



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
FACULTAD DE QUÍMICA**

**MODIFICACIÓN DE ALEACIONES AL-SI COLADAS EN  
MOLDE SEMIPERMANENTE**

**T E S I S A**

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

**P R E S E N T A**

**ARTURO BENJAMÍN LÓPEZ BECERRIL**



**Ciudad Universitaria, CDMX, 2023**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

**JURADO ASIGNADO:**

<b>PRESIDENTE:</b>	<b>Profesor: García Hinojosa José Alejandro</b>
<b>VOCAL:</b>	<b>Profesor: Amaro Villeda Adrián Manuel</b>
<b>SECRETARIO:</b>	<b>Profesor: Aranda Villada Victor Antonio</b>
<b>1er. SUPLENTE:</b>	<b>Profesor: Escobar Mejía Luis Darío</b>
<b>2° SUPLENTE:</b>	<b>Profesor: Ruiz Tamayo Agustín Gerardo</b>

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA: FACULTAD DE QUIMICA, CONJUNTO D. UNAM.**

**ASESOR DEL TEMA:**

\_\_\_\_\_  
**DR. JOSÉ ALEJANDRO GARCÍA HINOJOSA**

**SUSTENTANTE:**

\_\_\_\_\_  
**ARTURO BENJAMÍN LÓPEZ BECERRIL**

# Agradecimientos

El haber llegado a esta etapa de mi vida me genera una gran satisfacción personal por concluir un largo camino de varios años, aquel que en muchos momentos dude el poder llegar a la meta, que simplemente puedo decir “no fue fácil”, pero al final la perseverancia demostró que pude culminar. Tengo que admitir que no hubiera podido ser posible sin el apoyo de muchas personas, gracias:

A Dios por haberme acompañado en el camino, por apoyarme en los caminos mas rocosos que he presenciado y a quien le debo todo mi comprensión y capacidad en la escuela y en mi vida, por demostrarme el valor que tengo como persona.

A mi asesor el Dr. José Alejandro Garcia Hinojosa, por todo su apoyo y seguimiento brindando a lo largo del desarrollo de este proyecto, por clases, asesorías y apoyo para mi desarrollo como futuro profesionista.

A la UNAM y a la Facultad de Química, por ser la institución que me ha formado como un profesionista con ética, competitividad y capacidad para desarrollarme en los diversos campos en los que aplique mi carrera.

A mis padres, