

2 29



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

**MODIFICACION EN EL MOLDE DE UNA
ALEACION AI-5Si (SAE 35)**

TESIS MANCOMUNADA

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO QUIMICO METALURGICO**

P R E S E N T A N

**JUAN MANUEL ELPIDIO ANGULO CORTES
SERGIO IGNACIO CRUZ**

FALLA DE ORIGEN

1990



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está 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.

INDICE

Prólogo.....	1
Resumen.....	11
Capítulo I	
1.0 Antecedentes.....	1
1.1 Tipos de modificación.....	1
1.2 Reacciones secundarias y modificadas.....	5
1.3 Efecto sobre la microestructura.....	5
1.4 Efecto sobre las propiedades mecánicas.....	7
1.5 Tipos de modificaciones y características.....	11
1.6 Cantidades de adición.....	12
1.7 Procesos de modificación.....	13
1.7.1 Modificación en la olla.....	14
1.7.2 Modificación en el molde.....	16
Capítulo II	
Procesos de tratamiento en el molde.....	17
2.1 Modificación en el molde.....	17
2.2.1 Sistema de colada para el tratamiento de nodulización en el molde.....	18
2.2.2 Canales y trampas de escoria.....	21
2.2.3 Entradas.....	22
2.2.4 Escoria.....	23
2.2.5 Área de control de flujo o reducción.....	24
Capítulo III	
3.1 Modificación en el molde.....	25
3.2 Cálculo de la cámara de reacción y sistema de colada.....	31

Capítulo I:	
4.1 Diseño del experimento.....	38
4.1.1 Equipo.....	39
4.1.2 Materiales.....	40
4.2 Procedimiento experimental.....	40
4.2.1 Elaboración del molde.....	41
4.2.2 Técnica de fusión.....	41
4.2.3 Evaluación de las piezas de prueba.....	41
Capítulo V	
Resultados y su discusión.....	44
Capítulo VI	
Conclusiones y observaciones.....	51
Apendice.....	54
Bibliografía.....	76

F R O L O G O

Estamos viviendo en una época, donde el desarrollo tecnológico crece rápidamente y donde existe una búsqueda constante para mejorar o aun innovar procesos y técnicas que nos permitan obtener mejores productos a un menor costo en menos tiempo.

Una innovación al proceso de modificación de aleaciones Aluminio-Silicio, es la que se presenta en este trabajo, aunque dicho proceso se ha utilizado desde hace veinte años para fierros nodulares, no se tiene información para metales no ferrosos, es por ello que el presente trabajo se desarrolló sin tener antecedentes al respecto y se tuvo que diseñar el sistema de colada completo.

El objetivo de esta tesis es comparar el proceso de tratamiento en la olla con el proceso de tratamiento en el molde, determinando: a) el porcentaje de retención del elemento modificador en la aleación, b) el grado de modificación, y c) las propiedades mecánicas (resistencia a la tracción y comportamiento de elongación).

La hipótesis para la realización de este trabajo es que el proceso de tratamiento en el molde (proceso propuesto) ofrece ventajas sobre el tratamiento en la olla: a) un mejor control de las variables operativas (temperatura de tratamiento, temperatura de colada y tiempo de contacto del metal líquido con el material modificador), b) la alta retención del material modificador en la aleación, y c) la obtención de mejores propiedades del producto. Ademas tiene la posibilidad de la automatización del proceso.

El primer paso se ha dado, en un futuro el reto es la optimización del proceso de tratamiento y elevar las perspectivas de desarrollo que hoy se visualizan, prometedoras y ventajosas.

M.C.C.

RESUMEN

En este trabajo se empleó un nuevo proceso en la modificación de aleaciones Al-Si denominada proceso de modificación en el molde, el cual consiste en colocar el agente modificador directamente dentro del molde. Se hace una comparación de este método con el convencional (modificación en la olla) mediante ensayos mecánicos, análisis químicos y análisis estructural.

Se expone a continuación una breve descripción del contenido de este trabajo.

Capítulo 1. En este capítulo se mencionan las teorías existentes para explicar la modificación.

Capítulo 2. En este capítulo se establecen las bases del tratamiento en el molde aplicados a los tipos de nodulares y las variables que se deben controlar.

Capítulo 3. Se dan las bases para desarrollar el tratamiento en el molde para aleaciones Al-Si, se calcula el sistema de colada y la cámara de reacción.

Capítulo 4. Se da una descripción del experimento.

Capítulo 5. Se presentan los resultados y la discusión de los mismos, comparando el proceso convencional con el propuesto.

Capítulo 6. Se concluye acerca de este trabajo, de los resultados obtenidos y se dan una serie de recomendaciones para mejorar el proceso y realizar trabajos futuros.

CAPITULO I

1.0 ANTECEDENTES.

Uno de los tratamientos que comúnmente se aplican a las aleaciones líquidas de Al-Si es la modificación, con la cual se cambia la fase eutéctica de una morfología de placas aciculares y gruesas a una forma globular y fina. Este tratamiento se aplica para lograr un aumento en la resistencia a la tracción y el porcentaje de elongación.

1.1 TEORIAS DE MODIFICACION.

Debido a que las aleaciones Al-Si son objeto de un considerable uso comercial, se han realizado estudios (1,2,3,6,7,8,9,10) referentes a sus propiedades mecánicas y a su modificación.

El silicio a temperatura ambiente es prácticamente insoluble en aluminio. Durante la solidificación precipita como un constituyente primario o como un eutéctico asociado con el aluminio. En cualquier caso el silicio adquiere la forma polihedral y acicular, lo cual hace que la resistencia a la tracción y el porcentaje de elongación sean bajos; esto es debido a que la punta de los cristales del eutéctico actúan como sitios concentradores de esfuerzos donde se puede iniciar una fractura.

La modificación de las aleaciones Al-Si puede llevarse a cabo de la siguiente manera: a)enfriamiento rápido (proceso térmico); b)pequeñas adiciones de elementos modificadores (proceso químico).

Proceso térmico.

El enfriamiento rápido interrumpe el crecimiento de los cristales de eutéctico de Al-Si y por lo tanto se obtienen pequeños fragmentos de

estos en la matriz, esto produce un aumento en la resistencia a la tracción y en el porcentaje de elongación de la aleación.

La estructura obtenida es en forma de agujas y placas, solo que son muy pequeñas dando la impresión de una estructura modificada.

Proceso químico.

Mediante la adición de elementos modificadores se obtiene una fase eutéctica de forma globular.

A continuación se comentan algunas teorías sobre los mecanismos de modificación.

Es desde 1911 cuando Frilley (1) descubre una estructura modificada de una aleación Al-Si al producirla por reducción electrolítica directa de alúmina y sílice simultáneamente.

En 1921, Pacz (2), descubre la modificación de una aleación Al-Si al agregar sal de NaF, antes de vaciar.

Existen varias hipótesis prop. estas acerca de los mecanismos de modificación, sin que hasta la fecha exista una explicación única, debido a las variables involucradas. Las principales variables involucradas son: 1) la composición química de la aleación, 2) la temperatura a la cual se realiza el tratamiento, 3) los elementos modificadores, y 4) la velocidad de solidificación. Por lo que cada mecanismo propuesto establece ciertas condiciones particulares.

Algunos autores (3, 5, 6 y 9) coinciden en señalar que la nucleación y el crecimiento, que se dan en una estructura modificada, depende de un cierto rango de temperatura, por tal motivo el elemento modificador no es en si mismo la causa de la modificación; sino que el modificador provoca que la temperatura eutéctica disminuya

promoviendo un subenfriamiento y por lo tanto una nucleación de grano más efectiva, obteniéndose así una estructura modificada.

Curran y Otani (3) sugirieron el sistema ternario Al-Si-Na como una explicación de la parte que juega el sodio en la formación de la estructura modificada.

Thall y Chalmers (3) sugirieron que la presencia de una concentración de sodio en los alrededores del aluminio causan un decremento en la energía superficial y en la tensión interfacial entre los cristales de silicio sólido y aluminio sólido.

Ransley y Neufeld (3) dieron la teoría de la obstrucción a la nucleación y crecimiento del silicio en aleaciones modificadas la cual menciona que la modificación es causada por un componente rico en sodio de composición $NaAlSi_{1.25}$ ó $NaAlSi_{1.33}$.

Kim y Heine (3) reportan lo siguiente:

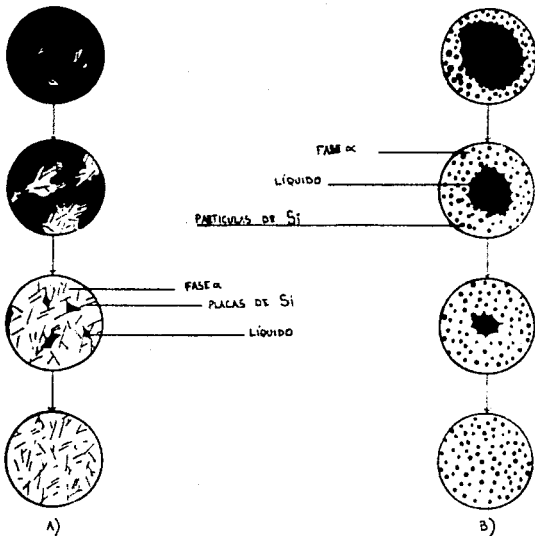
El eutéctico de la aleación nuclea en toda la muestra y crece dentro del líquido en forma de células (denominadas dendritas), por lo que no hay separación entre la capa completamente sólida y el corazón líquido. Este es el tipo de solidificación normal conocida como solidificación endógena.

En cuanto a la solidificación de una aleación con estructura eutéctica modificada, ésta se realiza desde la superficie y avanza hasta alcanzar el centro, y se presenta en cualquier rango de composición de la aleación. A esta solidificación se le conoce como solidificación exógena. Ver figura 1.1.

Existe otro tipo de modificación estudiada por Kellian y Cheng (4) los cuales nos dicen que se da cuando se procede con una refinación de grano. La explicación es que existen numerosas fases primarias y se

ESTRUCTURA NORMAL

ESTRUCTURA MODIFICADA



A) Solidificación a) Endogena b) Exogena Ref. (3)

FIGURA 1.1

reduce el volumen del líquido interdendritico; por lo que esto es una restricción física para el crecimiento de los cristales de silicio. Este fenómeno causa una modificación indirecta de la estructura.

1.2 ALEACIONES SUSCEPTIBLES A MODIFICAR.

Las aleaciones que son susceptibles a modificación son las aleaciones Al-Si que pertenecen a la serie 3XXY y las de la serie 4XX. Las aleaciones Al-Si-Mg. Se debe evitar un alto contenido de otros elementos que no sean aluminio y silicio debido a que interfieren en el mecanismo de modificación.

1.3 EFECTO SOBRE LA MICROESTRUCTURA.

Las estructuras no modificadas y modificadas que comúnmente se encuentran en las aleaciones comerciales tienen dos modos completamente de solidificación de la fase eutéctica.

Las aleaciones no modificadas forman colonias de placas de eutéctico. El tipo de placa crece dentro del aluminio primario en el líquido.

Por otra parte en las aleaciones modificadas, los cristales de eutéctico nuclean en forma de globulos. En la sobreimpulsación el eutéctico se agrupa en forma de cristales, formando "bandas de solidificación". Observar la fig. 10.1.

