



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

---

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**ESTUDIO DE LA DEMANDA DE Sr (Estroncio) COMO  
MODIFICADOR EN ALEACIONES**

**Al-Si HIPOEUTÉCTICAS Y EUTÉCTICA**

**TESIS**

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

**PRESENTA**

**JOSÉ ANTONIO MEJÍA PACHECO**



**CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX 2016**

JURADO ASIGNADO

PRESIDENTE: EUSEBIO CANDIDO ATLATENCO TLAPANCO

VOCAL: JOSÉ ALEJANDRO GARCÍA HINOJOSA

SECRETARIO: ADRIÁN MANUEL AMARO VILLEDA

1ER. SUPLENTE: LUIS DARÍO ESCOBAR MEJÍA

2DO. SUPLENTE: AGUSTÍN GERARDO RUIZ TAMAYO

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA: FACULTAD DE QUÍMICA.  
EDIFICIO D. DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA, UNAM.

ASESOR DEL TEMA:

JOSÉ ALEJANDRO GARCÍA HINOJOSA \_\_\_\_\_

SUSTENTANTE:

MEJÍA PACHECO JOSÉ ANTONIO \_\_\_\_\_

ÍNDICE	
INTRODUCCIÓN	4
JUSTIFICACIÓN	4
OBJETIVOS	5
HIPÓTESIS	5
1.-ANTECEDENTES Y FUNDAMENTOS	6
1.1 EL ALUMINIO	6
1.2 CLASIFICACIÓN DE LAS ALEACIONES BASE ALUMINIO	7
1.3 ALEACIONES Al-Si	8
1.4 ALEACIONES Al-Si HIPOEUTÉCTICAS	8
1.5 TRATAMIENTO DE MODIFICACIÓN	12
1.6 TEORÍAS DE MECANISMOS DE MODIFICACIÓN	14
1.7 VARIABLES QUE AFECTAN LA MODIFICACIÓN	16
1.8 ANÁLISIS TÉRMICO	20
2.- DESARROLLO EXPERIMENTAL Y RESULTADOS	26
2.1 Composición química y análisis metalográfico	30
2.2 Análisis térmico	41
3.- DISCUSIÓN DE RESULTADOS	46
4.- CONCLUSIONES	48

## REFERENCIAS

## ANEXO I

Tabla Patrón Modificación AFS

## ● INTRODUCCIÓN

La combinación única de propiedades que presentan el aluminio y sus aleaciones, hacen de este material uno de los más versátiles, económicos y atractivos para una amplia gama de usos y aplicaciones; desde la fabricación de papel de aluminio para embalajes y uso doméstico como planchas domésticas y utensilios de cocina hasta aplicaciones de ingeniería más exigentes como:

- Fuselajes de aeronaves.
- Bombas de gasolina
- Carburadores
- Transmisiones automáticas
- Partes de sistemas de irrigación
- Piezas resistentes a la corrosión y altas presiones.

“Las aleaciones de aluminio ocupan el segundo lugar (con respecto a los aceros) en los materiales que se utilizan con fines estructurales. Tienen una densidad de sólo  $2,7 \text{ g/cm}^3$  (aproximadamente un tercio del acero ( $7,83 \text{ g/cm}^3$  )); un pie cúbico de acero pesa alrededor de 490 libras (222 Kg); un pie cúbico de aluminio, sólo alrededor de 170 libras (77 Kg). Este peso tan ligero, junto con la alta resistencia en algunas aleaciones de aluminio (próxima o similar a la de algunos aceros estructurales), permite la construcción de estructuras ligeras y resistentes, particularmente ventajosas en vehículos espaciales, aviones, y en todo tipo de vehículos terrestres y náuticos.” (M. Gustavo, 2013)

## ● JUSTIFICACIÓN

Actualmente se tiene una variedad de artículos relacionados con el tratamiento de modificación en aleaciones Al-Si hipoeutécticas con diversos modificadores como Sr, Na, Sb, Yb y otras tierras raras, sin embargo, no se tiene un cantidad determinada a utilizar como modificador dentro del amplio rango de las aleaciones comerciales utilizadas de Al-Si.

Lo anterior puede repercutir directamente en el producto final al tener una “sobremodificación” o una falta de modificador en la aleación producida.

## • OBJETIVOS

Determinar la relación entre el contenido de silicio y la demanda de estroncio para alcanzar niveles adecuados de modificación (nivel 5 o mayor en la escala comparativa de la AFS).

Relacionar los resultados obtenidos del nivel de modificación con las curvas de enfriamiento obtenidas.

## • HIPÓTESIS

La demanda de Sr para modificar aleaciones Al-Si podría ser mayor en aleaciones que contengan altos contenidos de silicio (composición eutéctica 11-12 %Si) y menor para aleaciones que tengan bajos contenidos de silicio (4.5-5 %Si), debido al efecto que se produce sobre la fracción de Si eutéctico presente.

# ANTECEDENTES Y FUNDAMENTOS

## 1.1 EL ALUMINIO

Hace 200 años, nadie sabía de la existencia del aluminio. Hoy está en todas partes: en latas, marcos de ventanas, envases e incluso carrocerías de automóviles.

“El aluminio es el segundo metal más empleado en el mundo gracias a sus propiedades únicas: ligereza, alta resistencia, gran versatilidad, facilidad de mecanizado, excelente resistencia a la corrosión. Además el aluminio es 100% reciclable ilimitadamente” (SAPA)

“Es un material realmente valioso pues es más ligero que otros metales como puedan ser el acero o el cobre. Además, cuenta con una resistencia bastante alta, por lo que sirve para construir piezas clave para diferentes máquinas pudiendo aguantar mejor el desgaste. Por último, no hay que olvidar que este metal es un excelente conductor de electricidad y de calor, no es tóxico ni tampoco magnético. Todo ello hace que el aluminio sea un bien codiciado por las empresas modernas.

Por ejemplo, en el mundo de las comunicaciones, el aluminio es una excelente alternativa para el cobre, convirtiéndose en un material económico y seguro para transportar electricidad, mucho más económico que cualquier otro.

En los transportes, el aluminio es cada vez más apreciado. Gracias a este material, ligero y económico, es posible crear coches muchísimo menos pesados, algo que reduce considerablemente el consumo de combustible. Así, se puede decir que el aluminio, en el mundo de los vehículos, también aporta beneficios ecológicos.” (importancia.org,2015)

Sin embargo, por ahora la demanda está creciendo. Los fabricantes de automóviles, por ejemplo, están en pro de carrocerías más ligeras, que implican mayor eficiencia de combustible, mejor aceleración y frenado y menos emisiones de  $CO_2$ .

### FUNDICIÓN DE ALUMINIO

El proceso productivo se inicia con la fundición del aluminio primario (con una riqueza del 99.7%), aleándolo con diferentes elementos como el magnesio, silicio, cobre, manganeso, entre otros, que le proporcionan diferentes propiedades físicas y mecánicas, dependiendo de su uso final.

Las aleaciones de fundición de aluminio son de las más importantes ya que tiene altos intervalos de colabilidad, fluidez y un punto de fusión bajo.

Otra importante ventaja del aluminio es que el hidrógeno es el único gas con una solubilidad apreciable en el metal y puede ser controlado por técnicas de desgasificación apropiadas.

El silicio es el mejor candidato como elemento aleante para las fundiciones de aluminio, esto es porque incrementa la fluidez al fundirse, reduce la temperatura de fusión, disminuye la contracción asociada con la solidificación y es muy barato como materia prima. El silicio también tiene una baja densidad ( $2,340 \text{ kg/m}^3$ ), el cual puede ser una ventaja en el peso total del componente de fundición.

El silicio tiene una baja solubilidad en el aluminio, lo que además precipita como silicio puro, el cual es duro y además mejora la resistencia a la abrasión.

## 1.2 CLASIFICACIÓN DE LAS ALEACIONES DE ALUMINIO

Las propiedades del aluminio dependen de un conjunto de factores, de estos, el más importante es la existencia de aleantes. Con la excepción del aluminio de alta pureza (99,99 % de pureza), técnicamente se utilizan sólo materiales de aluminio que contienen otros elementos. Aún en el aluminio de alta pureza, las impurezas (Fe y Si) determinan, en gran medida, sus propiedades mecánicas.

Los elementos aleantes principales del aluminio son: Cobre (Cu), Silicio (Si), Magnesio (Mg), Zinc (Zn) y Manganeso (Mn):

En menores cantidades existen, frecuentemente, como impurezas o aditivos: Hierro (Fe), Cromo (Cr) y Titanio (Ti). Para aleaciones especiales se adiciona: Níquel (Ni), Cobalto (Co), Plata (Ag), Litio (Li), Vanadio (V), Zirconio (Zr), Estaño (Sn), Plomo (Pb), Cadmio (Cd) y Bismuto (Bi).

La clasificación del Aluminio y sus aleaciones se divide en dos grandes grupos bien diferenciados, estos dos grupos son: Conformado y Fundición. Esta división se debe a los diferentes procesos de conformado que puede sufrir el aluminio y sus aleaciones.

## **ALEACIONES BASE ALUMINIO DE FUNDICIÓN.**

Para designar aleaciones de aluminio de fundición se utiliza un sistema numérico de 4 dígitos incorporando un decimal. El primer dígito indica el aleante mayoritario o del grupo de la forma:

1XX.X	ALUMINIO >99.0%
2XX.X	COBRE
3XX.X	SILICIO CON ADICIONES DE COBRE Y MAGNESIO
4XX.X	SILICIO
5XX.X	MAGNESIO
7XX.X	ZINC
8XX.X	OTROS ELEMENTOS

Los dos dígitos siguientes sirven para identificar las diferentes aleaciones de este grupo. En el caso del grupo 1XX.X indica la pureza del aluminio. Finalmente, el último dígito indica en qué forma se encuentra el producto.

El último dígito, que está a la derecha del punto decimal indica la forma del producto: XXX.0 indica fundición, XXX.1 indica lingote con límites de composición química conformes con el numeral 3.2.1 de la norma ANSI H35.1, y XXX.2 indica lingote con límites de composición química que difieren pero que están dentro de los límites del lingote XXX.1.

### **1.3 ALEACIONES Al-Si**

“El silicio es el elemento de aleación que, literalmente, hace posible la viabilidad comercial de la industria de la fundición de aluminio de grandes volúmenes. Con agregados de silicio desde el ~ 4% hasta el nivel del eutéctico, ~ 12%, se pueden producir piezas con diseños muy intrincados, con grandes variaciones del espesor de la sección y de gran superficie y calidad interna. Estos beneficios se derivan de los efectos de silicio, el cual permite el aumento de la fluidez, reduciendo formación de grietas y produciendo una notable mejora en la alimentación de las piezas conjuntamente con una disminución en la contracción (rechupes). Este tipo de aleaciones tienen muy buena soldabilidad y ductilidad.” (M. Gustavo, 2013)

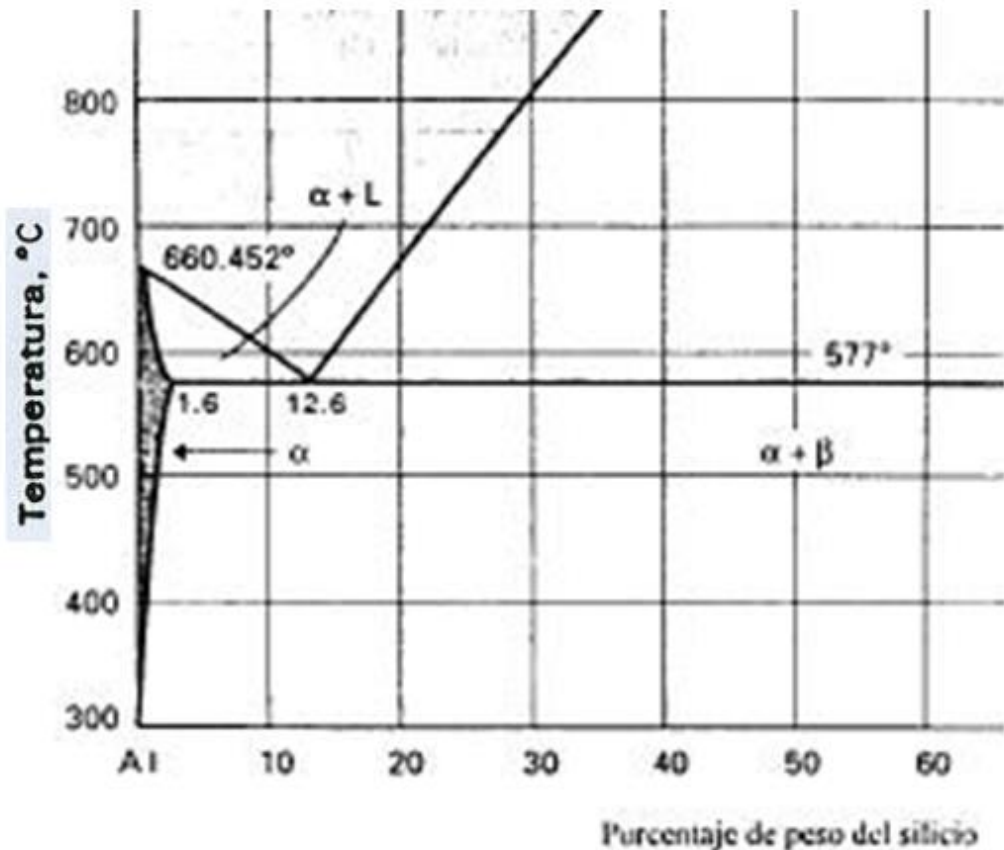


## 1.4 Aleaciones Al-Si hipoeutécticas

El sistema binario Al-Si siendo la composición eutéctica en 12%Si y a una temperatura de 577°C como se muestra en la **Figura 1.1**, las aleaciones son llamadas “eutécticas” cuando el silicio es de 11-13%, aleaciones “hipoeutécticas” para contenidos menores al 11%Si y aleaciones “hipereutécticas” para aquellas con una composición mayor al 13%Si en peso.

