La morfología presente a 15 cm de (foto 43) es una estructura bien modificada, nivel 5. Y la sección que se encuentra a 29 cm (foto 44), presenta también una estructura suficientemente modificada, nivel 4. Esta diferencia es muy pequeña ya que si es comparada con la barra fabricada por el proceso de moldeo en verde se puede observar que el nivel obtenido es más heterogéneo y además menor que la barra fabricada por el proceso de Lost Foam.

Refinación de Grano

El tamaño de grano es mediano. Se tiene un tamaño de grano promedio de 1.708mm (M-9) a lo largo de toda la barra. El tamaño de grano en la sección de 0 a 15 cm de la bajada (foto 60) es igual que en la sección de 15 a 30 cm de la bajada (foto 62). En estas barras se puede observar que el nivel de refinación es bajo y que el grano es equiaxial pero no es muy homogéneo a lo largo de toda la barra.

Al ser comparada la barra bajo las mismas condiciones de tratamiento pero fabricada por el proceso de Moldeo en Verde se puede notar que no hay grandes diferencias en cuanto al tamaño y la forma del grano.

Espaciamento Interdendrítico (DAS)

El espaciamento Interdendrítico es ligeramente diferente a lo largo de la pieza. En la parte que esta a 1 cm de la bajada (foto 42) se tiene un DAS promedio de $50.9144\mu\text{m}$ que es ligeramente menor a la parte que esta a 15 cm de la bajada (foto 43) que es de $54.3768\mu\text{m}$, sin embargo en donde hay una diferencia más significativa es en la sección que esta a 29 cm de la bajada (foto 44) el cual es mucho menor y tiene un valor de $45.8148\mu\text{m}$ el cual al igual que los demás casos es influenciado por la velocidad de enfriamiento, ya que en el centro que es donde tarda más en solidificar es donde se encuentra un DAS mayor.

La tendencia sigue siendo la misma que en todas las barras anteriores y al comparar con el proceso de moldeo en verde, se puede observar que los valores de DAS son ligeramente menores que los obtenidos por el proceso de Lost Foam.

Porosidad (%)

El porcentaje de porosidad aumento ligeramente ya que se tiene un porcentaje promedio de 0.47% el cual se acentúa más en la sección de 15 a 30 cm de la bajada.

Al comparar las barras obtenidas por ambos procesos se puede observar que en promedio el porcentaje evaluado en la barra fabricada por el proceso de Lost Foam es mayor, esto debido probablemente a los gases desprendidos en la pirolisis del Poliestireno.

Aleación A-356 con tratamiento de y Modificación con 0.1040% de Sr Refinación con 0.1337% de Ti.

Modificación

En el caso de la aleación con tratamiento de modificación con 0.1040% Sr y refinación con 0.1337% de Ti fabricada por el proceso de Lost Foam (fotos 48,49,50), la morfología del Silicio presente a 1 cm de distancia de la bajada (foto 48) es una estructura parcialmente modificada, nivel 3. La morfología presente a 15 cm (foto 49) es una estructura parcialmente modificada, nivel 3. Y la sección que se encuentra a 29 cm (foto 50), presenta también una estructura parcialmente modificada, nivel 3.

Al comparar el nivel de modificación en ambos procesos se puede observar que el nivel de modificación no es el adecuado si se toma en cuenta que se agregó 0.10% de Sr. Así que se supone una de las probables causas: para poder mantener las mismas condiciones en ambos procesos, la temperatura de colada fue alta (750°C) y pudo haber oxidación de Sr por lo tanto obtener un nivel menor de modificación.

Refinación de Grano

El tamaño de grano es pequeño. Se tiene un tamaño de grano promedio de 1.174mm (M-10) a lo largo de toda la barra. El tamaño de grano en la sección de 0 a 15 cm de la bajada (foto 64) es muy similar que en la sección de 15 a 30 cm de la bajada (foto 66). En esta barra se obtuvieron tamaños de grano muy homogéneos.

Al comparar la barra con el mismo nivel de refinación fabricada por el proceso de moldeo en verde se puede observar que en el caso de la barra fabricada por el proceso de Lost Foam, la refinación de grano es más homogénea.

Espaciamiento Interdendrítico (DAS)

El Espaciamiento Interdendrítico es ligeramente diferente a lo largo de la pieza, siguiendo la misma tendencia que las demás barras, el tamaño de DAS mayor se encuentra en el centro de la barra debido a que es la parte que tarda más en solidificar y permite un mayor crecimiento Interdendrítico. En la parte que esta a 1 cm de la bajada (foto 48) se tiene un DAS promedio de $54.4751 \mu\text{m}$ que es ligeramente menor a la parte que esta a 15 cm de la bajada (foto 49) que es de $57.6700 \mu\text{m}$, sin embargo en donde hay una diferencia más significativa es en la sección que esta a 29 cm de la bajada (foto 50) el cual es mucho menor y tiene un valor de $45.2309 \mu\text{m}$.