- 1.- Estructura sin modificar.
La fase eutéctica presenta láminas finas en forma acicular.
- 2.- Estructura mal modificada.
La fase eutéctica presenta láminas finas en forma acicular.
- 3.- Estructura ligeramente modificada.
La estructura laminar empieza a romperse, pero aun así existe fase eutéctica en forma acicular.
- 4.- Estructura suficientemente modificada.
La estructura laminar se ha fracturado completamente.
- 5.- Estructura bien modificada.
La fase eutéctica está presente en forma de partículas globulizadas.
- 6.- Estructura supermodificada.
La fase eutéctica está presente en forma de partículas globulizadas pero extremadamente finas.
- 7.- Estructura sobremodificada.
Las partículas de fase eutéctica empiezan a engrosar, los grandes de aluminio primario forman colares o bandas.



Figura 1.3.1 Diferentes grados de modificación de la fase eutéctica en una aleación Al-Si, por la adición de sodio.

1.4 EFECTO SOBRE LAS PROPIEDADES.

Numerosos trabajos (4,5,6,7,8) reportan un sustancial incremento en la resistencia a la tracción y en el porcentaje de elongación, de aleaciones modificadas comparadas con las aleaciones sin modificar.

Cabe señalar que los trabajos han sido realizados en su gran mayoría con estroncio y sodio. En las tablas 1.4.1 y 1.4.2 puede observarse el efecto de la modificación sobre las propiedades mecánicas de algunas aleaciones Al-Si.

Tabla 1.4.1.

TABLA DE PROPIEDADES OBTENIDAS, EN ALGUNAS ALEACIONES DE ALUMINIO CON TRATAMIENTO DE MODIFICACION.

ALEACION Y TEMPLE	PRODUCTO	TRATAMIENTO	RESISTENCIA A LA TRACCION (KSI)	ELONGACION
13% Si	Barras de prueba coladas en arena.	No Modificada	18.0	2.0
		Modificada con sodio (Na)	28.0	13.0
13% Si	Barras de prueba coladas en molde permanente.	No Modificada	28.0	3.6
		Modificada con sodio (Na)	32.0	8.0
359.0	Barras de prueba coladas en molde permanente.	No Modificada	26.1	5.5
		Modificada con 0.07% Sr	30.5	12.0
356.0 - T6	Barras de prueba coladas en arena.	No Modificada	41.9	2.0
		Modificada con 0.007% Sr	42.5	3.0
356.0 - T6	Barras de prueba coladas en arena enfriadas.	No Modificada	41.2	4.4
		Modificada con 0.007% Sr	42.2	7.2
A 356.0 - T6	Barras de prueba coladas en arena.	No Modificada	40.0	4.8
		Modificada con 0.01% Sr	43.0	8.0
A 444.0 - T4	Barras de prueba coladas en molde permanente.	No Modificada	21.9	24.0
		Modificada con 0.007% Sr	21.6	30.0
A 413.2	Barras de prueba coladas en arena.	No Modificada	19.8	1.8
		Modificada con 0.005 a 0.05% Sr	23.0	8.4

ALEACION Y TEMPLE	PRODUCTO	TRATAMIENTO	RESISTENCIA A LA TRACCION (KSI)	ELONGACION %
A 413.2	Barras de prueba coladas en molde permanente.	No Modificada	24.4	5.0
		Modificada con 0.005 a 0.02% Sr	27.7	12.0
A 413.2	Barras de prueba coladas a partir de rines.	Modificada con	28.0	10.5
		Modificada con 0.005 Sr	29.0	12.8

NOTA: 1 psi = 0.6895 N/cm²

REP.(10)

EFFECTO DE MODIFICACION Y RAPIDEZ DE SOLIDIFICACION EN LAS PROPIEDADES MECANICAS
DE UNA ALEACION FUNDIDA A-356

MODIFICACION		RESISTENCIA A LA TRACCION	% DE ELONGACION
RAPIDEZ DE SOLIDIFICACION BAJA (DE FUNDICION)	A	22,650	3.0
	B	22,860	3.3
	C	23,070	3.5
RAPIDEZ DE SOLIDIFICACION ALTA (DE FUNDICION)	A	24,150	4.6
	B	28,450	9.3
	C	26,950	9.2
BARRAS DE PRUEBA (DE FUNDICION Y DE ACUERDO A LA NORMA ASTM B108)	A	26,965 ± 590	5.4 ± 0.8
	B	27,546 ± 413	5.6 ± 0.5
	C	27,514 ± 653	5.9 ± 1.0

COMPOSICION	QUIMICA	Y %	DE	MODIFICADOR		
A	0.30 Mg	0.02 Cu	0.19 Fe	6.85 Fe	0.14 Ti	0.0055 B
B	0.44 Mg	0.02 Cu	0.18 Fe	6.82 Fe	0.13 Ti	0.0056 B
C	0.45 Mg	0.02 Cu	0.19 Fe	6.98 Fe	0.12 Ti	0.0016 B
	0.0000 Sr	0.0028 P				
	0.0027 Sr	0.0028 P				
	0.0270 Sr	0.0025 P				

dt22.(7)

1.6. CANTIDADES DE ALICION.

En algunos trabajos (4,8,9,10) se ha encontrado que el contenido adecuado de sodio residual (cantidad de sodio que contiene la aleación después del tratamiento) es de 0.05-0.06% para lograr estructuras bien modificadas para aleaciones con 8.5-9.5% de silicio. Sigworth (10) menciona que con niveles mayores de 0.02% de sodio residual se puede causar una sobremodificación en la estructura causando una disminución en la resistencia a la tracción, debido principalmente a la precipitación de cristales intermetálicos de Al₃Na. Una de las características importantes del sodio como elemento modificador es su tiempo de disolución que varía de unos cuantos segundos hasta 2 minutos (11).

El estroncio es un modificador cuyos contenidos recomendados son del orden de 0.005-0.01% (4,6) para aleaciones hipereutécticas. Para aleaciones hipereutécticas el porcentaje puede oscilar entre 0.12-0.2% de estroncio residual ya que por arriba de estos niveles se forman compuestos de Sr₂Si y SrAl₂Si₂ los cuales provocan una disminución en las propiedades mecánicas.

Se menciona (12) que una buena modificación se obtiene agregando cantidades mayores a 0.015% en peso de sodio. Davami y Sigworth (8 y 10) reportan que con estas adiciones se mantienen niveles de alrededor 0.002%. Para el caso de sales de sodio, la recuperación es del 7-8% de silicio. Kissling y Wallace (4) mencionan la siguiente reacción

para la reacción de la aleación de aluminio:



1.7 PROCESOS DE MODIFICACION.

Aleaciones maestras y sales.

El estroncio es usado en forma de aleación maestra o aleación "liga" de Al-Sr, usualmente en forma de lingote. Existen un gran número de estas aleaciones, por ejemplo: aluminio-10% estroncio (9) o bien aluminio-14% estroncio (9), aluminio-3.5% estroncio (5).

Usado en forma de lingote tiene el inconveniente de tener tiempos de disolución entre 30 a 40 minutos, los cuales son mayores que los modificadores en forma de sal a base de sodio. En la industria, el estroncio se utiliza en forma de varilla la cual tiene la ventaja de disolverse rápidamente, pues los tiempos para obtener los beneficios de la modificación varían entre 15 a 20 min. Otra forma de obtener una modificación en estos intervalos de tiempo es precipitando la aleación o agarrarla en forma líquida. El estroncio es un modificador permanente. La pieza puede ser refundida varias veces sin dejar de estar modificada, debido a que el tiempo de decaimiento del estroncio es muy largo. Un inconveniente es que el estroncio puede ser oxidado si al desgasificar se usan compuestos que contengan cloro (9). Adiciones de estroncio con niveles arriba de los recomendados no tienen un gran efecto en la sobremodificación. La modificación se mantiene con el consecuente mantenimiento de la resistencia a la tracción (6). Asimismo el estroncio se usa en forma de sales como SrCl₂ obteniéndose resultados similares a los obtenidos con una aleación maestra.

El sodio es agregado en forma metálica, usualmente en un envase sellado y contenido ferrosos. Debido a su gran reactividad con el

tafe y aquí por lo que se debe tener cuidado al manejarlo, estas modificaciones hacen que se utilicen los gases puros. Así, que con más facilidad de manejar y más de seguridad, los trabajos presentan algunas dificultades, como es en las soldaduras por lo que pueden introducir humedad y, por lo tanto, más cuidado al baño metálico.

Además de presentar bajos niveles de recuperación por tener un tiempo de decaimiento corto, es decir, una rápida oxidación y volatilización del elemento modificador por alta temperatura, por la consecuente pérdida de raciones potenciales para facilitar la solidificación y por la retención de la sal en la superficie del baño.

El sodio ya sea como metal, como sal tiene un tiempo de decaimiento de modificación, por tener tiempos de decaimiento cortos, los cuales son todavía menores cuando se incrementa la temperatura.

Algunas ventajas de utilizar sodio en lugar de estroncio es que el sodio tiene un tratamiento más limpio y seguro, esto es, sin contaminación de gases y logrando estructuras bien modificadas.

1.7.1 MODIFICACION EN LA OLLA.

La modificación involucra la adición de pequeñas cantidades de cierto material modificador al metal fundido. Los procedimientos por los cuales se realiza dicha adición pueden dividirse en dos:

1) Modificación en la olla.

Este método involucra a todas las técnicas en las cuales el material modificador se adiciona al metal mientras está en la olla o mientras está en ella. El método puede tener dos variantes, la primera es que se utilice una cámara de inmersión, la cual contiene el material

modificador (esta técnica se recomienda cuando se utilizan sales). La otra variante es semejante a la denominada técnica del "sandwich", en la cual el material modificador se coloca en la olla antes de llenarla con el metal líquido.

Los aspectos que deben tomarse en cuenta al utilizar cualquiera de estas técnicas son: el tiempo de decapamiento (para el caso de sales), la pérdida del material modificador por oxidación y/o atrapamiento de este en la escoria y el tiempo de disolución en el caso de aleaciones maestras. No deben utilizarse ollas con grandes volúmenes de metal pues el tratamiento no es homogéneo y las pérdidas del material modificador son grandes.

2) Modificación tardía.

El término de modificación tardía incluye cualquier técnica de adición del material modificador al chorro del metal mientras éste se coela al molde o de su colocación en el interior del molde.

La modificación en el chorro de colada se realiza mediante un mecanismo (que sujeta el material modificador), el cual empieza a funcionar cuando se inicia el flujo de metal y termina cuando este se suspende. Esta técnica se utiliza generalmente en procesos de colada continua, en los contenedores ubicados antes de los moldes.

Este método ofrece algunas ventajas, tales como: una operación automática durante la alimentación del material modificador, asegurando una cantidad constante de adición continua. Sin embargo entre los inconvenientes sobresale el largo tiempo de disolución.

1.1.1. MODIFICACION EN EL MOLDE

Además de este un trabajo sobre esta técnica efectuado por García, Beltrán y Ariasendo (1). La técnica implica la colocación del material modificador dentro del molde, para lo cual es conveniente desarrollar una cámara de reacción y de mezclado para favorecer la disolución y el mezclado del modificador en el metal antes de entrar al molde. Se ha obtenido buenos resultados, por ejemplo, una homogeneidad en el resqueado y un tiempo de calentamiento mínimo o nulo y la adición de la misma cantidad de material modificador en cada molde. Es posible producir mayores niveles de modificación por esta técnica con mucho menor adición de modificador que por la técnica en la olla.

Se pueden utilizar materiales comerciales en forma de comprimidos o en polvo. Entre las desventajas que presenta esta técnica se ha observado: materiales con tiempos de disolución largos y el inconveniente de la generación de gases dentro del molde.

CAPITULO I

PROCESOS DE TRATAMIENTO EN EL MOLDE.