Una solidificación lenta de las aleaciones Al-Si resulta en una microestructura gruesa en el cual el eutéctico comprende agujas de silicio en una matriz continua de aluminio, esta morfología es generalmente llamada “acicular”, ya que ésta morfología es frágil, tiene baja ductilidad y alta resistencia a la tensión.

Las propiedades de la aleaciones Al-Si son grandemente influenciadas por el tamaño, distribución y forma de las partículas de silicio, porosidad, DAS, morfología eutéctica y la estructura del grano. (Hedge S., 2008)

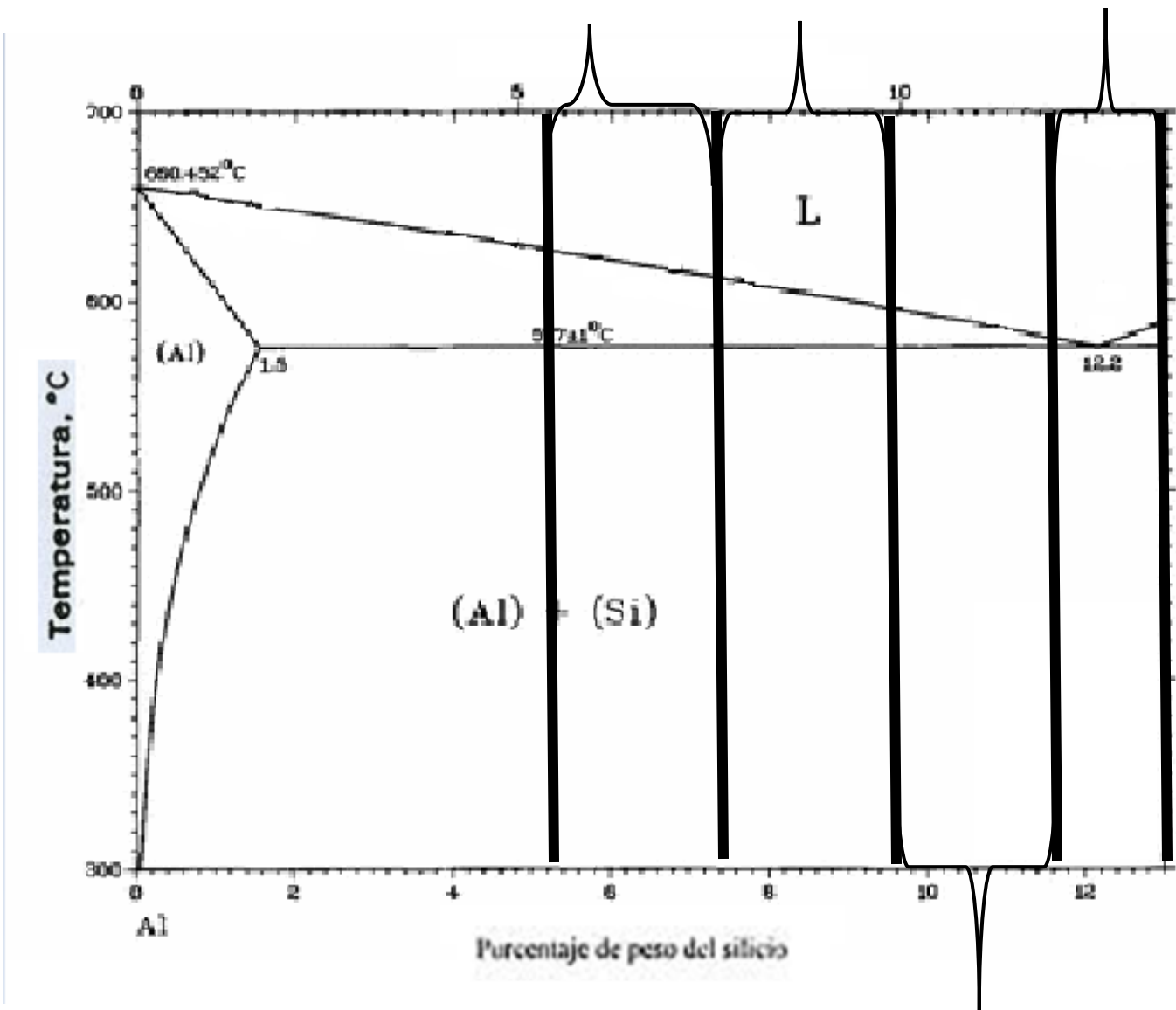


**Figura 1.1** Diagrama de fase de la aleación Al-Si (ASM, 1992)

Aleación A443

Aleación A356

Aleación B413



Aleación 359

**Figura 1.2** Detalle del diagrama de fases de la aleación Al-Si de la zona hipoeutéctica. Se muestra el intervalo de %Si algunas de las principales aleaciones comerciales hipoeutéticas.

(Murray J. L., 1984)

## APLICACIONES

Algunas aplicaciones de las aleaciones Al-Si de la serie 3XX.X y 4XX.X más comunes se presentan a continuación:

**Tabla 1.1** Principales aplicaciones de aleaciones Al-Si coladas en molde de arena de las series 3XX.X (adición de Cu o Mg) y 4XX.X(Al-Si). (ASM, 1992)

Aleación	Producto*	Aplicaciones
A356	S,P	Partes de chasis de camionetas, piezas de alta resistencia mecánica
328	S	Pistones automotrices y para carga pesada, poleas etc.
359	S,P	Piezas para la industria aeroespacial con alta resistencia a la tensión
B413	S,P	Arquitectónico, ornamental, aplicaciones de equipo diario y en el sector alimenticio
A443	S,P	Utensilios de cocina, guarniciones marinas, moldes de neumáticos, cuerpo de carburadores.

- S.- Sand Mold (Molde de arena)
- P.- Permanent Mold (Molde permanente)

Las aleaciones de 3-5%Si son utilizadas en rotores, cuerpo de válvulas, embarcaciones, la mayoría son utilizadas después de ser coladas sin ningún tratamiento posterior.

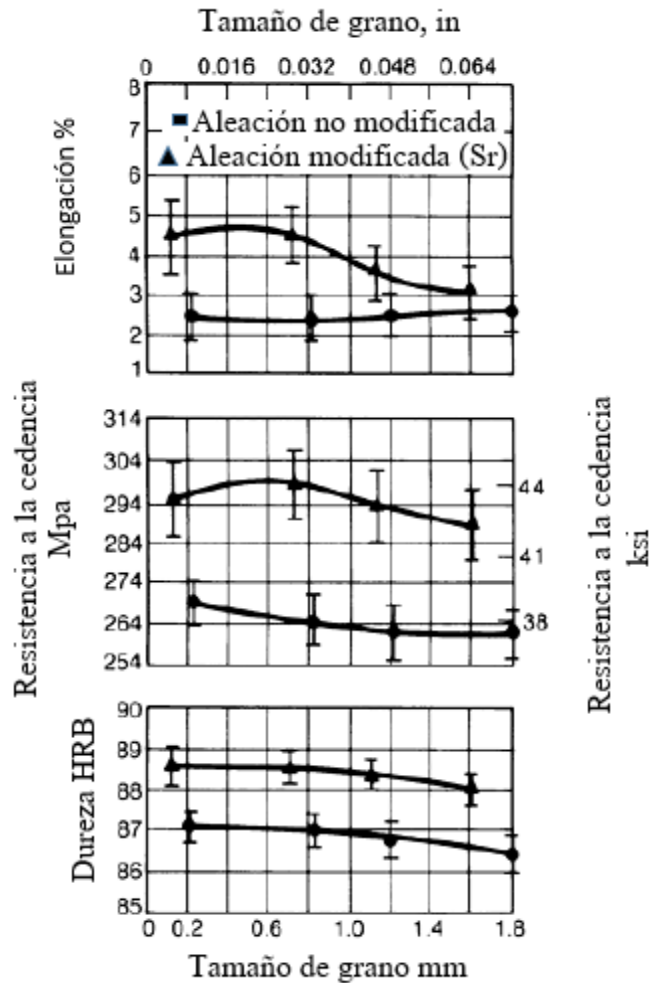
Aleaciones con <3%Si son utilizadas después de un tratamiento térmico en guarniciones.

Los contenidos de silicio que van desde 4% a 12% (Aleaciones hipoeutécticas) tienen una mayor fluidez permitiendo una mayor producción de diseños más complejos con una alta calidad en la superficie así como calidad internamente.

Las aleaciones eutécticas 11-13%Si son utilizadas en pistones para motores diesel.

## **1.5 TRATAMIENTO DE MODIFICACIÓN** (Hedge S., 2008)

Las propiedades mecánicas de las aleaciones Al-Si están fuertemente relacionadas con el tamaño, forma y distribución del silicio eutéctico presente en la microestructura. Para mejorar las propiedades mecánicas éstas aleaciones son generalmente sujetas a un tratamiento de modificación, la cual transforma la morfología del silicio acicular a fibroso dando como resultado una notable mejoría en la elongación y fuerza como se puede apreciar en la **Figura 1.3**



**Figura 1.3** Propiedades mecánicas de la aleación A356 de muestras de pruebas de tensión en función de la modificación y el tamaño de grano. (ASM, 1992)

La modificación eutéctica de la aleación Al-Si puede ser cambiada a una estructura fibrosa a través del tratamiento de modificación, mejorando las propiedades mecánicas de la aleación. La modificación del eutéctico en forma de aguja a una estructura fina fibrosa se puede dar a través de dos maneras:

- Adición de ciertos elementos (modificación química), los elementos más comunes usados en la industria son el Sr y el Na.
- Velocidad de enfriamiento rápida, alrededor de 1mm/s el Silicio llega a ser fino y con una forma fibrosa. La densidad de gemelación no parece cambiar significativamente y las fibras permanecen ramificadas e interconectadas.

## 1.6 TEORÍAS DE MECANISMOS DE MODIFICACIÓN

Entender el mecanismo en el cual el eutéctico se forma y crece es importante. Durante la solidificación de las aleaciones Al-Si, las dendritas primarias crecen y chocan unas con otras, la movilidad de las dendritas es restringida, el transporte de masa es compensado con la contracción originada por la alimentación interdendrítica que depende del flujo del eutéctico líquido.

Además, el entendimiento del mecanismo de formación del eutéctico nos ayuda a analizar la resistencia del flujo del fluido y la eficiencia de alimentación afectada por la contracción, la porosidad y la segregación.

El eutéctico Aluminio-Silicio es un eutéctico anómalo ya que está constituido por un metal (Al) y un no metal (Si). El eutéctico sufre un cambio en su morfología con la adición de ciertos elementos que son conocidos por causar una modificación química como el Sr y el Na.

Un valor cerca de 1.64 es propuesto para la relación entre el radio atómico del modificador con respecto al Silicio. La selección del agente modificador también depende de otros factores como grado de disolución, presión de vapor, estabilidad en el metal fundido etc. Algunos modificadores son: Na, K, Rb, Ce, Sr, Ba, La, Yb etc.. (Hedge S., 2008)

La lista incluye elementos de las familias IA, IIA y tierras raras.

El mecanismo exacto de modificación no está bien entendido a pesar de décadas de investigación aunque se tienen ciertas teorías aquí presentadas:

- Teoría de la energía superficial (Guthy, 2002)

Es basada en un mecanismo que intenta explicar la modificación química del eutéctico Al-Si basada en la energía superficial interfacial. Fue sugerido que el intervalo de avance de la interfase depende de un balance entre el intervalo de flujo de calor del líquido al sólido a través de la interfase y el calor latente de fusión liberado durante la solidificación.

Para una modificación química, una disminución en la energía superficial de la interfase Al-Si sólido y a la vez una adición de un modificador químico incrementa el ángulo interfacial. Esto suprime el crecimiento de los cristales de Silicio y causa la modificación de la estructura del eutéctico.

- Envenenamiento interfacial (Wang J, 2002)

Esta teoría es basada en que los átomos del modificador “envenenan” los sitios de crecimiento del Silicio en la interfase.

- Teoría de control difusional

La teoría es basada en la observación que la solubilidad del agente modificador en el aluminio sólido y el Silicio es baja, esto implica que segregaría enfrente de la interfase de crecimiento, la cual podría restringir la difusión del silicio en el material fundido.

## **PROPIEDADES MECÁNICAS RESPECTO A OTROS MODIFICADORES**

(Kauhiero N., 2001)

La microestructura, dureza, propiedades mecánicas y análisis de fractura han sido estudiadas para las aleaciones modificadas y no-modificadas hipoeutécticas comerciales Al-Si.

Tres modificadores fueron usados siendo Sodio (Na), Antimonio (Sb) y Estroncio (Sr) utilizando una aleación Al-5Si.

La estructura modificada con Sb reveló pequeñas agujas de Silicio. Las estructuras modificadas con Na y Sr presentaron Si fibroso.

Las propiedades mecánicas para la aleación modificada con Sr en molde de arena fueron significativamente más altas que la aleación modificadas con Na en un 12.7% en pruebas de tensión, 16.3% en ductilidad y 33.3% en tenacidad.

Para los lingotes en molde metálico el incremento en las propiedades mecánicas con Sr como modificador fueron respectivamente; 16.7%, 32.5% y 41.7% comparado con la aleación modificada con Sodio.