Al igual que en los demás casos el DAS evaluado en las barras fabricadas por el proceso de Lost Foam es ligeramente mayor que el DAS evaluado en las barras fabricadas por el proceso de Moldeo en Verde.

Porosidad (%)

En el caso de esta barra en particular se puede observar que hubo un aumento considerable con respecto a los otros niveles de modificación ya que se obtuvo una porosidad promedio de 1.15% a pesar de haber realizado una desgasificación, pero cabe señalar que la porosidad se obtuvo en mayor medida en la sección de 0 a 15 cm de la bajada, en la cual se evaluó un 1.3%.

En este caso en particular al comparar ambos procesos, se obtiene que el porcentaje de poros es mayor en el proceso de Lost Foam que en el proceso de Moldeo en Verde.

Aleación A-356 con tratamiento de Modificación con 0.0149% de Sr y Refinación con 0.1911% de Ti.

Modificación

En el caso de la aleación con tratamiento de modificación con 0.015% Sr y refinación con 0.20% de Ti fabricada por el proceso de Lost Foam (fotos 30, 31,32), la morfología del Silicio presente a 1 cm de distancia de la bajada (foto 30) es una estructura parcialmente modificada, nivel 3. La morfología presente a 15 cm (foto 31) es parcialmente modificada, nivel 3. Y la sección que se encuentra a 29 cm (foto 32), presenta una estructura parcialmente modificada, nivel 3.

Esta modificación se realizó de una forma muy homogénea y puede ser comparada con la barra fabricada por el proceso de Moldeo en Verde que es muy similar en cuanto a los niveles y la microestructura.

Refinación de Grano

El tamaño de grano es muy pequeño. Se tiene un tamaño de grano promedio de 0.349mm (M-13) a lo largo de toda la barra. El tamaño de grano en la sección de 0 a 15 cm de la bajada (foto 68) es igual que en la sección de 15 a 30 cm de la bajada (foto 70). En estas barras se puede observar que el nivel de refinación es alto y que el grano además de ser totalmente equiaxial y pequeño es homogéneo a lo largo de toda la pieza, ya no se observan granos de tipo columnar.

Al ser comparado con el mismo nivel de refinación de grano realizada a una barra fabricada por el proceso de Moldeo en Verde, se puede observar que el nivel de refinación es igual y el tamaño de grano promedio es muy similar.

Espaciamento Interdendrítico (DAS)

El espaciamento Interdendrítico es ligeramente diferente a lo largo de la pieza. En la parte que está a 1 cm de la bajada (foto 30) se tiene un DAS promedio de 68.8183 μm que es ligeramente menor a la parte que está a 15 cm (foto 31) que es de 77.6468 μm , sin embargo en donde hay una diferencia más significativa es en la sección que está a 29 cm (foto 32) el cual es mucho menor

y tiene un valor de $62.2699\mu\text{m}$ el cual al igual que los demás casos es influenciado por la velocidad de enfriamiento.

Si se comparan los valores de DAS obtenidos para ambos procesos se puede decir que los valores de DAS obtenidos en las barras fabricadas por el proceso de Lost Foam son alrededor de un 30% mayores a los valores obtenidos en las barras fabricadas por el proceso de Moldeo en Verde.

Porosidad (%)

El porcentaje de porosidad promedio obtenido en esta barra fue de 0.47% (fotos 88 y 90) que es mucho mayor que su similar fabricada por el proceso de Moldeo en Verde.

Como se menciona anteriormente, esto puede deberse a los gases generados en la pirolisis del Poliestireno.

CAPITULO VI.