Uno de los mas importantes y recientes desarrollos en la produccion de hierros nodulizados es el proceso de tratamiento o nodulizacion en el molde, iniciado a principios de los años 60, mediante el cual la nodulizacion del hierro liquido se hace directamente dentro del molde. Los principios basicos de esta tecnica se relacionan con la velocidad de flujo del metal liquido que entra en contacto con la area especifica de la coque de reaccion, de tal forma que el elemento nodulizante se disuelva e incorpore al flujo metalico.

El proceso fue introducido en los Estados Unidos en 1973 y tuvo una rapida adaptacion debido a sus multiples ventajas tecnico-economicas entre las que figuran la estabilizacion de las practicas, un mayor aprovechamiento del elemento nodulizante, una mayor restriccion en el control de la temperatura, una menor contaminacion, un mayor rendimiento del sistema de coque y mejores propiedades fisicas en la pieza.

2.1. NODULIZACION EN EL MOLDE

Las industrias que utilizan este proceso, alcanzan un buen número de beneficios, entre los cuales figuran (12):

- 1.- La automatizacion del proceso, con lo cual se evita la influencia de factores humanos que promueven el desperdicio del material nodulizante por alta temperatura y/o por largos periodos de tiempo, al estar en contacto el material nodulizante con el metal fundido.

2.- Un mayor aprovechamiento del elemento nodulizante durante el tratamiento. Se han reportado aprovechamientos mayores al 10% (22,23), comparados con los de otros procesos que oscilan entre 30-50%.

3.- La contaminación; los gases generados son mínimos.

4.- El rendimiento de sistema de colada; aunque los procesos de colada normales utilizan de un 7 a un 5% en peso mayor, la generación de escoria producida por los procesos de tratamiento en la olla, es mayor.

5.- Las propiedades físicas del metal solidificado; son mucho mejores en cantidad de esteroides por unidad de área, grado de esferoidicidad, características que aumentan la resistencia a la tracción.

Sin embargo, de la misma forma en que los procesos ofrecen ventajas, este proceso presenta algunas desventajas:

- a) La selección inadecuada de las aleaciones a tratar y del material de tratamiento.
- b) La posibilidad de gases y/o inclusiones que provienen del nodulizante y/o del material del molde.
- c) La necesidad de un diseño adecuado del sistema de colada para cada pieza.

2.2. SISTEMAS DE COLADA PARA EL TRATAMIENTO DE NODULIZACION EN EL MOLDE.

Cuando se diseña un tratamiento en el molde se deben considerar los siguientes factores:

- Un sistema de colada que contenga una cámara de tratamiento.
- Que el llenado del molde sea tan rápido como sea posible.
- Mantener constantes las condiciones de flujo durante el llenado.

Consecuentemente, el sistema de colada se divide en dos partes importantes.

- 1) El área de proceso, en otras palabras la cámara de reacción y,
- 2) El sistema de colada y de distribución en el molde.

Por otro lado, también debe tenerse en cuenta el factor "tiempo de llenado", ya que este define el área transversal, es decir, el área que permite la disolución del material nodulizante con el paso del flujo metálico.

Debido a que los procesos de nodulización producen gases, es necesario incrementar la sección transversal del conducto para disminuir la velocidad del y que tales productos fluyan en la corriente del metal líquido.

Para un grado de metal el contenido de nodulizante puede controlarse variando el área transversal de la cámara, pues se ha encontrado experimentalmente que existe una relación entre:

- Velocidad de disolución del nodulizante
- El flujo másico (o peso de colada) y
- El área transversal de la cámara de proceso.

La forma básica de presentación de la cámara de reacción se presenta en la patente correspondiente (24), un esquema típico se muestra en la fig. 2.2.1; en éste se presenta lo siguiente:

- a) Cope o tira de colada,
- b) Bajada o canal vertical,
- c) Cámara de proceso o de reacción,
- d) Conducciones o canales,
- e) Entradas o atascos,
- f) Cavidad que forma la pieza y
- g) Área de control de flujo o de estrangulamiento.

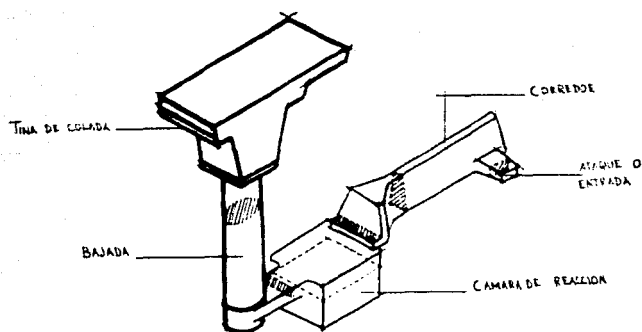


FIGURA 2.2.1 ARREGLO DEL SISTEMA DE COLADA, UTILIZADO PARA LA PRODUCCION DE HIERRO MODULAR.

2.2.1. CAMARA DE REACCION

La cámara de proceso, es un componente diseñado especialmente, en el cual se coloca el elemento nodulizante para ponerse en contacto con el flujo metálico y poder molerarse y disolverse; dicha cámara debe estar colocada en un lugar estratégico del sistema de colada para que realice correctamente su función.

En los procesos de tratamiento en el molde uno de los parámetros importantes que deben tomarse en cuenta es el FACTOR DE DISOLUCION (f_d), es decir, la rapidez con la cual se disuelve el nodulizante.

Este factor es función de las características y condiciones del material de tratamiento (5).

$$SF = \text{flujo masico (Kg. s)} / \text{área de la cámara (cm}^2)$$

El área transversal o lateral de la cámara, que controla la cantidad de material expuesto al flujo metálico por unidad de tiempo y las dimensiones del área de la cámara (CA), se determinan en base al factor de disolución (SF) y el flujo masico (FR), a partir de la expresión anterior, es decir:

$$CA = FR / SF$$

En donde CA es el área de la cámara (cm²), FR es el flujo masico (kg. s) el cual se puede determinar en forma práctica para cada sistema de colada (dependiendo del peso de la pieza fabricada), e parte:

$$FR = MMW / FT$$

Donde MMW es el peso del metal dentro del molde (kg) y FT es el tiempo de llenado del molde (s).

La cámara de tratamiento no siempre se sitúa en el plano de partición pues se puede colocar totalmente en la base o en la tapa del molde. Otra opción es el uso de cámaras dobles y sistemas de

cámara con dos bujes; las cámaras no sólo se restringen a formas de paralelepípedos rectangulares, sino también pueden ser semiesféricas. Otra de las características más importantes, es la dimensión y posición de la salida del metal de la cámara de reacción, ya que esto controla la rapidez de salida del flujo y la cantidad de material de tratamiento incorporado al metal tratado. Esta área generalmente es 12% mayor que el área de control de flujo (zona inferior de la bajada).

Existen valores reportados para el factor de disolución en la bibliografía (10), el cual tiene valores de 0.1 a 0.25 ($\text{kg/cm}^2\text{s}$), para el diseño de una cámara de proceso. En otro estudio (11) se reportan valores de SF de 0.15 a 0.20 ($\text{kg/cm}^2\text{s}$).

Para el caso de utilizar bloques sólidos, es necesario tener una cámara con un área cuatro veces mayor que el área controlada para materiales nodulizantes en forma granulada.

3.2.2. CANALES Y TRAMPAS DE ESCORIA.

La producción de piezas libres de inclusiones y escoria se logra con un diseño apropiado del corredor y de las trampas de escoria. Se sugiere (18) que la distancia mínima entre la cámara de proceso y la primera entrada debe ser aproximadamente 6 in., para velocidades de flujo entre 5 y 8 ft/s. Además se han recomendado:

- Velocidades de flujo bajas, para corredores cortos,
- Corredores largos pueden tolerar velocidades altas,
- Con velocidades altas se requiere un espacio suficiente el área transversal del corredor para alcanzar la velocidad adecuada.

Por otro lado, las trampas de escoria proveen una disminución efectiva de la velocidad y retienen las inclusiones y no disminuyen

al rendimiento del sistema de colada y se pueden ubicar a lo largo del corredor o al final de este.

2.2.3. ENTRADAS.

Para el caso de piezas coladas, se ha recomendado situar la(s) entrada(s) en la base, esto da como resultado una mejor sección desconficiente y disminución de defectos por inclusiones.

2.2.4. PIEZA.

En esta cavidad se trata de obtener una pieza con la mayor calidad posible.

2.2.5. AREA DE CONTROL DE FLUJO O REDUCCION.

El área de control de flujo o reducción (área interior del canal principal), controla la rapidez del llenado del sistema de colada. El cálculo del dimensionamiento es común para la reducción en los procesos de tratamiento en el molde, se muestra a continuación (19,10):

$$AR = k \times MW \cdot \sqrt{PT \cdot EMH}$$

Donde AR es el área de control de flujo o reducción, k es una constante que oscila entre 0.31 a 0.34, MW es el peso del metal en el molde, PT es el tiempo de llenado del molde, EMH es la presión metalostática base por:

$$EMH = H - P / C$$

Donde H es la altura de la pasada o canal vertical, P es la altura de la pieza por arriba del plano de partición y C la altura de la pieza.

En los párrafos anteriores se explicaron las consideraciones que se deban tener en cuenta para llevar a cabo un diseño de un sistema de colada que contenga una cámara de tratamiento, cuando se realiza un proceso de nucleación en el molde. Debe hacerse notar que las

características y condiciones, son exclusivas y sólo aplicables a
hierros colados. Por lo que en el caso del proceso de modificación en
el acido de piezas de aleaciones de Al-Si, tomar en cuenta estas
consideraciones podría ser desastroso.

CAPITULO 3

3.1 MODIFICACION EN EL MOLDE.

La modificación en el molde de piezas coqueas de aleaciones de Al-Si, ya sea en moldes de arena o metálico no se realiza a nivel industrial (1).

El proceso consiste básicamente en diseñar una cámara de reacción en la que interactuen el flujo metálico con el material modificador. El flujo disuélvase e integre el modificador al metal líquido que llenara la cavidad principal. Las características involucradas en el proceso son:

- a) El diseño del sistema de colada.
 - b) Propiedades metalúrgicas de la aleación.
 - c) Diseño de la cámara de reacción.
- Las características serán descritas a continuación.
- 1) EL DISEÑO DEL SISTEMA DE COLADA.

Quizás el punto más importante para los procesos de tratamiento en el molde, son, el diseño del sistema de colada y de la cámara de reacción, con esto se establecerán las condiciones necesarias para que el material modificador se mezcle y disuelva homogéneamente.

Es conveniente introducir dos conceptos involucrados en los procesos de tratamiento en el molde: el primero es el factor de disolución y el segundo es el trayecto de disolución, es decir, la distancia a la cual el material de tratamiento se incorpora al metal líquido.

Los componentes de un sistema de colada para el tratamiento de modificación en el molde, son:

- 1.- Copa o tina de colada.

- 2.- Bajada o canal vertical.
- 3.- Cámara de reacción.
- 4.- Área transversal del conector a la salida de la cámara de reacción.
- 5.- Conector y trampas de escoria.
- 6.- Entradas o ataqués (a la cavidad principal).
- 7.- Alimentadores (en caso de requerirlos).
- 8.- Cámara principal y
- 9.- Sistema de control.

2) PROPIEDADES METALURGICAS DE LA ALEACION.

En un sistema de colada de piezas manufacturadas en moldes de arena es importante considerar:

- a.- La reactividad de la aleación en estado líquido.
- b.- El modo de solidificación.
- c.- La alta tendencia a atrapar escoria e impurezas.
- d.- La alta tendencia a disolver gases.
- e.- La densidad y la viscosidad de la aleación.
- f.- La dificultad de eliminar porosidades, debido a la contracción del metal al solidificar.