## 1.7 VARIABLES QUE AFECTAN LA MODIFICACIÓN

- Cantidad de Sr residual

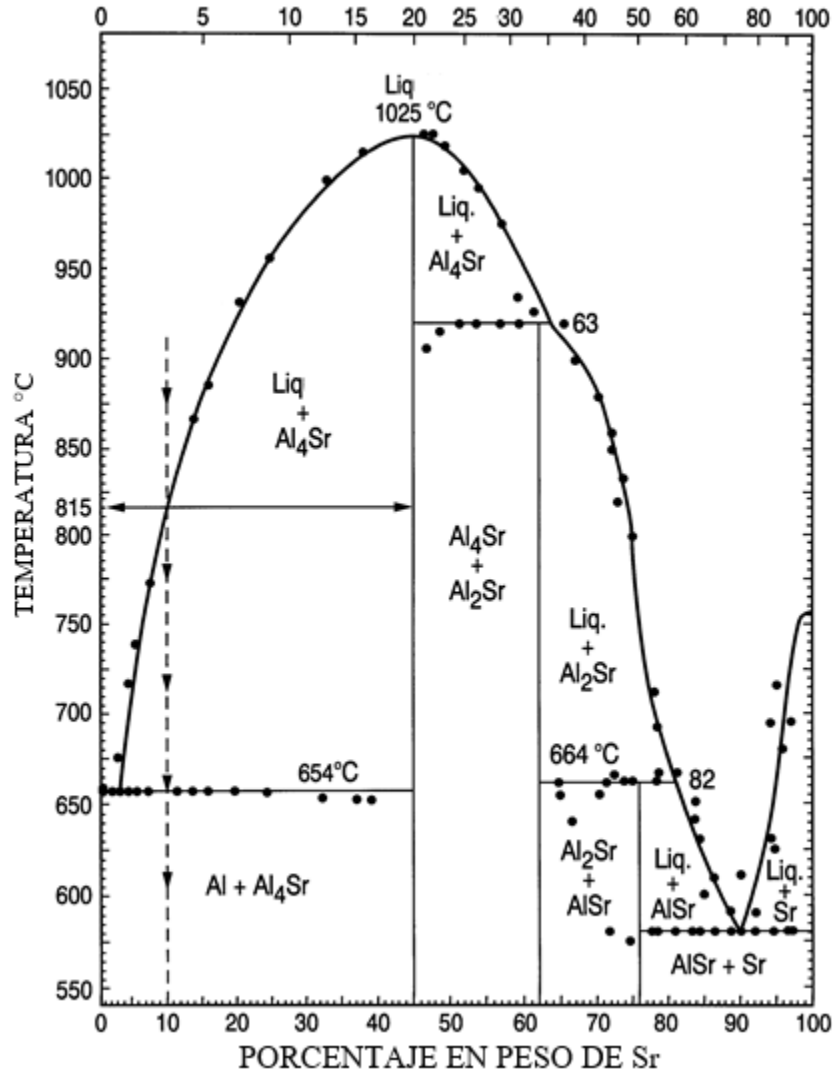
Las cantidades recomendadas y determinadas experimentalmente que provocan una buena modificación aún son tema de discusión, algunos de los niveles de Sr reportados en la bibliografía son: L. Wang y S. Shivkumar recomiendan para niveles óptimos de 0.01-0.015%Sr (Wang L., 1995), COMALCO® recomienda para las aleación Al-7Si adiciones de 0.01-0.02%Sr, en comparación con Xiang Chen et. al. que recomienda adiciones de 56ppm (0.0056) (Xiang Chen, 2006) y aleaciones con 12%Sr 0.02-0.03%Sr (COMALCO, 1997), A.K. Dahle et. al. recomiendan al usar una aleación 319 de Al-Si con 3.3%Cu un intervalo de 0.007-0.01%Sr (Dahle A. K., 2001), S. A. Kory et. al. Recomiendan usar 0.02%Sr en aleaciones Al-7Si (Kory S. A., 2000),

- Sobremodificación

Hay un óptimo nivel de modificador para producir una microestructura dada. Cualquier nivel más alto del óptimo resulta en una sobre-modificación. El engrosamiento del Si y la reversión del Si fino fibroso a láminas interconectadas toma lugar con una sobre-modificación con Sr.

En adición, fases intermetálicas del Sr empiezan a formarse dependiendo de la temperatura como se muestra en la **Figura 1.4.** (Hedge S., 2008)





**Figura 1.4** Diagrama de fases Al-Sr. Compuestos intermetálicos de Sr formados en relación a la cantidad añadida y a la temperatura

- Calor de fusión y velocidad de enfriamiento (Bian X., 2001)

El calor latente de fusión disminuye con el sub enfriamiento durante la solidificación en aleaciones Al-Si. La disminución es mucho más rápido en aleaciones modificadas con Sr que para las no modificadas a bajos intervalos de enfriamiento (1.7°C/s). El contenido de silicio en la estructura eutéctica aumenta con el aumento de la velocidad de solidificación.

La disminución en el calor latente y el aumento del contenido de silicio en la fase eutéctica son explicados por un aumento en la energía libre del estado sólido durante la solidificación.

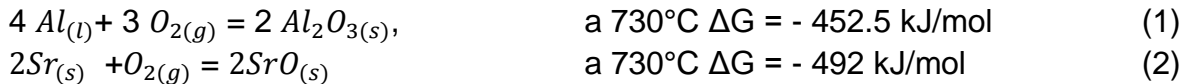
- Decaimiento de la potencia de modificación

El sodio se desvanece más rápido que el estroncio, El estroncio puede ser considerado como un modificador semi-permanente. Tiene una presión de vapor muy baja ( $1 \times 10^{-3}$  atm. a  $730^\circ\text{C}$ ) y las pérdidas de la fundición es principalmente por oxidación. Toma generalmente de 15-16hrs en desvanecerse a la mitad de la concentración inicial.

Hay muchas variables las cuales afectan la microestructura, estas incluyen tipo y cantidad de modificador. Las impurezas presentes en el metal fundido, velocidad de enfriamiento, cantidad de Silicio y parámetros del proceso son algunos ejemplos. La temperatura del metal fundido juega un papel importante. Adiciones de Mg,Ag,Cu,Ni,Zn disminuye la eficiencia de modificación.

Para explicar la tendencia del Sr para oxidarse, resulta importante analizar la estabilidad de los productos de oxidación. La energía libre de Gibbs para óxidos simples puede ser usado para evaluar la estabilidad de éstos.

Las ecuaciones 1 y 2 muestran la energía para el sistema Al-Sr-O



Se puede concluir que, teniendo una alta energía negativa a  $730^\circ\text{C}$ , el SrO es más estable que el  $Al_2O_3$  en aleaciones Al-Si. (M. Timpel, 2012)

- Efecto del fósforo

El fósforo hace que la modificación sea aún más difícil. Al entrar en contacto con herramientas, refractario o recubrimiento de crisoles el fósforo interviene con la modificación del Na, Sr o Sb.

- Dependencia negativa de la temperatura (Gruzleski, 1989)

Uno de los más importantes descubrimientos con respecto a la disolución de las aleaciones con alto contenido de estroncio en aleaciones de Aluminio A356 fue la eficiencia reducida a altas temperaturas. En contraste, altas recuperaciones de estroncio en el metal fundido fueron obtenidas a temperaturas bajas con un alto grado de exotermicidad y la baja formación de intermetálicos con Sr.

A temperaturas altas en el metal líquido, la reacción entre el sólido y el metal líquido toma lugar instantáneamente en la interfase sólido-líquido.

La reacción producida es vista como una cáscara sólida compacta, la cual, después de alcanzar un cierto espesor, forma una barrera entre los reactivos sólido y líquido, a bajas temperaturas de temperatura de trabajo, sin embargo, la reacción es más lenta, y el Sr se difunde en el metal líquido antes de que ocurra la reacción. Cuando la reacción finalmente se lleva a cabo, el producto está disperso uniformemente.

Por lo tanto, el efecto de la temperatura en la eficiencia del Sr es debido principalmente a efectos cinéticos.

- Tamaño de grano (Stuart D. McDonald, 2004)

Gracias al análisis térmico, solidificación interrumpida y examinación microestructural revelaron que, en un cambio de la morfología del Silicio debido a la modificación con Sr causa un aumento en el tamaño de grano, con tan sólo 100ppm de Sr es suficiente para incrementar el tamaño de grano en una orden de magnitud.

- Cantidad de material fundido (Miresmaeili, 2005)

La rápida pérdida de Sr también muestra que el Sr tiene una alta reactividad a oxidarse en pequeñas cantidades a fundir. La oxidación de Al-7Si fue estudiada analizando la capa superficial de la aleación a diferentes periodos de tiempo. Las capas superficiales de óxido eran principalmente  $Al_2O_3$  y  $Al_2O_3 \cdot MgO$  y no fue encontrado un contenido detectable de SrO.

En contraste con las pequeñas cantidades de material a fundir, al tener una gran cantidad de material fundido, el relativamente pequeño intervalo de pérdida de Sr durante la oxidación muestra que el Sr tiene una gran estabilidad en grandes cantidades. Esto revela que en tales casos la tendencia del Sr a oxidarse no es notoria.

## 1.8 ANÁLISIS TÉRMICO

La calidad de la colada requiere calidad en el metal fundido. Para producir metal fundido de calidad, los tratamientos como desgasificado, inoculación, refinación de grano, modificación etc. Tienen que ser llevadas a cabo apropiadamente. La modificación afecta las propiedades microestructurales y las características microestructurales afectan las propiedades mecánicas. Es preferible asegurar la efectividad del tratamiento antes del vaciado tan bien como monitorear los efectos de los tratamientos en la calidad del metal, pero, convencionalmente una examinación metalográfica consume tiempo. Se requiere un técnico hábil y también es difícil desarrollarlo en las fundidoras.

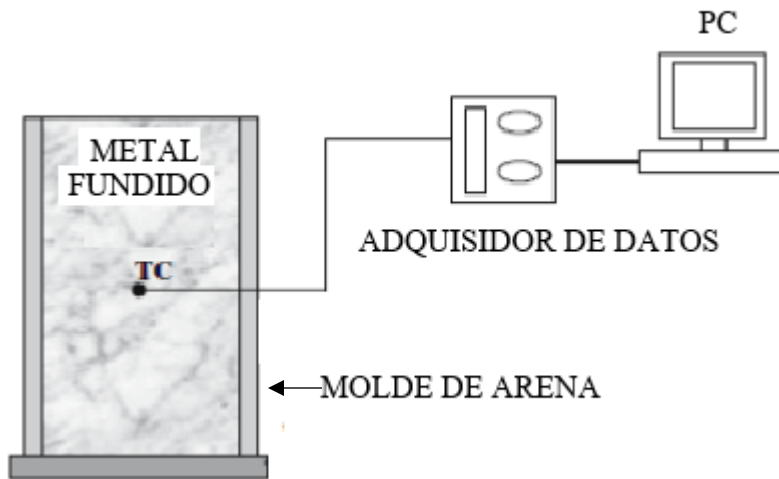
Más allá de la calidad del metal puede deteriorarse por el tiempo que resulta al ser obtenida. Por lo tanto, una técnica de control de proceso en línea es necesaria para establecer la calidad del metal fundido. Técnicas de ensayo no-destructivas son las más adecuadas para este propósito. Métodos no-destructivos de evaluación de la calidad del metal son clasificados generalmente como análisis térmico, medidas de conductividad eléctrica y técnicas de ultrasonido. Estos métodos proveen una rápida evaluación de la calidad del metal previo al vaciado del metal fundido.

La técnica de análisis térmico provee un confiable método para evaluar el estado de nucleación y modificación del metal fundido previo al vaciado.

En el análisis térmico, la temperatura de solidificación de la muestra es monitoreada y grabada, conforme se va enfriando desde el estado líquido a completamente sólido y cómo atraviesa el rango de solidificación. La gráfica resultante, la curva de enfriamiento, es analizada para observar el progreso de la transformación de fases para predecir la microestructura obtenida.

Generalmente el análisis térmico es llevado a cabo vaciando el metal fundido en un molde instrumentado. El molde de arena, o permanente, tiene uno o más termopares posicionados con un lector de temperaturas, la terminación del termopar es conectado al adquisidor de datos a través de cables.

Los datos adquiridos son analizados con un software apropiado, un esquema de instalación es dado en la **Figura 1.5**



**Figura 1.5** Esquema de instalación del adquisidor de datos para obtener las curvas de enfriamiento.

El tratamiento de modificación cambia las siguientes características de la curva de enfriamiento:

La temperatura de la meseta eutéctica

El enfriamiento requerido para empezar el enfriamiento eutéctico

El tiempo de duración del subenfriamiento

La forma de la curvatura en el fin del eutéctico

Es observado que cuando la aleación es modificada la temperatura eutéctica se deprime, el sub-enfriamiento para la nucleación aumenta, la proporción del radio aumenta con la modificación y la proporción del ángulo disminuye con la modificación

La depresión de la temperatura eutéctica es la principal característica más usada en el análisis térmico ya que la temperatura eutéctica es fácil de manejar, es generalmente empleada para asegurar si el material fundido está o no modificado.

Sin embargo, si este parámetro es usado como la base del análisis, se debe tener una temperatura eutéctica base para la aleación sin modificar que debe ser determinada primero y los valores de la aleación modificada ser comparada después.

La ecuación de Mondolfo para la temperatura eutéctica de una aleación sin modificar

Temperatura Eutéctica (°C)  
 $=577-12.5\%Si \{4.43\%Mg+1.43\%Fe+1.93\%Cu+1.7\%Zn+3\%Mn+4\%Ni\}$

La ecuación es generalmente aplicable a aleaciones de aluminio donde la cantidad total de otros elementos que no sean Si y Al sean menores al 1%wt  
(Gruzleski J. E., 1990)

Pero, si solamente la temperatura es usada como criterio para una propia modificación, es difícil detectar estructuras sobre modificadas, porque, el más grande cambio de temperatura ocurre en la transición de una estructura no-modificada a una modificada. El sub-enfriamiento incrementa con la modificación y luego se detiene, cuando la estructura llega a ser sobre modificada.