CONCLUSIONES

1. El nivel de modificación es más homogéneo a lo largo de la barras fabricadas por el proceso de Lost Foam comparado con la barras fabricadas por el proceso de Moldeo de Arena en Verde.
2. El nivel óptimo de modificación para las barras fabricadas tanto por el proceso de Lost Foam como por el Proceso de Moldeo de Arena en Verde se obtuvo con 0.025 % de Sr residual.
3. El tamaño de grano es ligeramente más grande y más homogéneo a lo largo de la barras fabricadas mediante el proceso de Lost Foam en comparación con las barras fabricadas por el proceso de Moldeo de Arena en Verde.
4. El Espaciamiento Interdendrítico Secundario (DAS) es mayor en las barras fabricadas por el proceso de Lost Foam, que el DAS evaluado en las barras fabricadas por el proceso de Molde de Arena en Verde.
5. El porcentaje de área de poros es notablemente mayor en las barras fabricadas por el proceso de Lost Foam, que en las barras fabricadas por el proceso de Moldeo de Arena en Verde.
6. Para el nivel de modificación con 0.10 % de Sr se presento un mayor porcentaje de área de poros en ambos procesos.
7. El proceso de Lost Foam puede ser aplicado para la aleación de Aluminio A-356 Modificada y Refinada ya que se obtienen micro y macro estructuras más homogéneas que en el proceso de Moldeo de Arena en Verde.

BIBLIOGRAFÍA.

1. "Aluminium Casting Technology". 2nd edition. AFS Inc. des Plaines, Illinois. U.S.A. 1993.
2. F.C. Dimayuga: 'Modification of Al-Si alloys using Sr, Na and Sb', *2nd International Conference on Molten Aluminum Processing AFS*, 1989.
3. G.W. Boone, R.F. Carver: 'Optimizing the performance of aluminum master alloy grain refiners and modifiers in Al-Si alloys', *2nd International Conference on Molten Aluminum Processing AFS*, 1993.
4. C. Kim, R.W. Helne: 'Effect of various elements on the refinement of Al-Si alloys', *Journal Institute of Metals*, 1964, 92, pp. 367.
5. A. Pacz. 'Sodium Modification treatment for Al-Si alloys', *USA Patent*, 1920, No. 1,387,900.
6. G. Chai, L. Backerud: 'Factors affecting modification of Al-Si alloys by adding Sr-containing master alloys', *AFS Transactions*, 1992, 92-194, pp. 847.
7. P. Davami, M. Ghafelehbash: 'Strontium as a modifying agent for Al-Si eutectic alloy', *British Foundryman*, 1979, pp. 4.
8. B. Closset, I.E. Gruzleski: 'A study on the use of pure metallic strontium in the modification of Al-Si alloys', *AFS Transactions*, 1981, pp. 801.
9. G.K. Sigworth: "Theoretical and practical aspects of the modification of Al-Si alloys", *AFS Transactions*, 1983, pp. 7.
10. R. DasGupta, C.G. Brown, S. Marek: 'Analysis of overmodified 356 aluminum alloy', *AFS Transactions*, 1988, pp. 297.
11. B. Closset, S. Kitaoka: 'Evaluation of strontium modifiers for Al-Si casting alloys', *AFS Transactions*, 1987, pp. 233.
12. N. Handlak, I.E. Gruzleski, D.Argo: 'Sodium, strontium and antimony interactions during modification of A356 alloys', *AFS Transactions*, 1987, pp.3
13. S. T. McClain, J. T. Berry and B. Dawsey. "A Study of Porosity and Pore Morphology in Aluminum A356.2 Step Castings" The University of Alabama at Birmingham, Birmingham, Alabama Mississippi State University, Starkville, Mississippi.
14. B. Closset, H. Dugas, M. Pekguleryuz. I.E. Gruzleski: "The Aluminum-strontium phase diagram". *Metallurgical Transactions*, 1986, pp. 1250.
15. R.I. Klssiling, I.F. Wallace: 'Refinement of aluminum-silicon alloys', *Foundry*, 1963, pp. 74.
16. D.P. Kanicki, W. Rasmussen: 'Processing molten aluminum -Part 1: Understanding silicon modification', *Modern Casting*, 1990, pp. 24.
17. Rasmussen: 'Processing molten aluminum -Part 2: Cleaninig up your metal', *Modern Casting*, 1990, pp. 55