Teniendo estos antecedentes en cuenta se puede diseñar y dimensionar los componentes del sistema de colada, aunque existen diversos métodos para su cálculo, los principios son los mismos para todo y deben aplicarse con conocimiento, experiencia para lograr una alta eficiencia en el proceso.

Los métodos de cálculo para sistemas de colada referidos en la literatura para obtener piezas coladas de aluminio o de sus

aleaciones (21, 27, 28, 30), se presentan en forma de gráficos, tablas y nomogramas.

Para determinar el área de control de flujo, primero se determina la velocidad del flujo metálico, dada por la ecuación:

$$v = Fr \sqrt{2gH} \dots\dots(1)$$

Donde v es la velocidad al final del canal vertical (cm/s), Fr es el factor de fricción, g es la aceleración de la gravedad (981 cm/s^2), H es la altura desde la cual inicia la caída el metal líquido (cm); H es para el caso de colado horizontal y es considerada igual a la altura de la mitad superior del molde, la cual debe corregirse de acuerdo con la siguiente ecuación (13, 32):

$$H' = H - (F^2 / 2C) \dots\dots(2)$$

Donde H' es la altura corregida (cm), H es la altura de la parte superior del molde hasta el punto de entrada del metal líquido a la cavidad (cm) y C es la altura de la pieza por encima del plano de partición (cm).

Después del cálculo de la velocidad se utiliza la ecuación que determina el flujo másico (FR), en la sección de interés (AR), dado por:

$$FR = (v \times AR \times \rho) / 1000 \dots\dots(3)$$

Donde FR es el flujo másico (Kg/s), v es la velocidad del flujo metálico (cm/s), AR es el área transversal más pequeña del sistema de colada (cm²) y ρ es la densidad de la aleación (g/cm³).

Para piezas coladas en molde de arena se recomiendan velocidades máximas de 150 cm/s (21, 27, 30), ya que velocidades mayores provocan erosión en el molde de arena.

A partir de la ecuación 3 se obtiene:

$$AR = 1000 PR / \gamma \times E \dots\dots(4)$$

Donde el área de control de flujo generalmente es el área superior de la bajada y a la cual llamaremos (A1) para estos sistemas de colada, esta sección es circular y en forma de cono truncado. La cantidad se determina por medio de la expresión:

$$Asb - Aib = M/H \dots\dots(5)$$

donde Asb es el área superior de la bajada (cm²), Aib es el área inferior a la bajada (cm²), h es la profundidad de la copa de colada (cm) y H es la altura de la metal superior del molde (cm). Para el cálculo en función del diámetro se utiliza la expresión:

$$Dsb - Dib = M/h \dots\dots(6)$$

donde Dsb es el diámetro superior de la bajada (cm) y Dib es el diámetro inferior de la bajada (cm).

Se recomienda colocar una extensión al final de la bajada con el objeto de evitar la turbulencia y erosión del molde, esta debe ser por lo menos 1.5 veces la altura del metal (21).

A partir de la relación de colada se determinan las dimensiones de los demás componentes, esta expresión relaciona entre el área de la bajada (Ab), el área transversal del conducto (Ac) y el área de la(s) entrada(s) (Ad). Se recomienda (13,25,27,28) para una variedad de relaciones de colada, entre las que figuran 1:1:1, 1:2:1, 1:1:1, 1:3:1, 1:1:4, 1:4:4, 1:1:2.

Para el caso de sistemas de colada con conductos y/o entradas múltiples, para evitar turbulencia en el flujo del metal líquido se recomienda (29):

- a) Un llenado total del sistema de colada mediante.
- b) Proveer una extensión a la bajada.

- c) Reducir la velocidad del flujo metálico en el corredor y
- d) Evitar la embudo en el molde.

CORREDOR(ES) O CANAL(ES).

Las dimensiones del corredor se calculan a partir de la relación de colada, para tal caso se sugiere (21) que la altura del corredor sea 1.5 veces su ancho, también se recomiendan extensiones al final del corredor de por lo menos 1.5 cm para piezas hasta de 200 lb y de 12 cm para piezas con pesos mayores a 200 lb (22). Es conveniente situar el corredor en la mitad inferior del molde y las entradas en la mitad superior.

Para el caso de sistemas con entradas múltiples unidas a uno o más corredores, se recomienda reducir el área transversal del corredor después de cada entrada, restando una cantidad igual al área de la(s) entrada(s) inmediata(s) anterior(es) adicionarle un 10% al área así calculada para mantener un flujo constante (21,26,30), todo esto es para lograr un flujo uniforme a través de todas las entradas.

ENTRADAS.

Estas dimensiones se calculan a partir de la relación de colada, se ha sugerido (21) que el ancho de la entrada sea por lo menos tres veces la altura, así mismo la longitud debe ser igual o mayor al ancho. La posición de la primera entrada debe situarse a una distancia igual o mayor a 3.75 cm de la bajada para el caso de piezas hasta de 200 lb con sistemas de colada no presurizados y con velocidades de llenado lentas.

Estos factores deben complementarse con los factores operativos, como son, los espacios disponibles en la cara de moldeo, el equipo de moldeo utilizado y el diseño particular de la pieza.

3) DISEÑO DE LA CÁMARA DE REACCIÓN.

Debido a que solo se tienen los experimentos realizados por García, Beltrán y Atlalenco (11), en aleaciones de aluminio, las consideraciones tomadas en cuenta para el diseño y ubicación de la cámara de reacción, son:

- 1.- Un flujo turbulento al inicio del llenado del sistema de colada para asegurar el mezclado y disolución homogénea del metalizador; esta debe situarse preferentemente en la parte inferior de la bajada aprovechando de esta manera la extensión de la bajada.
- 2.- La colocación de dispositivos para mejorar la eficiencia del proceso, por ejemplo, trampas de escoria, cámaras de mezclado, filtros cerámicos, etc.
- 3.- El uso de alimentadores abiertos y calientes, una buena cantidad de vientos para eliminar los gases generados por la descomposición de la sal.

Para el diseño de la cámara se consideró la expresión antes mencionada (16), que es:

$$SF = PR / CA$$

donde SF es el factor de disolución ($\text{Kg}/\text{cm}^2\text{s}$), PR es el flujo másico (Kg/s) y CA es el área de la cámara (cm^2). Los valores de SF reportados son de 0.06 a 0.06 (17) y de 0.06 a 0.065 (31) $\text{Kg}/\text{cm}^2\text{s}$.

3.2. CALCULO DE LA CAMARA DE REACCION Y SISTEMA DE COLADA.

Debido a que no existen valores reportados para el factor de disolución (SF), para el tratamiento de modificación de aleaciones Al-Si, que conducen al dimensionamiento de la cámara de reacción, se considero lo siguiente:

- El material utilizado como modificador posee una velocidad de disolución alta (se mezcla y disuelve al contacto con el flujo metálico).
- La formación de núcleos para iniciar la solidificación es instantánea.
- Como aproximación se utilizo un valor de SF de 0.06 a 0.065 (kg/cm²), ya que no existen valores reportados para el proceso de modificación de aleaciones Al-Si.

Se utilizó la expresión propuesta para el tratamiento en el molde de hierros nodulares en el cálculo de las dimensiones de la cámara de reacción para el tratamiento de modificación de aleaciones de Al-Si.

La cámara de reacción se ubico en la parte inferior de la bajada del sistema de colada.

Para este diseño, se partio de los sistemas de colada para piezas de aluminio solidificadas en molde de arena en verde. Para lograr una buen grado de modificación en la aleación, los puntos que se tomaron en cuenta fueron:

- a) Cálculo del flujo de colada PR, con la expresión:

$$PR = 1.25 \sqrt{HMM}$$

- b) Utilización de una bajada de geometría cónica para mejorar las condiciones de llenado inicial del molde.

c) La selección de la relación de colada 1:2:7, que corresponde a un sistema no presurizado (28).

d) El diseño de corredores rectangulares con relación alto/ ancho (D/W) igual a 1.5, colocados por abajo de la línea de partición (27,28).

e) El diseño de la reducción del corredor después de las dos primeras entradas para lograr un flujo constante.

f) El diseño de las entradas con relación ancho/alto (b/x) igual a 3, colocadas por encima del plano de partición.

g) El diseño de una cámara de mezclaado con área transversal (o lateral) similar a la cámara de disolución.

h) Las extensiones en el canal vertical y el corredor.

Los resultados de los cálculos se muestran a continuación:

Peso del metal en el molde. $MMW = 2.200 \text{ kg}$.

Espesor crítico, $ec = 1.25 \text{ cm}$.

Material: aleación Al-Si.

1.- Cálculo del flujo masico, PR.

$$PR = 1.25 \cdot MMW = 1249 \text{ g/s}$$

2.- Cálculo del área de control de flujo (área transversal inferior de la bajada).

$$AR = PR / Fr \cdot \rho \cdot \sqrt{2gH}$$

$$PR = 1249 \text{ g/s}, g = 981 \text{ cm/s}^2, Fr = 0.9, \rho = 2.7 \text{ g/cm}^3, H = 9.87 \text{ cm}$$

por tanto el área, $AR = 4.15 \text{ cm}^2$.

3.- Cálculo de las dimensiones del canal vertical o bajada.

Ya que en la bibliografía se recomienda establecer el área de control de flujo en la parte inferior del canal vertical y con una geometría de forma circular (27,28). $AR = A_{cc} = \pi \cdot (D/2)^2$ por lo

que, $D_{1b} = 2.7$ cm. Para lograr la conicidad recomendada se utiliza la expresion seis:

$$D_{2b} = D_{1b} + (h/H)D$$

En donde D_{2b} es el diametro superior de la bajada, D_{1b} es el diametro inferior de la bajada, H es la altura de la caja superior del molde (es decir 10.0 cm), h es la profundidad de la copa o tina de colada (que es de 3 cm), por lo tanto, $D_{2b} = 3.15$ cm.

4.- La seleccion de la relacion de colada.

La relacion de colada seleccionada para este calculo fue de 1:2:3 es decir:

$$A_c = 2 A_b$$

$$A_e = 3 A_b$$

5.- Calculo de las dimensiones del corredor.

Como es un solo corredor de seccion rectangular $A_c = 2 A_b$, con relacion alto ancho (D/W) igual a 1.5, por lo tanto el area transversal del corredor sera de 8.3 cm², las dimensiones del corredor fueron, $W = 2.25$ cm y $D = 3.5$ cm.

6.- Calculo de las dimensiones de las entradas.

Si el area total de las entradas es $A_e = 3 A_b$, que da un valor de 12.45 cm² y teniendo cuatro entradas, el area individual de cada entrada es de 3.11 cm², que considerando la relacion ancho/alto (t/x) igual a 3, se obtiene que, $x = 1$ cm y $t = 3$ cm.

7.- Calculo de la dimension del corredor despues de las primeras dos entradas (canal reducido).

Se parte de la expresion:

$$A_{cr} = (A_c - A_e) \times 1.1$$

donde A_{cr} es el área del canal reducido, A_e es el área en las entradas antes de la reducción, lo que da que A_{cr} sea 2.0 cm².

Debido a que no se recomienda variar el ancho, el valor original de W se conserva y la nueva altura (D'), se calcula en base al área del corredor reducido, ($A_{cr} = W \cdot D'$), obteniéndose $W = 2.05$ cm y $D' = 1.2$ cm.