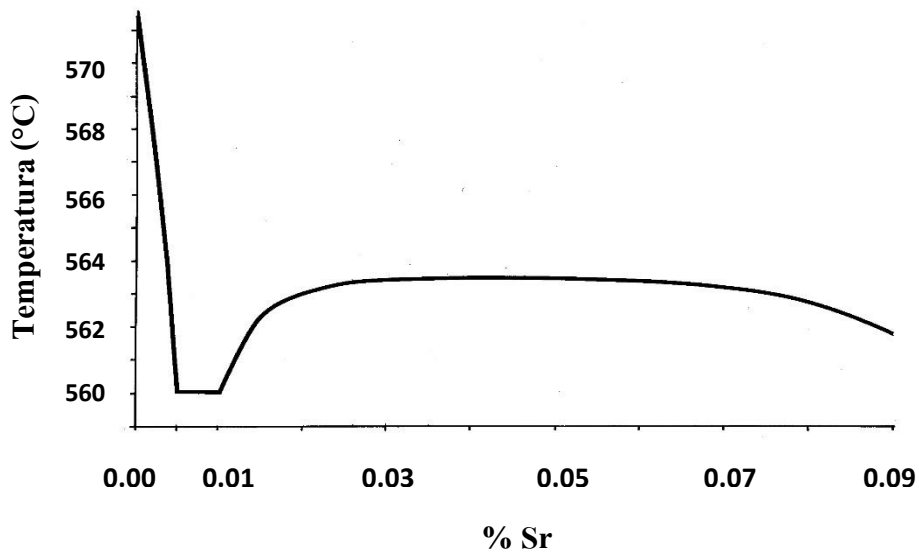
Una revisión de la literatura sugiere un mínimo de depresión eutéctica de 6-8°C para una estructura modificada con un M.R.=5 (Modification Rate) (Xiang Chen, 2006) (Shabestari S. G., 2007). La magnitud del sub- enfriamiento eutéctico incrementa rápidamente cuando la estructura cambia de laminar a fibroso.

La solidificación del eutéctico modificado, la evolución a una estructura fibrosa es relacionada con un tiempo más corto en el sub-enfriamiento en la temperatura eutéctica.

### **EFFECTO DEL %Sr EN LA TEMPERATURA DE CRECIMIENTO EUTÉCTICO**

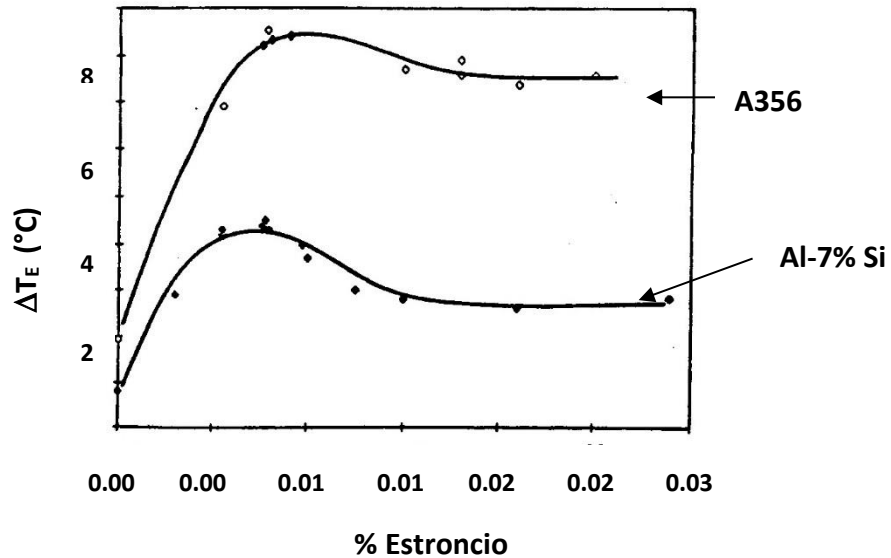
“R. DasGupta y colaboradores, registraron y graficaron la temperatura de crecimiento eutéctico en función del % Sr. En general, la descripción del comportamiento de la curva es el siguiente:

Inicialmente la temperatura de crecimiento del eutéctico ( $T_E$ ) disminuye conforme se adiciona Sr hasta un 0.010% Sr, después incrementa de nuevo hasta un 0.017% Sr, punto en el cual dicha temperatura se mantiene invariable; finalmente, se presenta una disminución cuando el contenido de Sr excede un 0.078%.” (Trejo E., 2007)



**Figura 1.6** Variación de la temperatura de crecimiento eutéctico en función del % Sr.  
(R. DasGupta, 1988)

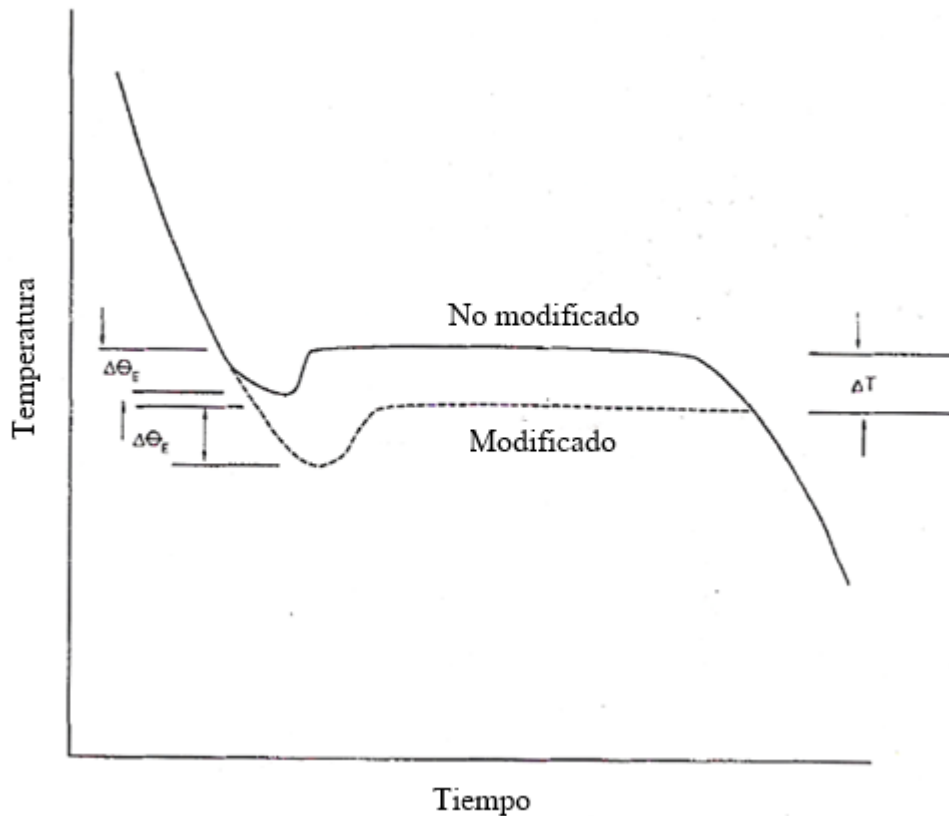
Por otro lado, D. Apelian y J.J. A. Cheng, estudiaron el cambio de temperatura de nucleación eutéctica de dos diferentes aleaciones al añadir Sr como modificador como se puede observar en la **Figura 1.7**. Específicamente en la aleación Al-7Si se puede observar un incremento en la diferencia de la temperatura eutéctica de aproximadamente 5°C con 0.007%Sr con un posterior descenso en la diferencia de la temperatura eutéctica. Después de añadir la cantidad de 0.01%Sr no se observa un cambio aparente y la diferencia se mantiene en 3°C.



**Figura 1.7** Variación de la depresión de temperatura de crecimiento eutéctico en función del % Sr para una aleación Al-7% Si y A356. (Apelian, 1986)

El análisis térmico ha estado ganando aceptación en muchas fundidoras de aluminio como un método rápido que puede ser usado antes del vaciado. La disminución en la temperatura eutéctica, debido a la adición de elementos tales como estroncio y sodio, comparada con la aleación no modificada es usada para evaluar el nivel de modificación, esto también llamado “depresión” puede ser tomado como una medida de la calidad de modificación por que se correlaciona muy bien con los parámetros microestructurales evaluados en el análisis de imagen del silicio eutéctico. La **Figura 1.8** muestra esta depresión provocada por el tratamiento de modificación.





**Figura 1.8** Comparación de dos curvas de enfriamiento para una aleación modificada y una no modificada, observar la depresión de la temperatura eutéctica. (Heusler L., 2002)

## LIMITACIONES

“Por un lado, hay parámetros experimentales, tales como velocidad de enfriamiento, temperatura del metal y trazas de elementos, los cuales influyen los resultados del análisis térmico.

Observando los valores de “depresión” del experimento, con 100ppm de Sr, 4°C de depresión parece ser el máximo

La investigación confirma que la depresión medida puede ser usada para asegurar y controlar la eficiencia de un tratamiento de modificación. Parámetros experimentales, tal como la temperatura del metal fundido y el crisol sólo tienen un efecto pequeño. Por otro lado, el efecto de los elementos aleantes, por ejemplo, Mg, Cu, Si, es mucho más pronunciada y tiene que ser considerada durante la aplicación práctica en el análisis térmico. Con un incremento en el contenido de Si, una disminución en los valores de la depresión fue observada mientras la microestructura permanece sin ser alterada.” (Heusler L., 2002)

## 2.- DESARROLLO EXPERIMENTAL Y RESULTADOS

En el presente estudio, los experimentos son conducidos para determinar la cantidad necesaria para modificar la aleación Al-Si a diferentes porcentajes de Si.

Se fabricaron aleaciones en un horno eléctrico de resistencia con cuatro contenidos de silicio 4.5-5%Si, 7-8%Si, 9-10%Si, 11-11.5 %Si, determinando el contenido de silicio mediante el espectrómetro de emisión atómica de acuerdo al diseño experimental mostrado en la **Tabla 2.1**

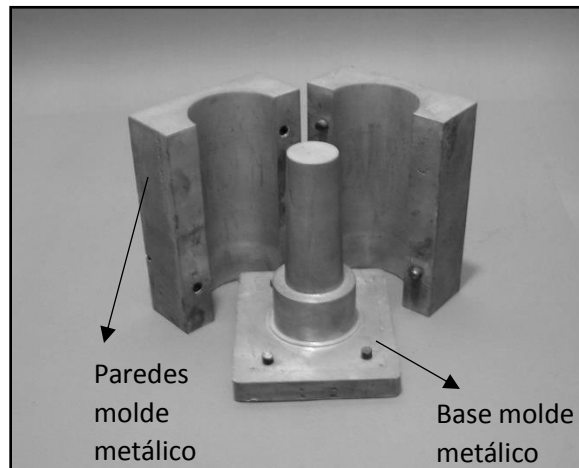
Para ello fueron coladas en un horno eléctrico barras de 2.5-3 cm de diámetro por 10 a 12 cm de alto de cada aleación con un peso de 180g en cada nivel de Si especificado utilizando moldes de silicato para una velocidad de enfriamiento relativamente lenta, esto para asegurar que el nivel de modificación es debido al Si agregado.

- Fabricación de moldes de arena

Se mezclaron 2.5 kg de arena sílica (No. AFS 80-90) con un aglutinante (Silicato de Sodio) al 5% en peso durante 5 minutos.

Cuando el silicato de sodio soluble en agua reacciona con el dióxido de carbono en presencia de arena, el silicato es convertido en una sílica-gel la cual se une a los granos de arena para formar una coraza de arena con la forma deseada. (Alemania Patente nº 3,442,665, 1969)

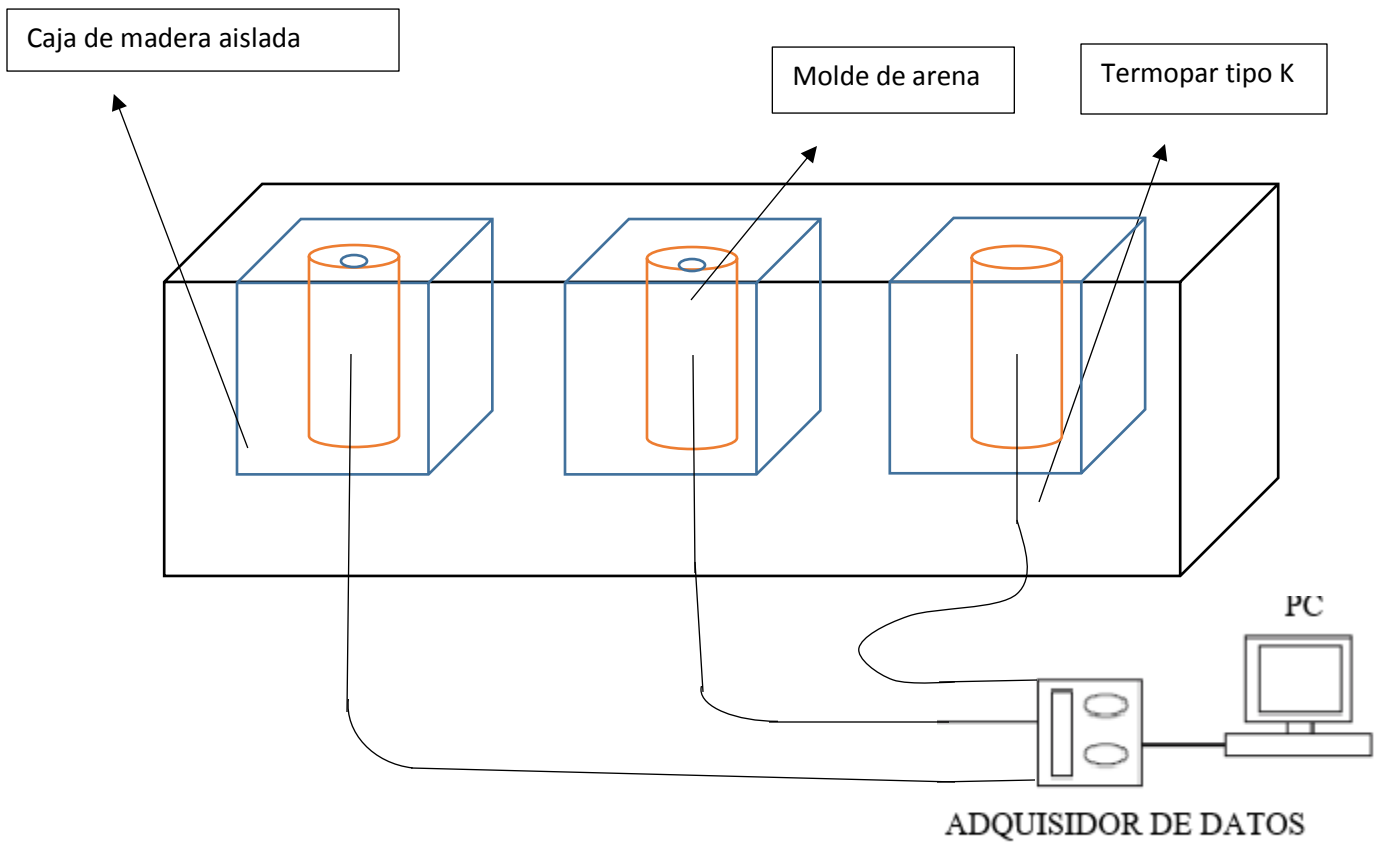
La mezcla se compactó dentro de un molde cilíndrico metálico para obtener moldes de arena sílica; posteriormente se aplicó un flujo de gas CO<sub>2</sub>.