18. H.B. Dieter, A.J. Paoli "Sand Without Binder for Making Full Mold Castings." AFS Transactions, 1967 (pp. 67-17).
19. A. Wittmoser "Full Mold Casting". AFS Transactions, 1964 (pp. 64-39).
20. R. Bailey. "Understanding the Evaporative Pattern Casting Process (EPC)". Modern Casting Aug 1981.
21. P. G. Kohler "Evaporative Pattern Process: A New Dimension for the Foundry." Modern Casting, Sep 1981.
22. P. G. Kohler. "EPC's Role in Flexible Manufacturing". Modern Casting 1984.
23. J.H. Barron. "Full Mold Process- The Direct Approach to Metal Casting". AFS Transactions, 1965 (pp. 65-42)
24. R.R. Immel "Expandable Polystyrene and Its Processing into Patterns for the Evaporative Casting Process" *AFSTransactions*, 1979(pp. 79-03).
25. Evaporative Casting Using Expandable Polystyrene Patterns and Unbonded-Sand Casting Techniques E.J. Sikora *AFSTransactions*, 1978(pp. 78-43)
26. R.F. Shroyer "Patternmaking in Foam" *AFSTransactions*, 1964(pp. 64-52)
27. E.M. Getner "The Applicability of Polystyrene to the Making of Patterns" *AFSTransaction5*, 1965(pp.65-12)
28. O.E. Okorafor, c.R. Loper, Jr "Metallurgical Factors Affecting the Microstructure of Expendable Polystyrene Pattern Cast Al-4.25Cu-1.03Si". *AFS Transactions*, 1982 (pp. 82-124)
29. R.E. Dieter "Aluminum Castings from Expanded Polystyrene Patterns" *AFS Transactions*, 1965 (65-61)
30. R.S. Lee "Gating of Full Mold Castings with Unbonded Sand Molds" *AFS Cast Metals Research Journal*, Ser 1973
31. R.G. Chamberlain "Polystyrene Patterns for Machine Tool Castings" *AFSTransactions*, 1970
32. J .S. Ransen "Cast-On Surfacing of Polystyrene Pattern Castings" *AFS Transactions*, 1983 (pp. 83-125)
33. J.R. Schaum "Operations for Profit: Preview of Tomorrow" *ModernCasting*, Mar 1976
34. V.H. Burchel "Production Systems for Lost Foam Castings" *AFS Transactions*, 1984 (pp. 84-100)
35. S.Shivkumar, L.Wang, D.Apelian, "The Lost Foam Casting of Aluminum Alloy Components", *Journal of Material*, November, 1990
36. A.Perrone, F. Bonollo, V. Wagner, "Fonderia: Stato Dell'Arte, Alluminio Magazine", pag 32-41, N.4, Agosto, 1998
37. Amaro V., Yamamoto A., "Modificación y Refinación de un Composito Base Aluminio" (tesis). Fac de Química UNAM, pag 4-25, 1994.

38. "Top ten lost foam casting questions".
[Http://www.lostfoam.com/feature/article.shtml?key=1](http://www.lostfoam.com/feature/article.shtml?key=1)
39. "Lost foam process" http://www.vulcangroup.com/index_lostfoam.htm
40. "American foundrymen's society AFS division 11: lost foam casting"
<http://web.umn.edu/~foundry/>
41. Michael J. Lessiter, "Total Product Optimization Via Lost Foam Casting", engineered casting solutions, winter, 1999, p. 31
42. M. Warner, b.a. Miller, and h.e. Littleton, "Pattern Pyrolysis Defect Reduction In Lost Foam Castings", AFS transactions, 1998.
43. B. Vatankhah, d. Sheldon, and h.e. Littleton, "Optimization Of Vibratory Sand Compaction", AFS transactions, 1998.
44. S. Bennett, C.W. Ramsay, and D.R. Askeland, "Temperature Gradients During Fill and Solidification of Lost Foam Aluminum Castings", Am. Foundrymen's Soc. Trans., 1998, p 357.
45. "Lost Foam Castings" <http://www.willardindustries.com/lost-foam-castings.htm>
46. "New process control measures and technical know how Leading to accelerated use of lost foam process"
http://www.eere.energy.gov/industry/metalcasting/pdfs/uab_lostfoam.pdf
47. Charles E. Bates, Harry E. Littleton, Don Askeland, Taras Molibog, Jason Hopper, Ben Vatankhah. "Advanced lost foam casting technology". Summary report and final technical report to the departamen of energy. University of Missouri al Rolla. Usa. 2000
48. "Procesos Para Materiales Metálicos".
http://www.me.uprm.edu/~Irosario/4055_clases/fundicion.htm
49. William D. Callister, Jr. "Introducción A La Ciencia E Ingeniería De Los Materiales". 1995. Ed. Reverté, S.A
50. William F. Smith "Fundamentos De La Ciencia E Ingeniería De Materiales". 1993. De. McGraw Hill.
51. James H. Cooley and Richard Vaughan Williams "The Pyrolysis of Polystyrene". Department of Chemistry, University of Idaho, Moscow, ID 83844-2343, williams@uldaho.edu Received April 1, 2003. Accepted July 4, 2003
52. "Comportamiento Al Fuego Del EPS" [www.aape.com.ar/nove 6-3/COMPORTAMIENTO AL FUEGO.pdf](http://www.aape.com.ar/nove6-3/COMPORTAMIENTO_AL_FUEGO.pdf)
53. "Toxicidad de los humos del EPS". http://www.anape.es/construir_cf.htm