B. - Cámara de reacción.

Para obtener las dimensiones de la cámara de reacción, se partió de la siguiente expresión (16), siendo x el cálculo una primera aproximación:

$$SF = PR / CA$$

donde SF es el factor de disolución y su valor va de 0.06 a 0.065 (kg/cm²s), PR es el flujo masico (kg/s) y CA es el área transversal (o lateral) de la cámara de reacción (cm²); de esta expresión se desconoce PR y CA , pero el valor de PR se puede calcular a partir de la expresión sugerida por la AFS, para piezas cortadas de aluminio espesor de 1/8" hasta de 1/4":

$$PR = 1.25 \cdot MMW$$

En donde PR es el flujo masico (kg/s) y MMW el peso del metal en el molde (kg); esta expresión es válida para piezas con espesores de 1/4" a 9/16" de in; por tanto, $PR = 1.25$ kg/s, de aquí que se puede calcular el área transversal de la cámara de reacción.

$$CA = PR / SF = 1.25 \text{ Kg/s} / 0.065 \text{ (kg/cm}^2\text{s)} = 19.23 \text{ cm}^2$$

Se recomienda (21,26,30) para la extensión del canal vertical, una profundidad de 1.5 veces la altura del molde, es decir, $1.5 \cdot D = 1.8$ cm, obteniéndose un valor de 1.0 cm para FE , el diámetro DE es 1.5 veces el ancho del corredor, es decir, $1.5 \cdot W = 3.08$ cm

obteniéndose un valor de 6.63 cm para DE. Estas dos dimensiones nos dan un área de 18.4 cm², este área es muy similar a la calculada anteriormente que es de 19.23 cm². Por tanto las dimensiones pueden ajustarse a 19.23 cm², es decir:

$$Acr = (PE)(D)$$

si D es igual a 3.5 cm, la nueva profundidad de la cámara será de 5.5 cm.

9.- Cámara de disolución.

Se llama así al accesorio colocado después de la cámara de mezclado y cuyas dimensiones son similares a las de esta. Seguida por una reducción en el corredor, similar al área de control de flujo.

El objeto de este accesorio es terminar de promover un mezclado homogéneo y la disolución completa del material modificador con el metal líquido durante el llenado del molde, además es servir como una trampa de escoria.

10.- Accesorios.

Dentro de este punto se comprende la extensión de la bajada, la cual se utilizó como cámara de mezclado, una extensión en el corredor o trampa de escoria, la cual debe tener por lo menos una longitud de 3.8 cm (21,27,28). Para este caso la longitud fue de 3 cm, debido a las limitaciones de espacio en la caja de moldeo.

11.- Distancia entre la bajada a la primera entrada(s).

Se recomienda (21,25,27,28) una distancia mínima de 3.8 cm para facilitar la eliminación de posibles arrastres de escoria en el flujo metálico, que para éste caso fue una distancia de 15 cm.

Después de la sección de salida de la cámara, la distancia a es de 5 cm. En la fig. D.2.1. se muestra un esquema con las dimensiones finales del modelo que se utilizó durante éste trabajo.

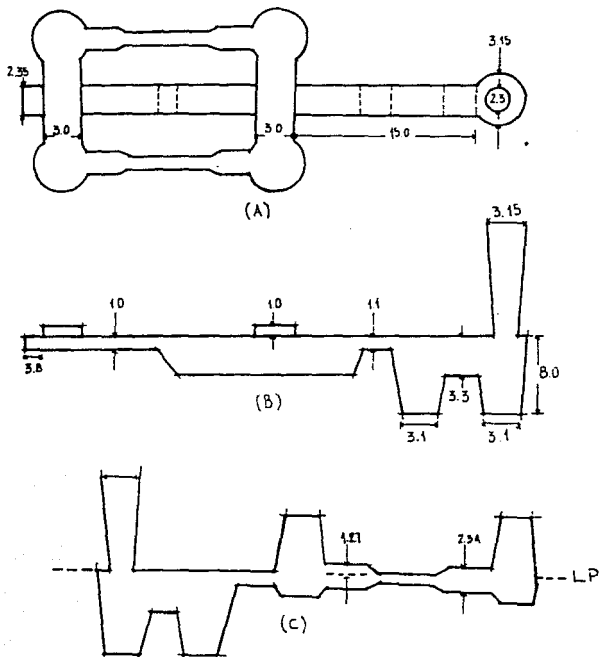


FIGURA 3.2.1 SISTEMA DE COLADA.
 A) VISTA SUPERIOR DEL SISTEMA DE COLADA
 B) DETALLE DEL SISTEMA DE COLADA
 C) DETALLE DE LA PROBETA DE PROEBA

CAPITULO IV.

4.1 Diseño del experimento.

Se comparará el tratamiento de modificación, mediante dos procesos: uno es el proceso de tratamiento en la olla y el otro es el proceso de tratamiento en el molde (método propuesto).

El experimento quedo diseñado como sigue: Se utilizo una aleación ASM 443 o SAE 35 a la cual una vez fundida, se le adiciono una cantidad de sal modificadora, una a base de sales de sodio y otra a base de estroncio, separadamente. Las cantidades adicionadas al baño líquido fueron: 0.45, 0.80, 0.75 y 0.90% en peso primero con la sal a base de sodio, despues con la base estroncio adicionando 0.1, 0.2 y 0.3% en peso.

Las piezas de prueba obtenidas, fueron solidificadas en un molde de arena y posteriormente se realizo una evaluación por medio de:

- 1.- Análisis metalográfico, con el cual se evaluo el porcentaje de porosidad y el grado de modificación.
- 2.- Análisis químico, para obtener el porcentaje de sodio o estroncio residual y el porcentaje de recuperación.
- 3.- Ensayo de tracción, para obtener la resistencia a la tracción y el porcentaje de elongación.

A.1.1 EQUIPO

El equipo que se utilizó para el desarrollo experimental se presenta a continuación.

Preparación de la arena de ceno.

- a.- Balanza granataria OIKEN de capacidad hasta 10 kg.
- b.- Molino chileno SIEMENS con una capacidad de 3 kg.

Para las pruebas de arena.

- c.- Durometro marca Dietert.
- d.- Máquina universal Dietert.
- e.- Permeámetro.
- f.- Speedy (medidor de humedad).

Preparación de la arena de relleno.

- g.- Molino chileno SIEMENS de capacidad 100 kg.

Fabricación del molde.

- h.- Cajas metálicas de dimensiones 45 x 45 x 11 cm.
- i.- Moldeadora de banco, tamaño 14" tipo LB30.

Fusión.

- j.- Horno de crisol.
- k.- Crisol de carburo de silicio.
- l.- Termopar (cromel-alumel) tipo "E".

Metalografía y ensayo de tracción.

- m.- Analizador de imágenes OMNIMET.
- n.- Máquina de tracción MOHR FEISCHAFF de capacidad de 1.000 a 20.000 Ksi (libras).
- o.- Microscopio metalográfico OLIMPUS.
- p.- Microscopio electrónico de barrido JEOL - JSM 1001.

4.1.2. MATERIALES

La aleación utilizada tiene la siguiente composición: Al=94%, Si=5.01%, Cu=0.20%, Fe=0.027%, Mn=0.015% y Mg=0.09%. Este análisis se obtuvo en el laboratorio de análisis por vía húmeda del Departamento de Ingeniería Química Metalúrgica (UNAM).

Los reactivos modificadores usados fueron:

Sal base estroncio, cloruro de estroncio (SrCl₂).

Sal base sodio: Nucleant 263 (FOSECO), con un porcentaje de sodio de 47%.

Para la desoxidación del metal líquido se utilizaron pastillas desgasar 200 (FOSECO).

4.2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

4.2.1 Elaboración del molde.

La preparación de la arena se realizó utilizando arena sílica (F1250-RO), con 5% de bentonita sódica, 5% de bentonita cálcica y 5% de humedad.

La fabricación del molde se llevo a cabo mediante la técnica de *colada horizontal*.

4.2.2 Técnica de fusión.

Proceso de modificación en la olla.

1. Limpieza de la carga (eliminación de la arena adherida).
2. Pre calentamiento del horno.
3. Pre calentamiento de la carga.
4. Una vez pre calentados, adición de la carga al crisol.

5) Elevar la temperatura con la carga dentro del crisol, hasta la temperatura de trabajo en el rango deseado.

6) Fusión completa.

7) Desgasificación del baño líquido.

8) Desoxidación.

9) Tratamiento de modificación (en la olla).

10) Desoxidación.

11) Vaciado al molde.

Proceso de modificación en el molde.

1) Limpieza de la carga (eliminando la arena adherida).

2) Pre calentamiento del horno.

3) Pre calentamiento de la carga.

4) Una vez pre calentados, adición de la carga al crisol.

5) Elevar la temperatura con la carga dentro del crisol hasta la temperatura de trabajo en el rango deseado.

6) Fusión completa.

7) Desgasificación.

8) Desoxidación.

9) Vaciado al molde (el molde contiene el material modificador).

4.2.3 Evaluación de las piezas de pruebas.

- Análisis metalográfico. Este se efectuó haciendo un seguimiento en la pieza obtenida, tomando muestras en los puntos que se indican en la fig. 4.1.

Para la preparación metalográfica se siguió el procedimiento general en una muestra metalográficamente preparada, esto es, con de

muestra, lijar, y pulir en paño. Se utilizó persulfato de amonio en el agua para evitar la oxidación de la superficie pulida.

De esta forma se pudo evaluar el grado de modificación por comparación con estructuras reportadas en la bibliografía (35), ver fig. 1.3.1; con siete niveles que son: a) Sin modificar, b) Mal modificada, c) Ligeramente modificada, d) Suficientemente modificada, e) Bien modificada, f) Super modificada y g) Sobremodificada.

La porosidad se determinó mediante un analizador de imágenes, determinando el porcentaje de área ocupada por los poros.

- Análisis químico. Este se obtuvo para determinar el porcentaje de sodio y estroncio residual; efectuándose en el laboratorio de análisis por vía húmeda del Departamento de Ingeniería Metalúrgica.

- Ensayo de tracción. Para determinar la resistencia a la tracción y el porcentaje de elongación.

- Se tomaron fotografías de todas las probetas a 200 y 800 aumentos con microscopio metalográfico y a 1500 y 5400 aumentos con microscopio electrónico de barrido.

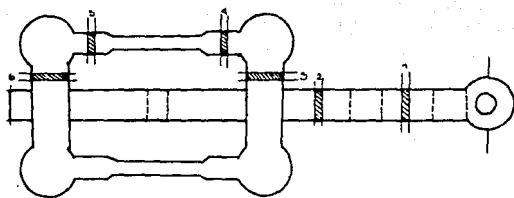


FIGURA 4.1 SEGUIMIENTO DEL MUESTRO PARA EL ANALISIS METALOGRAFICO.

CAPITULO V

RESULTADOS Y SU DISCUSION.

A continuación se exponen y discuten los resultados obtenidos en los tratamientos de modificación de la aleación Al-Si (ASM 443 o SAE 2017). Los resultados del análisis químico, de los ensayos de tracción y del análisis metalográfico, se presentan en las tablas 5.1, 5.2 y 5.3 respectivamente.

Muestra sin modificar. Como se puede observar en las microfotografías 1 a 4, la aleación presenta una estructura de placas largas en forma acicular, típica del eutéctico de las aleaciones Al-Si sin modificar; sus valores de resistencia a la tracción y porcentaje de elongación se presentan en la tabla 6.2.

TRATAMIENTO EN LA OLLA.

Sal base sodio. Para el tratamiento en la olla, las cantidades de sal adicionada fueron: 0.45, 0.60, 0.75 y 0.90 por peso. Los valores del porcentaje de sodio recuperado fueron muy similares para todas las cantidades de sal adicionada; la resistencia a la tracción y el porcentaje de elongación aumentaron con respecto a la muestra sin modificar, los valores cambiaron desde 15.3 ksi hasta 17.4 ksi y de 5.2% a 10.3% respectivamente; conjuntamente con el aumento de la resistencia a la tracción y el porcentaje de elongación, se dio un cambio en la morfología de la estructura, es decir, el grado de modificación varió de una estructura mal modificada a una estructura sobremodificada, esto se puede observar en las microfotografías 5 a 8.