**Figura 2.1** Fabricación de copas de arena.

Molde metálico empleado para la fabricación de moldes de arena

- Fabricación de termopares tipo K. Alambre Chromel (Ni-Cr) y Alumel (Ni-Al) fueron insertados en bifilares cerámicos y después a un conector macho. Las puntas se unieron por soldadura utilizando gas acetileno.



**Figura 2.2** Esquema del equipo utilizado y el sistema de vaciado

- Equipo y sistema de vaciado.

Se colocaron tres copas de arena en una caja de madera aislada con arena sílica.

Los crisoles de carburo de silicio, la cuchara de acero inoxidable, lingotera, pinzas y maneral se revistieron con pintura refractaria base Circonio.

Se introdujo un termopar tipo K por la parte inferior hasta la mitad del molde y se conectaron las terminaciones macho-hembra. La conexión hembra va conectada al adquisidor de datos y este a su vez, a una computadora personal.

Durante el enfriamiento será utilizado un adquisidor de datos *Measurement Computing* con ayuda del software *TracerDAQ* para obtener las curvas de enfriamiento para el posterior análisis térmico.

- Tratamiento de modificación

Una vez hechas las aleaciones base con diferentes porcentajes de Si, se fundieron a una temperatura determinada utilizando el diagrama de fases Al-Si, posteriormente se agregó el Sr en forma de aleación maestra Al-10Sr, se agitaron 10 minutos en promedio, se escorificó y se vaciaron en las copas de arena aisladas con arena sílica y conectadas a los termopares para el registro de las curvas de enfriamiento.

Cada una de las muestras es cortada transversalmente para evaluar el nivel de modificación del silicio eutéctico utilizando el análisis metalográfico, para esto, se tomó una muestra representativa de la probeta para posteriormente desbastar hasta lija no. 600., la muestra se pulió hasta paño fino, se atacó con una solución de HF al 1%, se enjuagó y secó con un flujo de aire.

Se utilizó un microscopio óptico con aumentos de 100X para comparar las imágenes obtenidas con el patrón reportado por la AFS que define 7 niveles de modificación del 1 sin modificar al 7 como supermodificado.

## 2.1 RESULTADOS COMPOSICIÓN QUÍMICA Y ANÁLISIS METALOGRAFICO.

Las diferentes cantidades de Sr añadido a cada aleación se presentan en la siguiente tabla de diseño experimental. Los intervalos utilizados en el experimento se basaron en estudios previos con modificación de Sr en aleaciones Al-Si citadas anteriormente.

**Tabla 2.1** Cuadro para el diseño experimental

Aleación	%Si en la aleación	%Sr en el tratamiento						
		0.002	0.004	0.006	0.008	0.01	0.02	0.04
1	5-6%	si	si	si	si	si		
2	7-8%	si	si	si	si	si	si	
3	9-10%	no	no	si	si	si	si	
4	11-12%	no	no	no	si	si	si	si

\*Si significa que será tratada con Sr en el nivel seleccionado y No significa que no será tratada con ese nivel

Los resultados obtenidos del espectrofotómetro de emisión atómica muestran la composición química de las aleaciones utilizadas en este experimento, y posteriormente se muestran las imágenes del análisis metalográfico a diferentes niveles de Sr adicionadas.

La composición química inicial para la aleación con 5% Si se presenta en la siguiente tabla.

**Tabla 2.2** Composición química inicial de la aleación de bajo silicio.

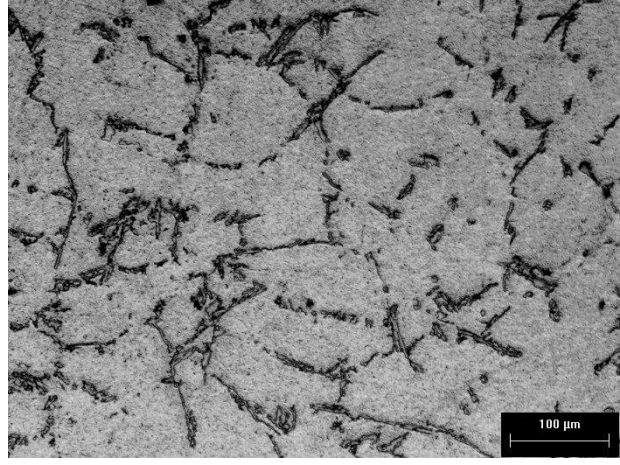
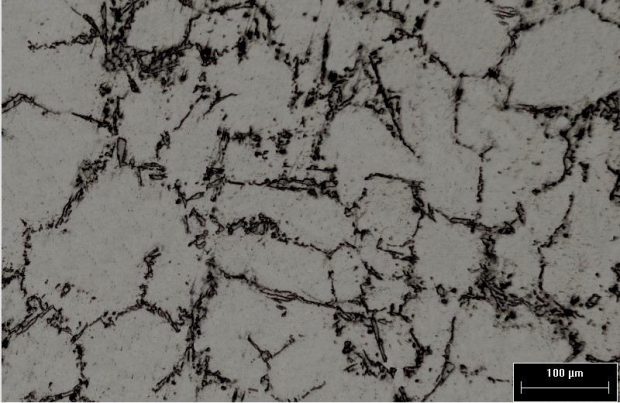

Elemento	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al
% en peso	4.753	0.2871	0.0100	0.0151	0.0220	0.0096	0.0246	Bal.

**Tabla 2.3** Composición final de la aleación Al-5%Si con 0.01%Sr

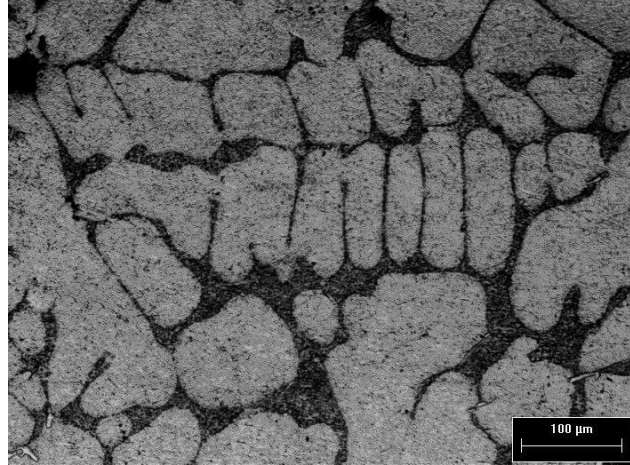
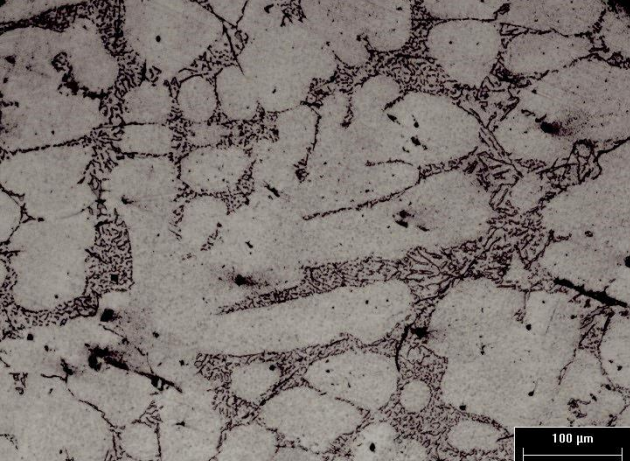
Elemento*	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al
% en peso	5.52	0.3719	0.1765	0.1762	0.2630	0.2204	0.0660	Bal.

La siguiente tabla muestra el análisis metalográfico de la aleación Al-5%Si con diferentes niveles de Sr y la evaluación del nivel de modificación medida en la escala AFS.

**Tabla 2.4** Comparación de los diferentes niveles de adición de Sr y su nivel de modificación con su correspondiente microestructura para una aleación de bajo silicio.

Al-4.7%5Si		
Nivel Sr residual	Nivel de modificación	Microestructura sin ataque Zona gris claro: matriz Aluminio $\alpha$ Zona gris oscuro: Silicio eutéctico
0%Sr	0	
0.0014%Sr	2	
0.0037%Sr	3	



0.0078%Sr	5	
0.01%Sr	7	

La composición química para la aleación con 7.5% Si se presenta en la siguiente tabla.

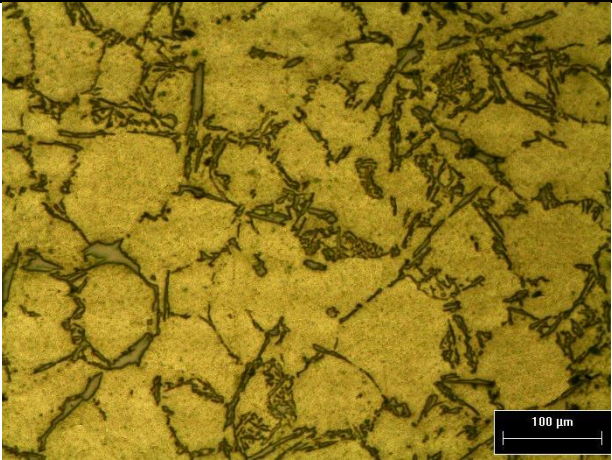
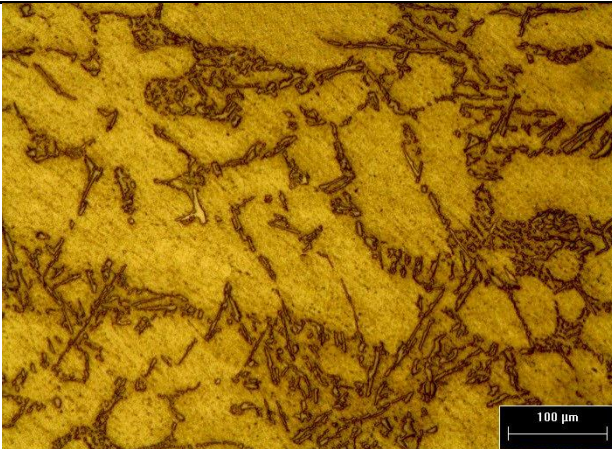
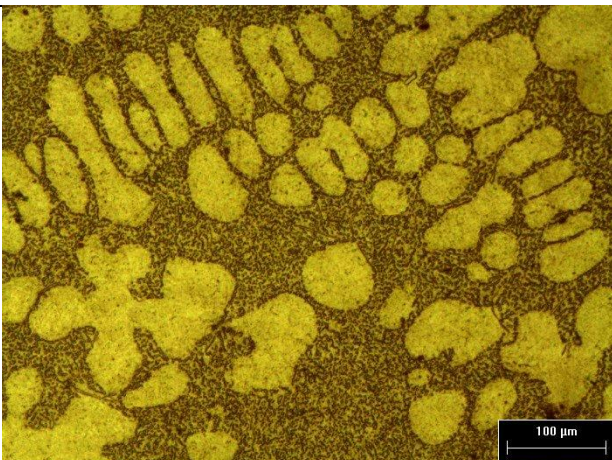
**Tabla 2.5** Composición química inicial de la aleación Al-7.5%Si

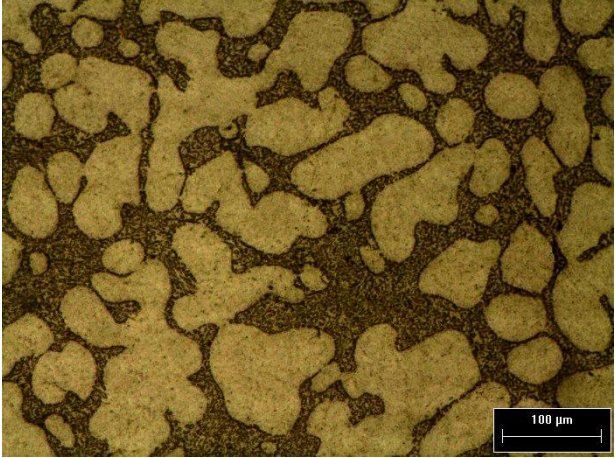
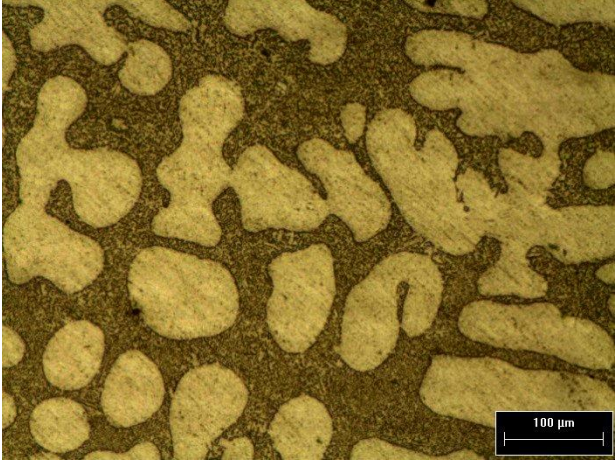
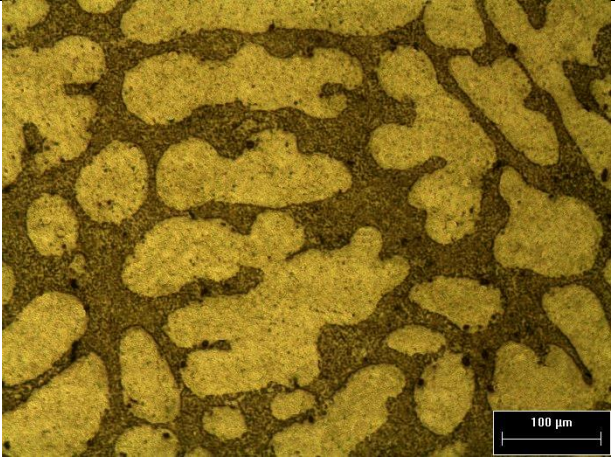
Elemento	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	V	Al
% en peso	7.43	0.3167	0.0059	0.0151	0.0112	0.0104	0.0225	0.0094	Bal.

La siguiente tabla muestra el análisis metalográfico de la aleación Al-7.5%Si y le evaluación del nivel de modificación medida en la escala AFS.



**Tabla 2.6** Comparación de los diferentes niveles de adición de Sr y su nivel de modificación con su correspondiente microestructura para la aleación Al-7%Si.

Al-7.4%Si		
Nivel Sr residual	Nivel de modificación	Microestructura sin ataque Zona café claro: matriz Aluminio $\alpha$ Zona café oscuro: Silicio eutéctico
0.0002% Sr	0	
0.0041% Sr	2	
0.0067% Sr	4	

0.0079% Sr	5	
0.014% Sr	6	
0.022% Sr	6	

La composición química inicial para la aleación con 9% Si se presenta en la siguiente tabla.

**Tabla 2.7** Composición química inicial de la aleación Al-9%Si

Elemento	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al
% en peso	8.89	0.3648	0.1750	0.0145	0.0166	0.0103	0.0225	Bal.

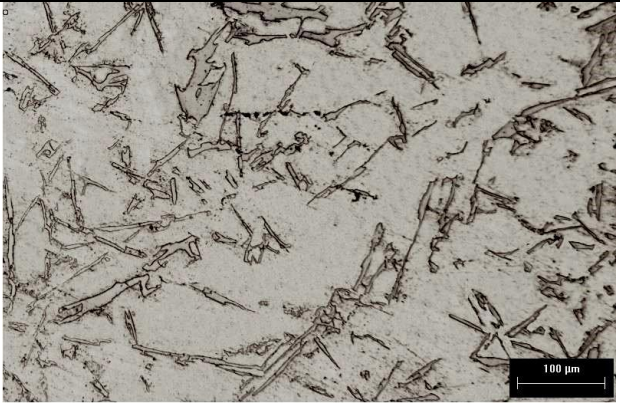
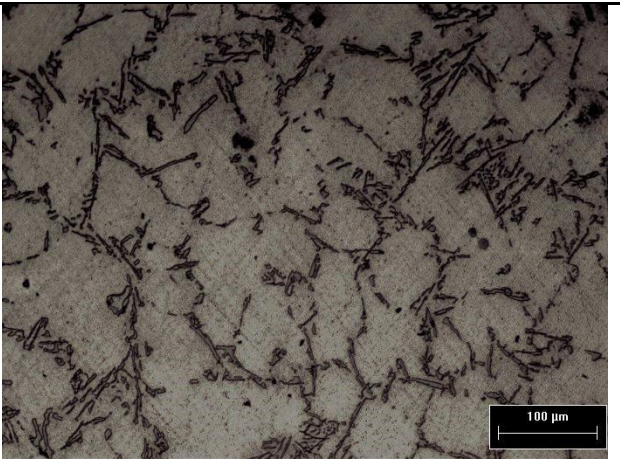
**Tabla 2.8** Composición química final de la aleación Al-9%Si con 0.01%Sr.

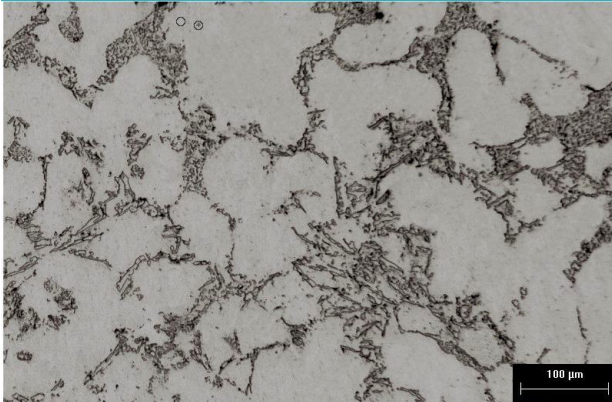
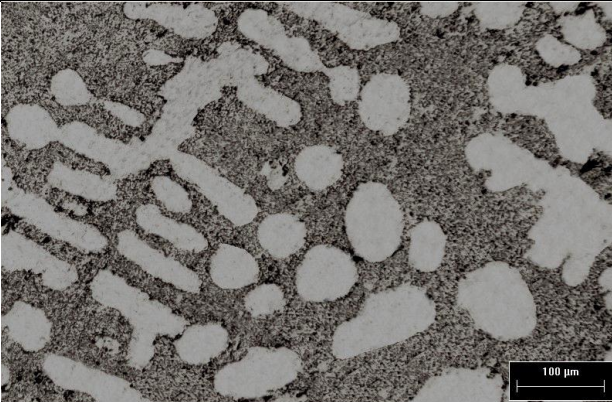
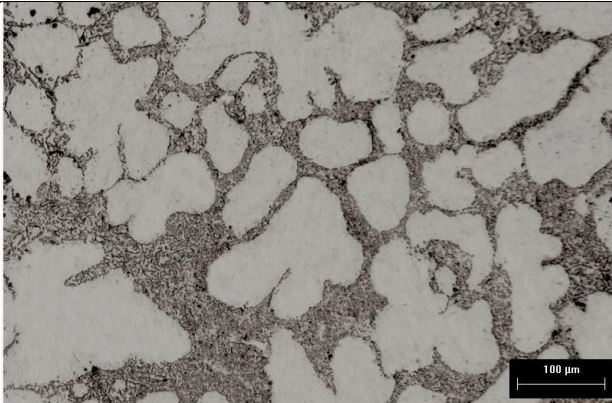
Elemento*	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al
% en peso	8.96	0.3631	0.1743	0.1684	0.2219	0.2052	0.0616	Bal.

La siguiente tabla muestra el análisis metalográfico de la aleación Al-9%Si y la evaluación de los diferentes niveles de modificación medida en la escala AFS.



**Tabla 2.9** Comparación de los diferentes niveles de adición de Sr y su nivel de modificación con su correspondiente microestructura para la aleación Al-9%Si.

Al-8.9%Si		
Nivel Sr residual	Nivel de modificación	Microestructura sin ataque Zona gris claro: matriz Aluminio $\alpha$ Zona gris oscuro: Silicio eutéctico
0.0011% Sr	0	
0.0039% Sr	2	

0.044% Sr	3	
0.01% Sr	6	
0.0365% Sr	7	

Para la aleación con 11% de silicio los resultados de composición química se muestran en la **Tabla 2.10** y **Tabla 2.11**. Las microestructuras con el correspondiente nivel de modificación en la **Tabla 2.12**

**Tabla 2.10** Muestra la composición química inicial de la aleación de alto silicio utilizada.

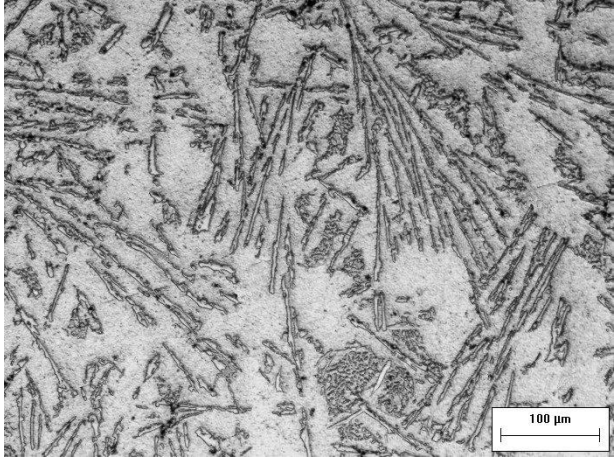
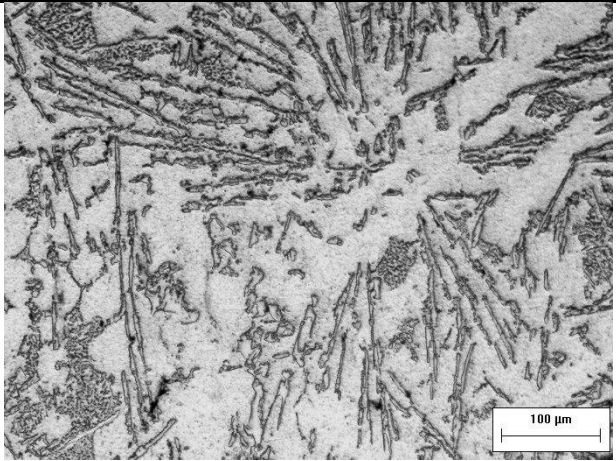
Elemento	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al
% en peso	11.43	0.2769	0.0049	0.0147	0.0189	0.0096	0.0245	Bal.

**Tabla 2.11** Muestra la composición química final de la aleación Al-11Si con 0.04% Sr como modificador.

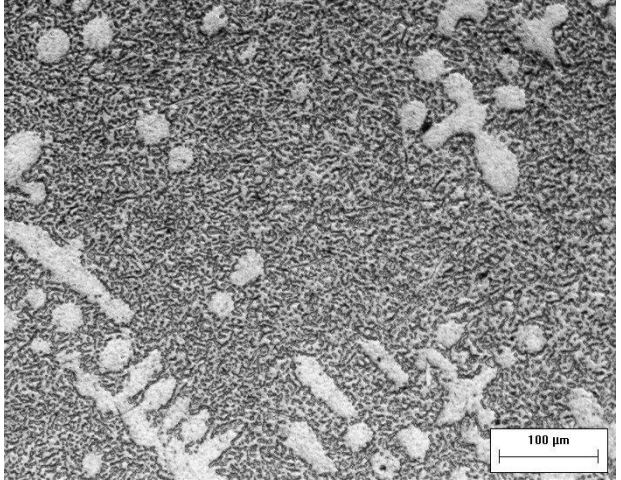
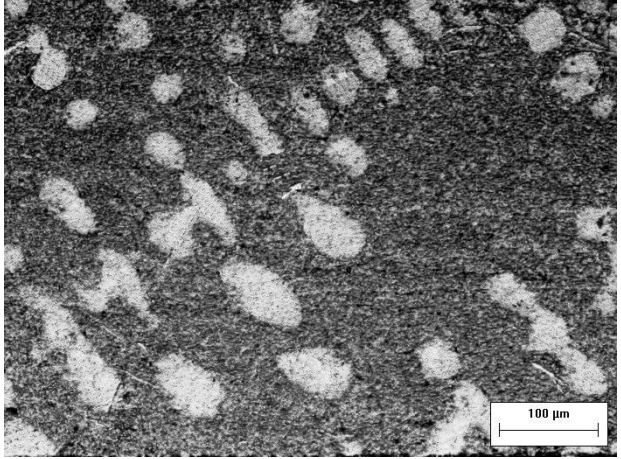
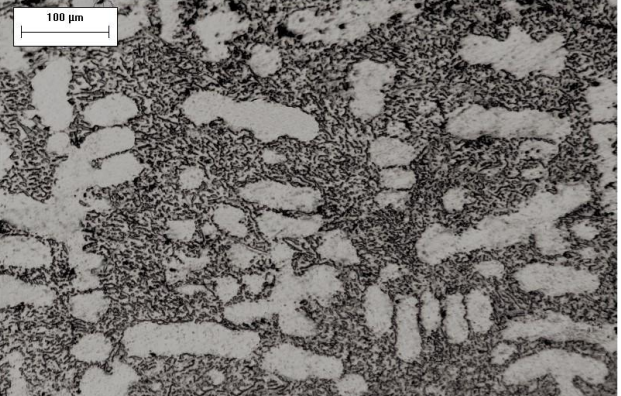
Elemento*	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al
% en peso	11.39	0.3522	0.1487	0.1421	0.1802	0.1724	0.0511	Bal.

La siguiente tabla muestra el análisis metalográfico de la aleación Al-11%Si y la evaluación de los diferentes niveles de modificación medida en la escala AFS.

**Tabla 2.12** Comparación de los diferentes niveles de adición de Sr y su nivel de modificación para una aleación de alto silicio.

Al-11.4%Si		
Nivel residual	Nivel de modificación	Microestructura sin ataque Zona gris claro: matriz Aluminio $\alpha$ Zona gris oscuro: Silicio eutéctico
0%Sr	1	
0.0037%Sr	2	



0.0165% Sr	5	
0.0235% Sr	6	
0.04% Sr	7	



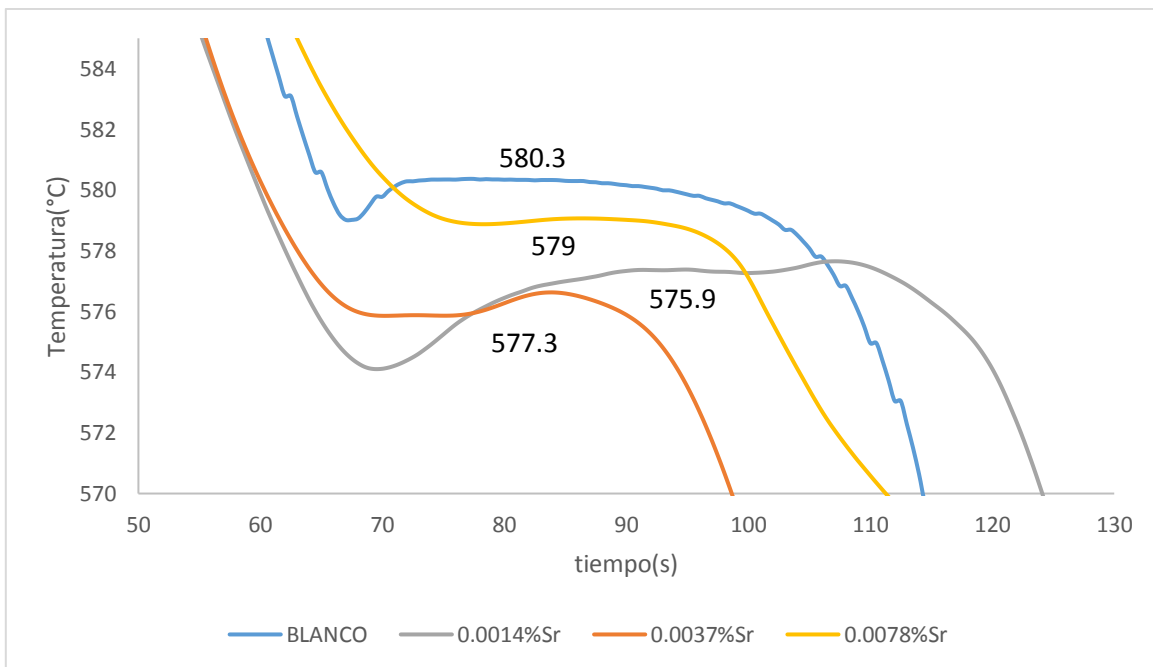
## 2.2 RESULTADOS ANÁLISIS TÉRMICO

Las siguientes gráficas muestran el intervalo de “depresión” de la temperatura eutéctica de cada una de las aleaciones utilizadas a diferentes cantidades de estroncio añadidas.

La Depresión de la Temperatura Eutéctica (DTE) puede ser calculada de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$\Delta T_E = T_{E(\text{sin Sr})} - T_{E(\text{Sr})} = \text{depresión de la temperatura eutéctica}$$

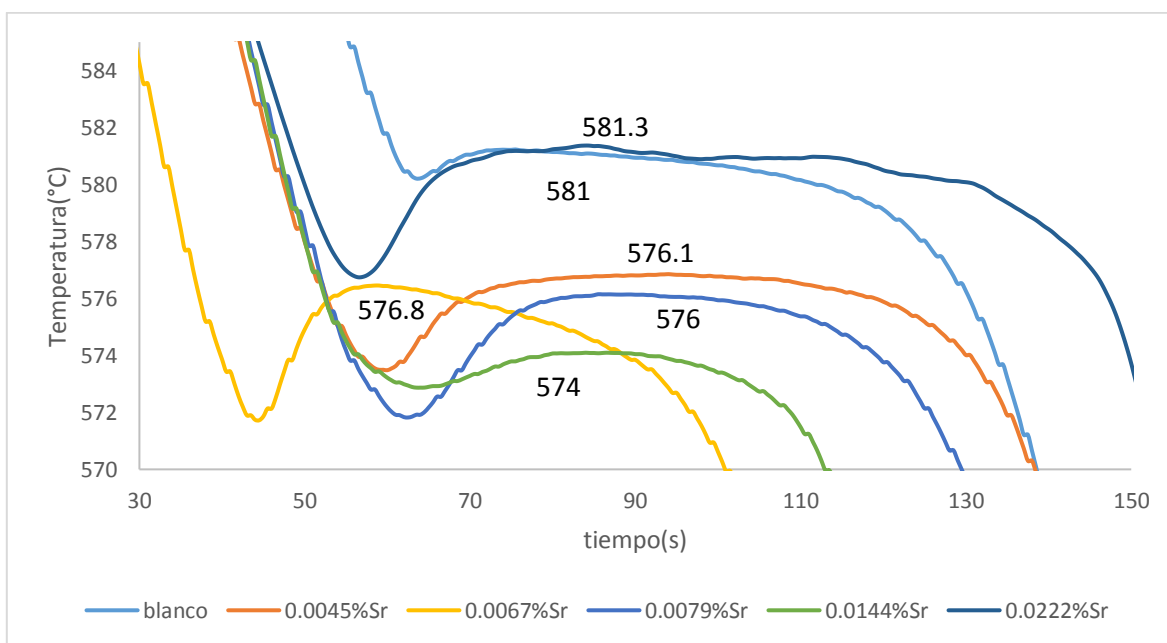
Es la diferencia de temperatura de crecimiento eutéctico entre un material sin modificar y un material modificado con estroncio (Sr)



**Figura 2.1** Muestra las curvas de enfriamiento de la aleación Al-5%Si a diferentes niveles de Sr añadidas.

**Tabla 2.10** Muestra la depresión de la temperatura eutéctica (DTE) de una aleación Al-5%Si

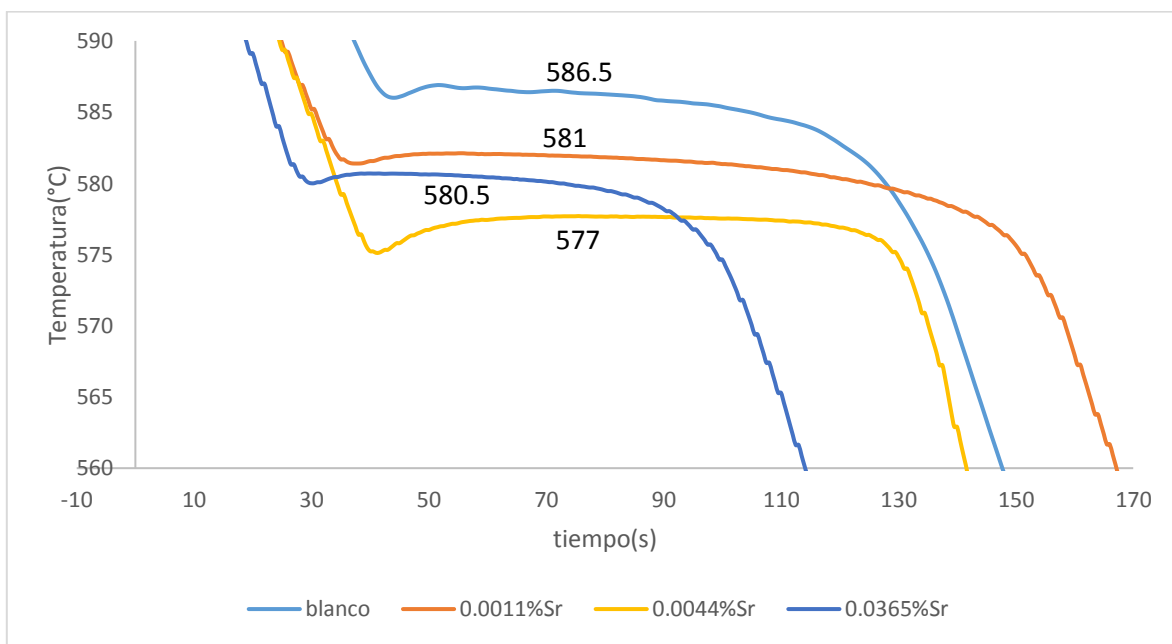
Condición (% Sr)	TE (sin Sr)	TE (con Sr)	DTE	Nivel de modificación
Blanco	580.3	-----	-----	0
0.0014%Sr	-----	577.3	3	2
0.0037%Sr	-----	575.9	4.4	3
0.0078%Sr	-----	579.0	1.3	5



**Figura 2.2** Muestra la “depresión” o disminución de la temperatura eutéctica al adicionar diferentes niveles de Sr en una aleación Al-7%Si

**Tabla 2.11** Muestra la diferencia de la temperatura eutéctica (DTE) de una aleación Al-7%Si

Condición (% Sr)	TE (sin Sr)	TE (con Sr)	DTE	Nivel de modificación
Blanco	581	-----	-----	0
0.0045%Sr	-----	576.1	4.9	2
0.0067%Sr	-----	576.8	4.2	4
0.0079%Sr	-----	576	5	5
0.0144%Sr		574	7	6
0.0222%Sr		581	-0.3	6

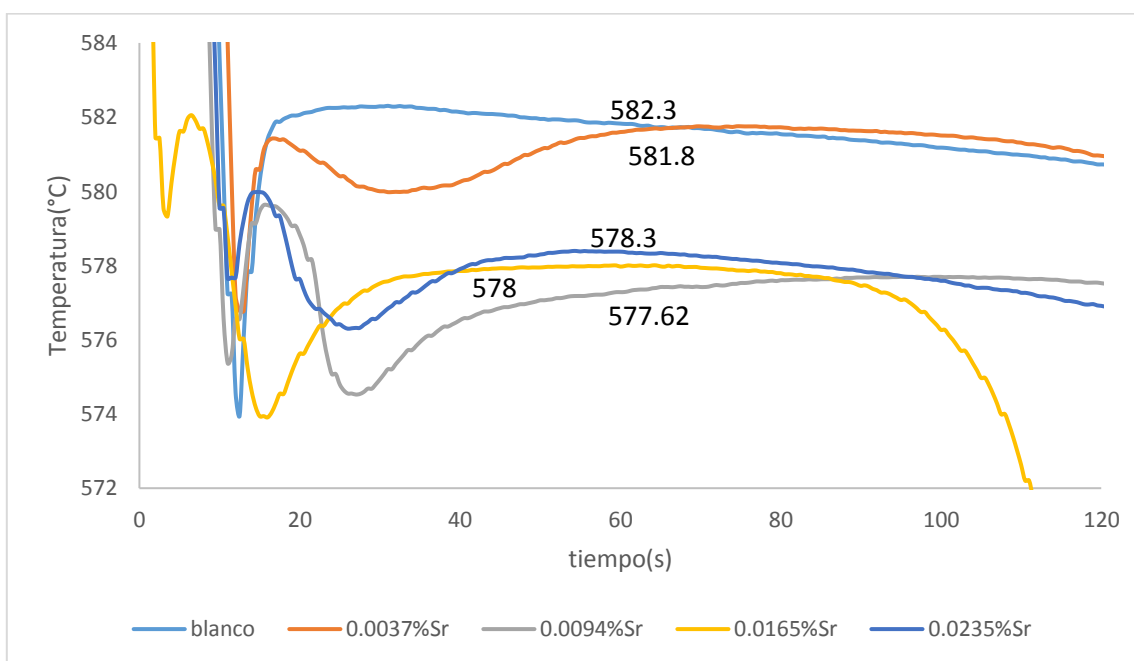


**Figura 2.3** Muestra la “depresión” o disminución de la temperatura eutéctica al adicionar diferentes niveles de Sr en una aleación Al-9%Si

**Tabla 2.12** Muestra la diferencia de la temperatura eutéctica (DTE) de una aleación

Al-9%Si

Condición (% Sr)	TE (sin Sr)	TE (con Sr)	DTE	Nivel de modificación
Blanco	586.5	-----	-----	
0.0011%Sr	-----	581	5.5	2
0.0044%Sr	-----	577	9.5	3
0.0365%Sr		580.5	6	7



**Figura 2.4** Muestra la “depresión” o disminución de la temperatura eutéctica al adicionar diferentes niveles de Sr en una aleación Al-11%Si

**Tabla 2.13** Muestra la diferencia de la temperatura eutéctica (DTE) de una aleación

Al-11%Si.

Condición (% Sr)	TE (sin Sr)	TE (con Sr)	DTE	Nivel de modificación
Blanco	582.3	-----	-----	0
0.0037%Sr	-----	581.8	0.5	2
0.0094%Sr	-----	577.6	4.7	3
0.0165%Sr	-----	578.0	4.3	6
0.0235%Sr		578.3	4	7

### 3.-DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Al encontrar en la bibliografía datos experimentales que reportan como intervalo óptimo de adición de Sr de 0.007%-0.03%Sr, y que si bien se toman como referencia para el experimento, se puede observar tanto en las gráficas como en el análisis metalográfico que en la aleación Al-5%Si con 0.0078%Sr se obtuvo una buena modificación. En comparación con la aleación con alto Silicio (11-12%Si) se necesitó la cantidad de 0.022%Sr para obtener una buena modificación.

Al analizar la cantidad de Silicio con respecto a la cantidad añadida de Sr como modificador los resultados indican que al incrementar la cantidad de Silicio en la aleación, se necesita una mayor cantidad de Sr para obtener una buena modificación, esto se puede observar en la siguiente tabla:

%Si aleación	%Sr sugerido
5-6%	0.0078%-0.01%
7-8%	0.0079%-0.014%
9-10%	0.010-0.02%
11-12%	0.02->0.04%

Para la aleación de 5-6%Si la adición de un intervalo de 0.0078%-0.01%Sr es suficiente para modificar a un nivel deseable en la pieza, para la aleación Al-7%Si de 0.0079%-0.014%Sr para una buena modificación, en cambio para la aleación con 11-12%%Si debe ser de 0.024%Sr para modificar la pieza hasta menos de 0.04%Sr ya que esta presenta una sobremodificación, esto corrobora la hipótesis de que a mayores cantidades de Silicio se necesita una mayor cantidad de modificador para obtener un nivel 5 en la escala AFS.

Se deben considerar ciertos factores ya que la cantidad necesaria puede variar dependiendo:

Técnica de fusión

Composición química de la aleación

Cantidad de material a fundir.

Tiempo transcurrido después del proceso de modificación.

## ANÁLISIS TÉRMICO

Al analizar las gráficas de análisis térmico respecto a la aleación que no tiene Sr se observa una disminución de la temperatura eutéctica o “depresión” a medida que aumenta la cantidad de Sr añadida hasta un punto mínimo (5°C promedio). Al seguir añadiendo Sr la temperatura eutéctica ya no disminuye, y conforme aumentamos la cantidad de Sr en la aleación después del punto mínimo observamos un aumento en la temperatura eutéctica del orden de 2°C, esto se puede observar con cantidades mayores a las necesarias para modificar la aleación.