TRATAMIENTO EN EL MOLDE.

Para el caso del tratamiento en el molde, las cantidades de sal adicionadas fueron: 0.45, 0.60 y 0.75 por peso. Para el caso de los porcentajes de sodio recuperado se presentan diferentes valores que

para el caso del tratamiento en la olla. Los valores de resistencia a la tracción y porcentaje de elongación aumentaron con respecto a la muestra sin modificar, los valores cambiaron desde 17.7 ksi hasta 17.7 ksi y de 2.0% a 8.9% respectivamente. El grado de modificación que se obtuvo con este proceso hizo que la estructura cambiara desde ligeramente modificada hasta supermodificada.

De los resultados obtenidos para cada proceso se observa que estos son muy semejantes y solo se obtuvieron ligeras diferencias en el porcentaje de sodio recuperado y en el porcentaje de porosidad. Aunque fue ligera la diferencia en el porcentaje de sodio recuperado, esta se no reflejada en las estructuras obtenidas. Se deduce, un grado de modificación mayor para el proceso de tratamiento en el molde que para el tratamiento en la olla, utilizando la misma cantidad de sal. El porcentaje ligeramente mayor de porosidad para el tratamiento en el molde se debe principalmente a que la descomposición de la sal modificadora genera gases.

Por lo anterior se puede decir, que por medio del proceso de tratamiento en el molde, no se obtiene una resistencia a la tracción y un porcentaje de elongación mayores que los obtenidos por el proceso de tratamiento en la olla; pero el proceso de tratamiento en el molde, ofrece los ventajas de un ahorro en tiempo, debido a que el tratamiento se realice directamente en cada molde, lo que significa una simplificación del proceso.

PROCESO EN LA OLLA.

Muestra 1, modificada con 0.45% de sal. En esta muestra se puede observar una estructura mal modificada (fotografías 5 a 8), pues aún no se alcanza el porcentaje de sodio residual recomendado (1.6, 8.10, 21.9) en peso de 1.00% a 0.30% en peso.

Muestra 2, modificada con 0.60% de sal. Esta muestra se observa suficientemente modificada (fotografías 9 a 12), de tal modo que aun no se alcanza el porcentaje de sodio residual recomendado. Esta muestra presenta el mayor porcentaje de porosidad, el cual se debió a un mal tratamiento de desgasificación.

Muestra 3, modificada con 0.75% de sal. En esta muestra se observa una estructura bien modificada (fotografías 13 a 16). El porcentaje de sodio residual ya está dentro del rango recomendado (ver tabla 6.11); en esta muestra se obtuvo el valor máximo de resistencia a la tracción.

Muestra 4, modificada con 0.90% de sal. Esta muestra presenta una estructura en la que se puede observar zonas donde ya se está iniciando la sobrecocción (coalescencia de los globulos), y aunque la resistencia a la tracción disminuye, el porcentaje de elongación aumentó y fue el valor máximo obtenido.

PROCESO EN EL MOLDE.

Muestra 5, modificada con 0.45% de sal. La estructura se observa ligeramente modificada, es decir, un grado de modificación menor que el obtenido con el tratamiento en la olla (fotografías 21 a 24). El porcentaje de sodio residual obtenido está dentro del rango recomendado (4.6, 8, 10, 12), que es de 1.12% a 0.03% en peso.

Muestra 6, modificada con 0.60% de sal. La estructura se observa bien modificada (fotografías 25 a 28) para el porcentaje de sodio residual ya está dentro del rango recomendado. Se logró una buena modificación mayor que el obtenido con el tratamiento en la olla y también se obtuvo el porcentaje mínimo de porosidad.

Muestra 7, modificada con 0.75% de sal. La estructura se observa supermodificada en algunas zonas (fotografías 29 a 32), esto

concuenda bien con el porcentaje de sodio residual, pues éste ya está cerca del límite superior recomendado.

Muestra modificada con sal base estroncio. Para esta muestra el tratamiento de modificación se hizo en la olla antes de poner la sal con el tratamiento en el molde. No se obtuvo cambio alguno en la estructura, esto se debió a que no se logra disolver la sal por su alto punto de fusión (870 °C). Las cantidades de sal adicionada fueron: 0.1, 0.2 y 0.3% en peso, dándoles 5, 15 y 30 minutos de permanencia a la sal dentro del baño líquido. (fotografías 30 a 32)

Tabla 6.1. Resultados del análisis químico

A N A L I S I S Q U I M I C O

PROCESO EN LA OLLA

<u>% en peso</u> <u>Sal adicionada</u>	<u>% en peso</u> <u>Na adicionada</u>	<u>% en peso</u> <u>Na residual</u>	<u>% en peso</u> <u>Na recuperado</u>
0.45	0.193	0.0102	5.27
0.60	0.258	0.0149	5.77
0.75	0.322	0.0215	6.67
0.90	0.387	0.0435	11.24

PROCESO EN EL MOLDE

0.45	0.193	0.0122	6.30
0.60	0.258	0.0246	9.53
0.75	0.322	0.0282	8.75

El porcentaje de Na en la sal modificadora es 43% en peso.

NOTA:

	P. Olla	P. Molde
Temp. de desgasificación	730 ± 5°C	730 ± 5°C
Temp. para la modificación	710 ± 5°C	710 ± 5°C
Temperatura de colada	700 ± 5°C	710 ± 5°C

Tabla 6.2. Resultados del ensayo de tracción.

ENSAYO DE TRACCION

PROCESO EN LA OLLA

<u>% en peso Sal adicionada</u>	<u>Resistencia a la tracción (Ksi) (MPa)</u>		<u>Elongación (%)</u>
---	13.36 *	92.15 *	5.2 *
0.45	15.20	104.5	7.8
0.60	15.80	116.2	7.9
0.75	17.40	120.0	8.5
0.90	16.80	115.0	10.3

PROCESO EN EL MOLDE

0.45	15.10	104.1	7.8
0.60	17.40	120.0	8.7
0.75	17.78	122.3	8.9

* Muestra sin modificar.

Tabla 6.3. Resultados del análisis metalográfico.

ANÁLISIS METALOGRAFICO

PROCESO EN LA OLLA

<u>% en peso Sal adicionada</u>	<u>Porosidad (%)</u>	<u>Grado de modificación (*)</u>	<u>Fotografías</u>
—	0.90	Sin modificar	1, 2, 3, 4
0.45	0.50	Mal modificada	5, 6, 7, 8
0.60	4.82	Suficientemente modificada	9, 10, 11, 12
0.75	2.54	Bien modificada	13, 14, 15, 16
0.90	1.59	Sobre modificada	17, 18, 19, 20

PROCESO EN EL MOLDE

0.45	3.01	Ligeramente modificada	21, 22, 23, 24
0.60	4.19	Bien modificada	25, 26, 27, 28
0.75	3.57	Super modificada	29, 30, 31, 32

* El grado de modificación se evaluó por comparación de acuerdo a la Tabla 1.3.1. (35).

CAPITULO VI

CONCLUSIONES y OBSERVACIONES.

1.- Se obtuvieron valores de resistencia a la tracción y porcentajes de elongación semejantes para ambos procesos y sólo los porcentajes de recuperación del elemento modificador y la porosidad son ligeramente mayores para el proceso de tratamiento en el molde.

2.- Las estructuras bien modificadas se obtuvieron con 0.20% en peso de sal, utilizando el proceso de tratamiento en la olla y con 0.75% en peso de sal, utilizando el proceso de tratamiento en el molde.

3.- El proceso de tratamiento en el molde ofrece un ahorro en tiempo debido a que no se necesita realizar el tratamiento en la olla, pues se vacía directamente a los moldes, asegurando la misma cantidad de modificador en cada pieza (es decir, que es un proceso reproducible).

4.- Para poder utilizar el proceso de tratamiento en el molde es necesario diseñar un sistema de colada para cada pieza diferente.

5.- El proceso de tratamiento en el molde permite un control menos estricto de las variables operativas: a) Temperatura de tratamiento y b) Temperatura de colada.

6.- No se obtuvieron cambios en la estructura al realizar el tratamiento de modificación con la sal base estroncio, debido a su alto punto de fusión.

7.- En base a los resultados que se han mostrado en este trabajo, el proceso de tratamiento de modificación en el molde es un proceso factible de aplicación industrial.

OBSERVACIONES.

1.- Se recomienda realizar estudios para disminuir el porcentaje de porosidad en el proceso de tratamiento en el molde o probar otro tipo de sales modificadoras o aleaciones maestras que generen menor cantidad de gases.

2.- Se recomienda hacer un estudio similar pero con cantidades intermedias a las utilizadas en este estudio, para observar los cambios en el grado de modificación y poder obtener el grado deseado en resistencia a la tracción y el porcentaje de elongación.

3.- Se recomienda un estudio para determinar el factor de disolución (SF) en materiales modificados en sus diferentes formas de presentación, es decir, sales en forma de polvo o comprimidos o aleaciones maestras en forma granulada o sólida.

4.- Se recomienda un análisis químico y metalográfico más minucioso por zonas en el material solidificado para verificar la homogeneidad del metalado, la integración del material modificador al flujo metálico y, la homogeneidad en el tratamiento de modificación.

AP É N D I C E.

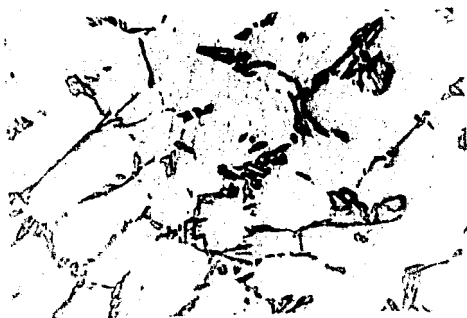


FOTO 1. MUESTRA SIN MODIFICAR 200X

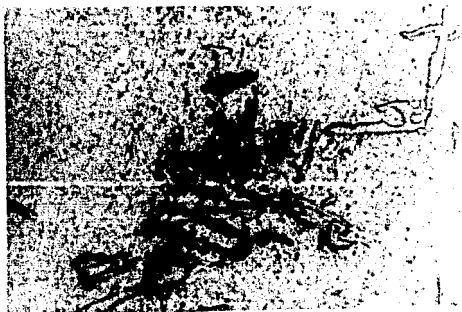


FOTO 2. MUESTRA SIN MODIFICAR 800X



FOTO 5. MUESTRA SIN MODIFICAR 1500X



FOTO 4. MUESTRA SIN MODIFICAR 5400X

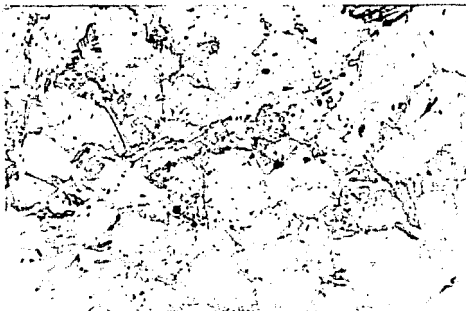


FOTO 5. 0.5% SAL BASE SODIO 200X
PROCESO EN LA OLLA



FOTO 6. 0.45% SAL BASE SODIO 800X
PROCESO EN LA OLLA.