Esto se debe a que la depresión de la temperatura eutéctica es sólo durante el proceso de modificación de las agujas aciculares de Silicio a partículas globulares finas, una vez que la estructura ya es transformada a partículas finas globulares la “depresión” de la temperatura eutéctica es mínima.

El mecanismo de crecimiento natural (sin la presencia de algún agente modificante) en donde los cristales de silicio crecen en forma de planos gemelos para dar como resultado una estructura con agujas de silicio eutéctico, se ve afectado cuando el Sr se encuentra en el baño líquido. De manera que los átomos de Sr se adsorben en los escalones de crecimiento del silicio (sobre el frente de solidificación o crecimiento sólido-líquido), provocando una estructura eutéctica consistente de  $\alpha$ -Al y silicio en forma fibrosa o globular. En éste sentido, se explica que las temperaturas de nucleación y crecimiento eutéctico se vean deprimidas, pues el mecanismo de crecimiento es modificado y la velocidad de crecimiento es retrasada.

Al añadir demasiado modificador el excedente de modificador reacciona formándose compuestos de  $Al_2Si_2Sr$  observados en las imágenes de Al-9%Si y Al-11%Si con el mayor porcentaje de modificador, que además de disminuir las propiedades mecánicas de la pieza al cambiar la microestructura de la misma, se observan cambios en el comportamiento de la curva de enfriamiento.

Como un análisis general del comportamiento de la temperatura de crecimiento eutéctico ( $T_E$ ) en función del contenido de Sr, se deduce que el uso de éstos parámetros para el control del proceso de modificación utilizando técnicas de análisis térmico al tener tantas variaciones, no es muy recomendable. Ya que, analizando el comportamiento en las curvas de enfriamiento, no se puede asegurar que al tener una depresión eutéctica se tenga una cierta modificación ya que al tener adiciones menores a 0.01%Sr disminuye la temperatura eutéctica para posteriormente volver a subir y después de haberse modificado completamente, mantenerse la temperatura eutéctica invariable, además, al tener una pieza sobremodificada la diferencia de temperatura eutéctica es mínima comparada con la pieza sin modificar.

## 4.-CONCLUSIONES

1.-En las aleaciones Al-Si, al aumentar la cantidad de Silicio se necesita una mayor cantidad de Sr como modificador para llegar a una adecuada modificación (nivel 5 en la escala AFS)

2.-Bajo las condiciones experimentales del presente trabajo, la cantidad sugerida de Sr para obtener aleaciones Al-Si hipoeutécticas grado 5 (bien modificada) en base a la escala AFS utilizadas se presenta a continuación:

<b>%Si aleación</b>	<b>5-6%</b>	<b>7-8%</b>	<b>9-10%</b>	<b>11-12%</b>
<b>%Sr sugerido</b>	0.0078%-0.01%%	0.0079%-0.014%	0.010%-0.020%	0.020%->0.040%

3.-Al analizar el comportamiento de las curvas de enfriamiento podemos determinar si una aleación está modificada dentro de ciertos intervalos, de 0%-0.01%Sr la disminución de la temperatura eutéctica es de hasta 10°C máximo, al añadir un mayor porcentaje de Sr, la temperatura eutéctica aumenta hasta llegar a ser parecida a la aleación sin estroncio, al llegar a este punto, se puede decir que la aleación está sobremodificada.



## REFERENCIAS

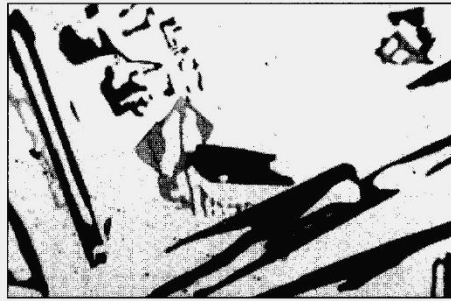
1. Apelian, D. C. (1986). Al-Si processing variables: Effect on grain refinement and eutectic modification. *AFS Transactions*, 797-808.
2. ASM. (1992). *Metals Handbook*. ASM .
3. Bian X., W. W. (2001). Structure factors of modified liquid Al-Si alloys. *Science and Technology of Advanced Materials*, 19-23.
4. Castro P, L. e. (2012). *Metal Actual*. Obtenido de [http://www.metalactual.com/revista/31/materiales\\_aleaciones.pdf](http://www.metalactual.com/revista/31/materiales_aleaciones.pdf)
5. COMALCO. (1997). *Modification of Foundry Al-Si Alloys*. Australia.
6. Dahle A. K., N. K. (2001). Eutectic Nucleation and Growth in Hypoeutectic Al-Si Alloys at Different Strontium Levels. *Metallurgical and Metal Transactions*.
7. Dinsdale T, Q. P. (2004). *Journal Of Materials Science*, 39:7221.
8. E., H. J. (1984). Aluminum properties and physical metallurgy. *ASM*, 1-104,200-241,320-350.
9. Fatahalla N., H. M. (1999). Effect of microstructure on the mechanical properties and fracture of comercial hypoeutectic Al-Si alloy modified with Na, Sb and Sr. *Journal Of Material Science*.
10. Gruzleski J. E., C. B. (1990). The treatment of liquid Al-Si alloys. *AFS*, 1-68,95-157,213-237.
11. Gruzleski, J. E. (1989). Dissolution of Reactive Strontium Containing. *Metallurgical Transactions*, 815-831.
12. Guthy, H. (2002). Evolution of the eutectic microstructure in chemically modified and unmodified aluminum silicon alloys. 34.
13. Hedge S., N. K. (2008). Modification of eutectic silicon in Al-Si alloys. *Springer*, 3009-3027.
14. Heusler L., S. W. (2002). Influence of alloying elements on the thermal analysis results of Al-Si cast alloys. *Journal of Light Metals*.
15. Kauhiero N., D. K. (2001). Determination of eutectic solidification mode in Sr modified hypoeutectical-Si alloys by EBSD. *Materials Transactions*, 207-214.
16. Kory S. A., M. B. (2000). Development of an efficient grain refiner for Al-7Si alloy and its modification with strontium. *Materials Science and Engineering*, 94-104.

17. M. Gustavo, E. (2013). *Facultad de Ingeniería*. Obtenido de [http://www.ing.unlp.edu.ar/catedras/M0624/descargar.php?secc=0&id=M0624&id\\_inc=2717](http://www.ing.unlp.edu.ar/catedras/M0624/descargar.php?secc=0&id=M0624&id_inc=2717)
18. M. Timpel, N. W. (2012). The role of Strontium in Aluminum-Silicon Alloys. *Acta Materialia*, 3920-3928.
19. Miresmaeili, S. (2005). Oxidation of liquid Al-7Si Alloys Containing Strontium and Magnesium. *Metals*, 24.
20. Müller Arno, G. W. (1969). *Alemania Patente nº 3,442,665*.
21. Murray J. L., M. A. (1984). The Al-Si (Aluminum-Silicon) System. *Springer Bulletin of Alloy Phase Diagrams*, 74-84.
22. N. Kauhiro, K. D. (s.f.). Determination of eutectic solidification mode in Sr modified hypoeutectic Al-Si.
23. Ogris E, W. A. (2004). *Journal Of Light Metals*, 2:263.
24. R. DasGupta, C. G. (1988). Analysis of overmodified A356 aluminum alloy. *AFS Transactions*, 297-310.
25. SAPA. (s.f.). *Sapagroup.com*. Obtenido de SAPA: <http://www.sapagroup.com/es/extrusions-argentina/el-aluminio/>
26. Shabestari S. G., G. S. (2007). Assessment of modification and formation of intermetallic compounds in aluminum alloy using thermal analysis. *Materials Science and Engineering*, 150-158.
27. Shu Zu-Lu, A. H. (1995). Modification of Al-Si alloys: Microestructure, Thermal Analysis and Mechanisms. *Journal Of Materials*, 38,39.
28. Stuart D. McDonald, A. K. (2004). Eutectic Grains in Unmodified and Strontium Modified Hypoeutectic Aluminum- Silicon Alloys. *Metallurgical and Metal Transactions*.
29. Talaat, B. H. (2000). Solidification Mechanism of Unmodified and Modified Al-Si Alloys. *Materials Transactions*.
30. Trejo E., E. (2007). *Estudio de los parámetros de la solidificación eutéctica en compósitos colados Al-7Si-SiCp modificados con Sr*. México: UNAM.
31. Wang J, H. S. (2002). *Material Science Engineering*, A338:101.
32. Wang L., S. S. (1995). Strontium modification of aluminium alloy castings in the expendable pattern casting process. *Journal of Materials Science*, 1584-1594.
33. Xiang Chen, H. G. (2006). Study on the eutectic modification level of Al-7Si Alloy by computer aided recognition of thermal analysis cooling curves. *Materials Science and Engineering*, 283-289.

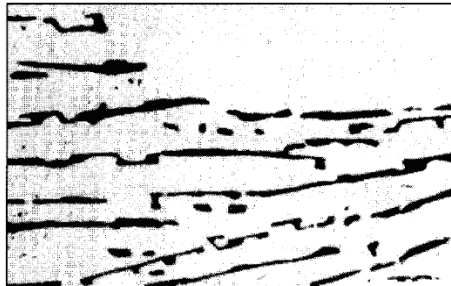
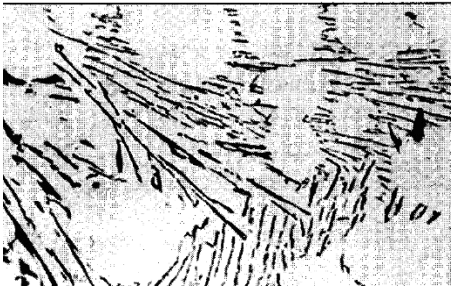
## ANEXO 1

### Patrón de modificación

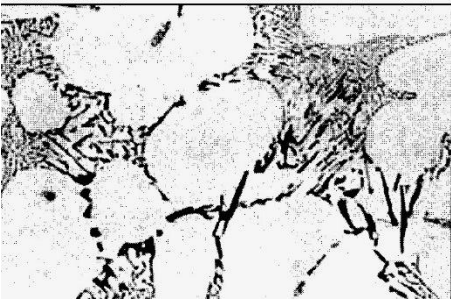
(Tenekedjiev N., 1995)



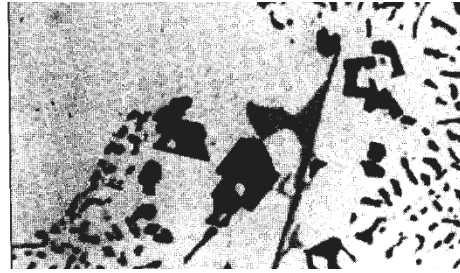
**Nivel 1:** Estructura sin modificar. El silicio está presente como láminas largas, gruesas y de forma acicular.



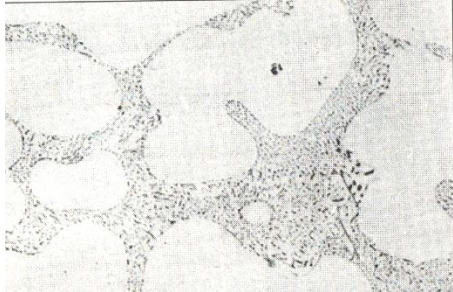
**Nivel 2:** Estructura mal modificada. El silicio está presente en su mayoría en forma de láminas finas y también de forma acicular.



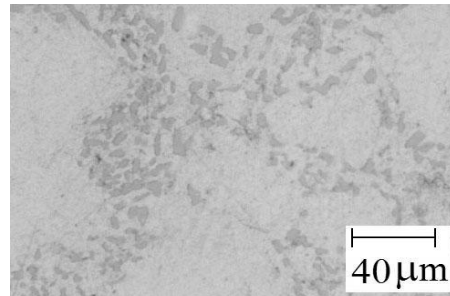
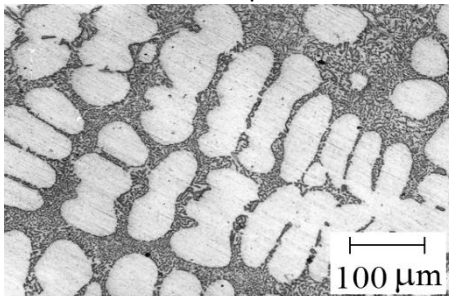
**Nivel 3:** Estructura ligeramente modificada. La estructura laminar empieza a romperse en pequeñas partes, aunque todavía existen algunas estructuras aciculares.



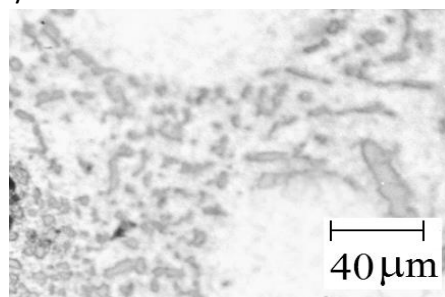
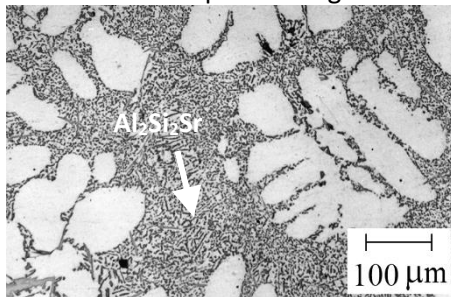
**Nivel 4:** Estructura suficientemente modificada. La estructura laminar se ha fracturado completamente, pero pequeñas cantidades de fase acicular permanecen.



**Nivel 5:** Estructura bien modificada. El silicio está presente en forma de partículas fibrosas redondeadas.



**Nivel 6:** Estructura supermodificada. El silicio está presente en forma de partículas globulizadas muy finas



**Nivel 7:** Estructura sobremodificada. El silicio está presente como una mezcla de partículas gruesas y finas y partículas de  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{Sr}$ .