FOTO 7. 0.45% SAL BASAL SODIO 1500X
PROCESO EN LA OLLA



FOTO 8. 0.45% SAL BASE SODIO 5400X
PROCESO EN LA OLLA

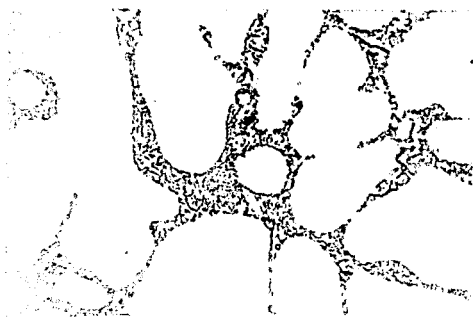


FOTO 9. 0.60% SAL BASE SODIO 200X
PROCESO EN LA OLLA



FOTO 10. 0.60% SAL BASE SODIO 800X
PROCESO EN LA OLLA

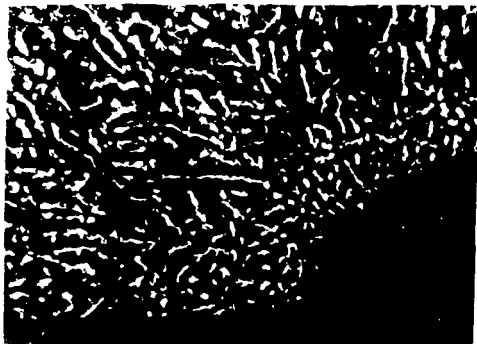


FOTO 11. 0.60% SAL BASE SODIO 1500X
PROCESO EN LA OLLA

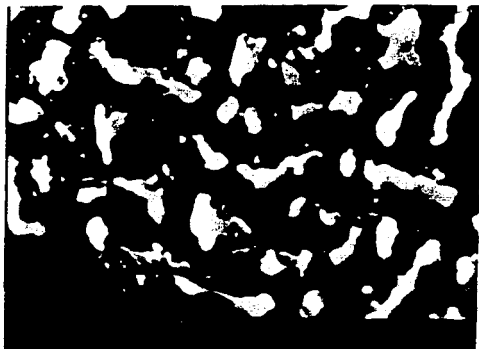


FOTO 12. 0.60% SAL BASE SODIO 5400X
PROCESO EN LA OLLA

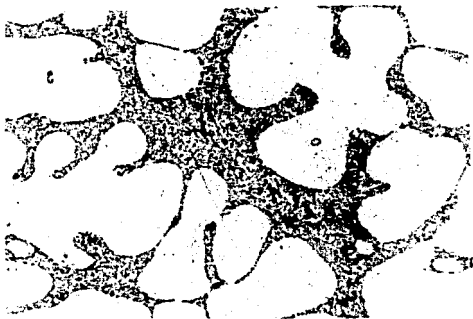


FOTO 13. 0.75% SAL BASE SODIO 200X
PROCESO EN LA OLLA

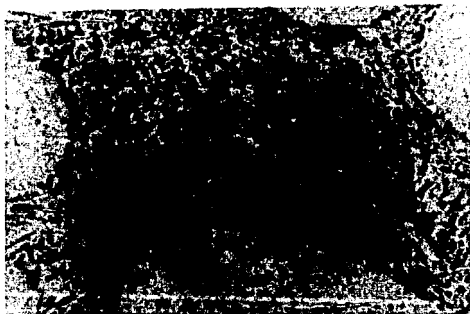


FOTO 14. 0.75% SAL BASE SODIO 800X
PROCESO EN LA OLLA



FOTO 15. 0.75% SAL BASE SODIO 1500X
PROCESO EN LA OLLA

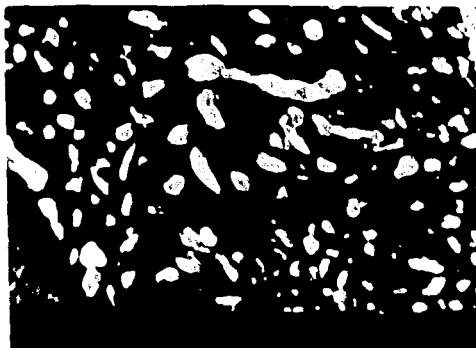


FOTO 16. 0.75% SAL BASE SODIO 5400X
PROCESO EN LA OLLA

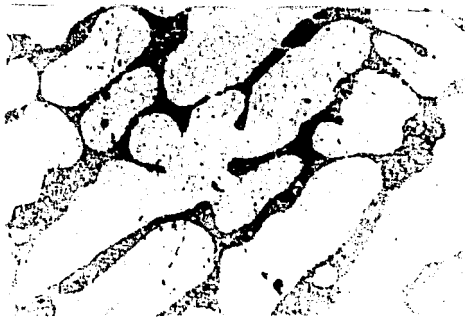


FOTO 17. 0.90% SAL BASE SODIO 200X
PROCESO EN LA OLLA

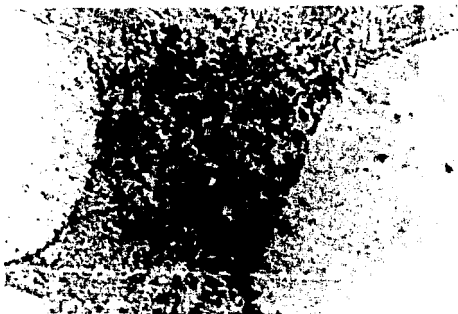


FOTO 18. 0.90% SAL BASE SODIO 800X
PROCESO EN LA OLLA

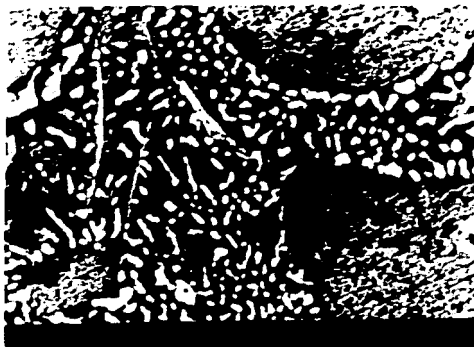


FOTO 19. 0.90% SAL BASE SODIO 1500X
METODO EN LA OLLA

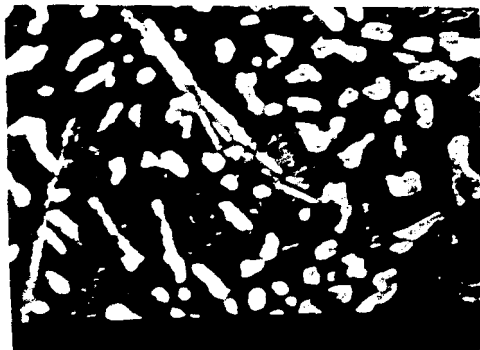


FOTO 20. 0.90% SAL BASE SODIO 3600X
METODO EN LA OLLA



FOTO 21. 0.45% SAL BASE SODIO 200X
PROCESO EN EL MOLDE

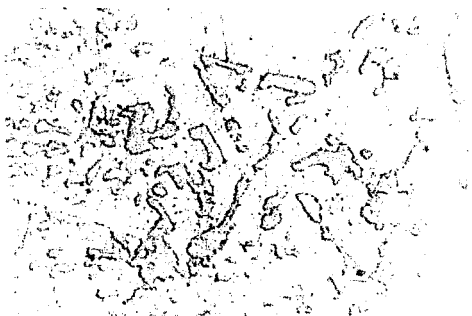


FOTO 22. 0.45% SAL BASE SODIO 800X
PROCESO EN EL MOLDE

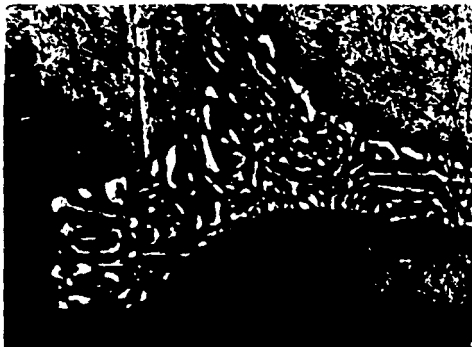


FOTO 23. 0.45% SAL BASE SODIO 1500X
PROCESO EN EL MOLDE



FOTO 24. 0.45% SAL BASE SODIO 5400X
PROCESO EN EL MOLDE



FOTO 25. 0.60% SAL BASE SODIO
PROCESO EN EL MOLDE 200X

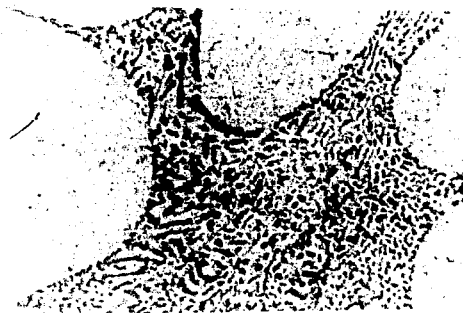


FOTO 26. 0.60% SAL BASE SODIO
PROCESO EN EL MOLDE 800X

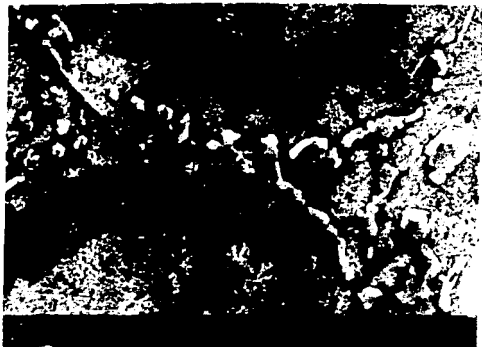


FOTO 27. 0.60% SAL BASE SODIO 1500X
PROCESO EN EL MOLDE

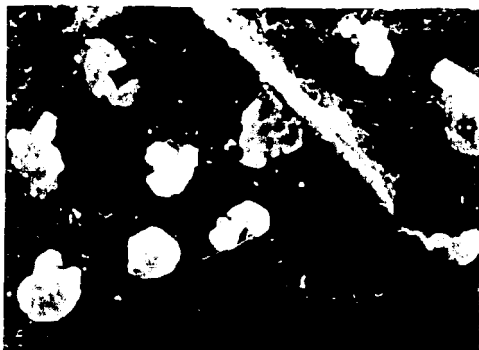


FOTO 28. 0.60% SAL BASE SODIO 5400X
PROCESO EN EL MOLDE

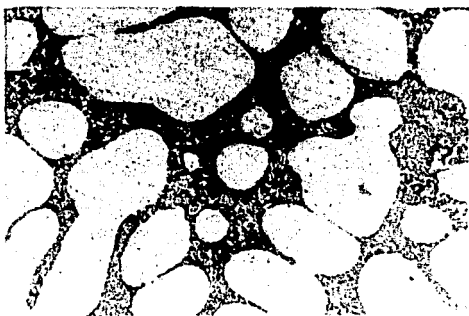


FOTO 29. 0.75% SAL BASE SODIO 200X
PROCESO EN EL MOLDE



FOTO 30. 0.75% SAL BASE SODIO 800X
PROCESO EN EL MOLDE



FOTO 31. 0.75% SAL BASE SODIO 1500X
PROCESO EN EL MOLDE

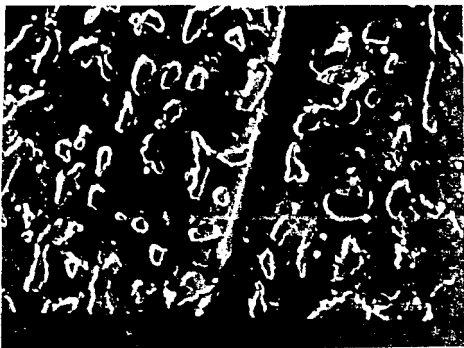


FOTO 32. 0.75% SAL BASE SODIO 5400X
PROCESO EN EL MOLDE

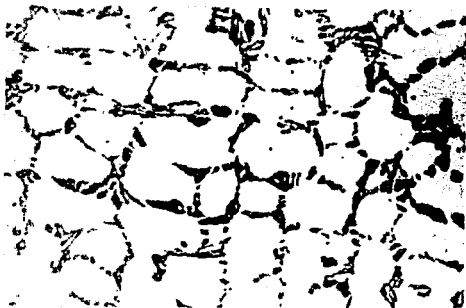


FOTO 33. 0.1% SAL BASE ESTRONCIO
200X

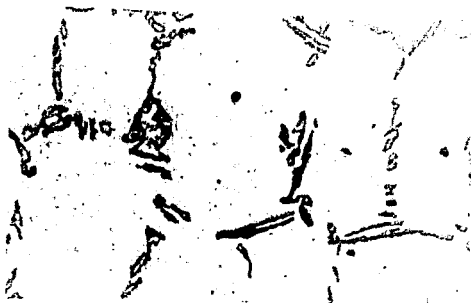


FOTO 34. 0.2% SAL BASE ESTRONCIO
400X

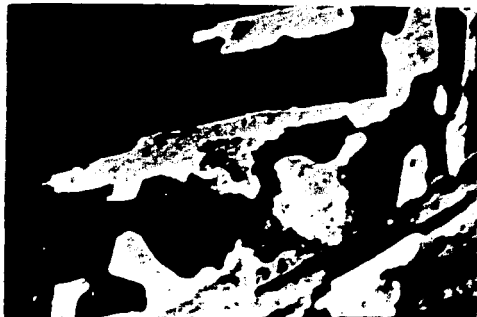
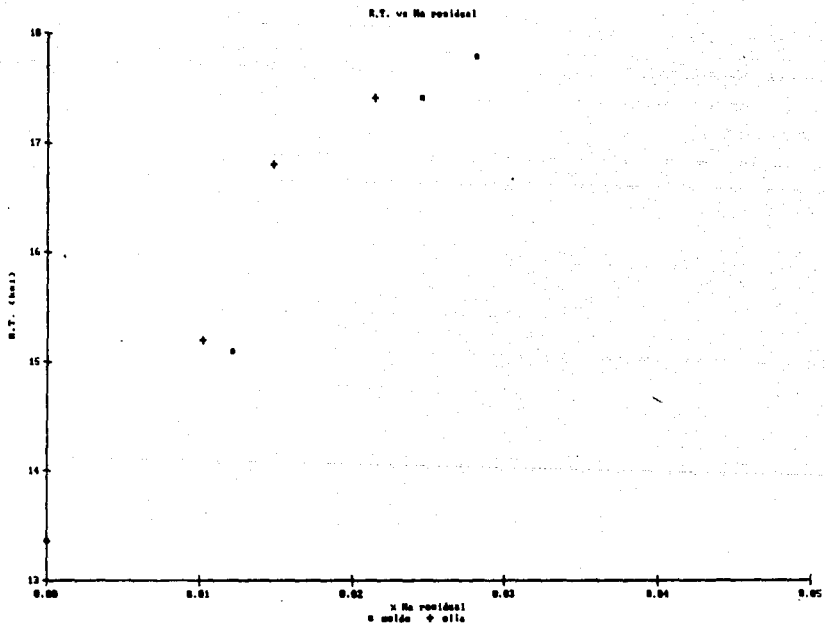
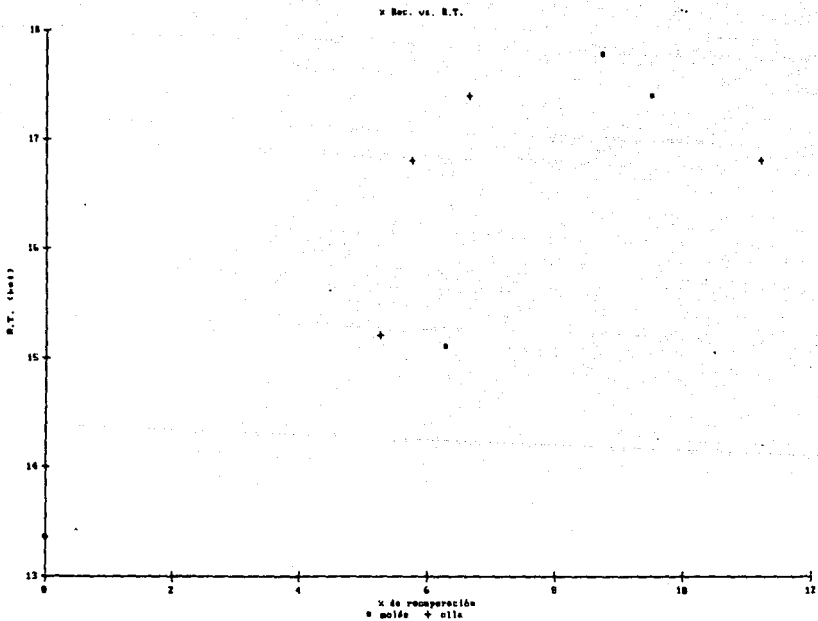


FOTO 35. 0.1% SAL BASE ESTRONCIO
3600X

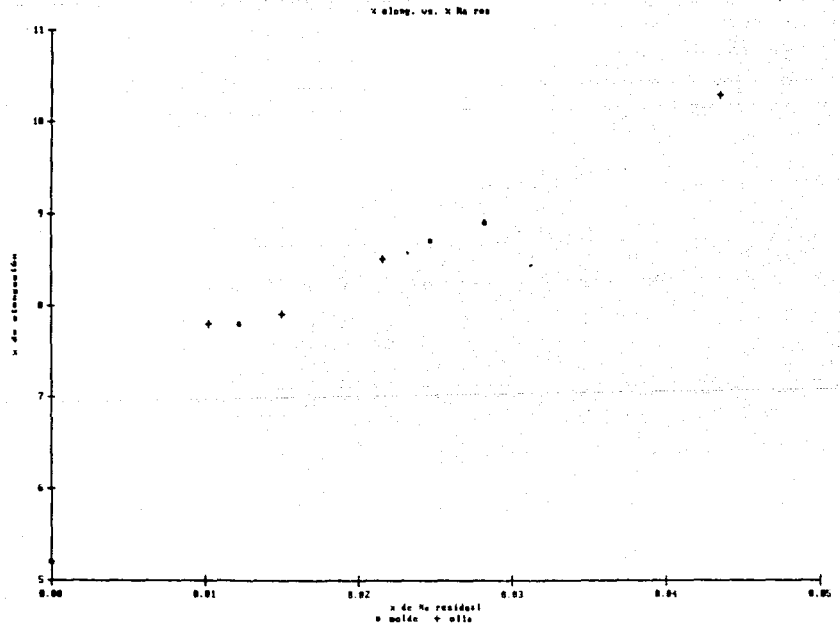
GRÁFICAS

pel. no. 73





№ 14111-75



B I B L I O G R A F I A.

- 1.- J. Frillev, Rev.Met. Vol. 9, 1911, pag.457.
- 2.- A. Pacc, U.S. Patent No. 1,787,900.
- 3.- Kim and Heine, "Fundamentos de modificación en el sistema Al-Si". Journal of the Institute of Metals. Vol. 92, 1954, pag.367ss.
- 4.- D. Apelian, J.J. Cheng, "Al-Si Processing variables: Effect on grain refinement and eutectic modification". A F S Transactions, 1986, pag.797ss.
- 5.- H. Isakler, W. Hammersted, E. Wieting, R. Das Gupta, "Analysis of modified 719 aluminium alloys". A F S Transactions, 1988, pag. 1.
- 6.- R. Das Gupta, D.B. Brown, S. Thier, "Analysis of overmodified 700 aluminium alloys". A F S Transactions, 1988, pag.197ss.
- 7.- "Assesment of grain refinement and modification of Al-Si foundry alloys by thermal analysis". A F S Transactions, 1984, pag.297ss.
- 8.- Davara and Chafelehbasni, "Strontium as a modifying agent of Al-Si eutectic alloys". The British Foundryman, Vol. 70, 1978, pag.4-7.
- 9.- T.J. Hurley, G.B. Atkinson, "Effects of modification practice aluminium A-356 alloys". A F S Transactions, 1985, pag. 147ss.
- 10.- G.K. Sigworth, "Theoretical and practical aspects of modification of Al-Si alloys". A F S transactions, 1985, pag.291ss.
- 11.- J.A. Garcia, E.L. Atlatenco, I. Eulimar, "Modificación en el molde de una aleación Al-SiSi". Moldes y fundición, 47 número 1989.
- 12.- "Aluminium casting technology". A F S, 1980, pag.29ss.
- 13.- T.V. Stepany, "Tecnología de procesos de fundición" Editorial MIR, 1981, pag.757-798.

- 14.- W.W. Holden, C.M. Dunis. "The practical application and economics aspects of the in-mold process in U.S.". The british foundryman, Vol 73, 1980, pag. 265-68.
- 15.- R. Siller. "In-mould nodulization with delayed pouring in vertically parted moulds". A F S Transactions, Vol. 87, 1977.
- 16.- T.E. Prucha. "Gating for the in-mold process". Modern Casting, 1982, pag. 38-42.
- 17.- R. Medina and Coll. "Use of solid inserts of spheroidizing alloys for production of in-mold ductile iron casting". A F S Transactions, Vol. 87, 1979, pag. 349-358.
- 18.- INCO Ruanda cont. The iron worker, spring, 1961.
- 19.- C.E. Dreemann. "Next alloys for making ductile iron in the moulds". A F S Transactions, 1970.
- 20.- M.M. Shea, S.I. Holtan. "In the mould treatment using elemental Mg to produce ductile iron". A F S Transactions, Vol. 86, 1978, pag. 17-22.
- 21.- I.B. Latimer and P.J. Reed. "A review of the running and gating and feeding of aluminium sand casting". The British foundryman, 25-2, 1975, pag. 44-50.
- 22.- A F S. "Ductile iron molten metal processing", 1971, pag. 188.
- 23.- G. Minnon and C.M. Dunis. "Experience of production of mechanite nodular iron castings with the in-mold process". Foundry trade journal, Vol. 107, 1974, pag. 139-147.
- 24.- "In-mold process installation manual". Materials and methods, LTD, Raig, Madrid, 1974.
- 25.- P.R. Beeley. Foundry technology, Butter worths, 1980.

- 26.- M. Jeandreas. "Le moulage des éprouvets de moule ensemble".
 DTIF, Editions technique des Industries de la Fonderie, Paris, 1968.
- 27.- "Enciclopedia del aluminio". URMO, Vol. 4, 1974.
- 28.- "Gating and risering work-sheet". A F S Transactions.
- 29.- R.W. Hume, R. Loper, R.C. Rosenthal. "Principles of metal casting". McGraw-Hill, Bo. Co. Div. 1967.
- 30.- P. Saru, L. Chaze, R. Chausat. "Détermination des systems de moulage et d'attaque des piéces moulés en sable". Fonderie 198, 1970, pag. 258a.
- 31.- Mitsunobu and Coll. "Solidification studies of spitting and large-small module formation in ductile cast iron produce by the inmol process". A F S Transactions, 1985, pag. 22-25a.
- 32.- Gating and risering. A F S Course No. 7-250.
- 33.- R.C. Hume, W. Loper and H. Rosenthal. "Tensile properties of Al-Si-Mg alloys and the effects of sodium modification". A F S Transactions, Vol 84, 1956, pag. 47-51.
- 34.- F.J. Hiesling and J.F. Wallace. "Refinement of aluminium-silicon alloys". Foundry, Vol. 81, 1960, 74-79.
- 35.- David, P. Smith. "Processing molten aluminium. Part 1, understanding silicon modification". Modern casting, Vol. 80, No 1, January 1991.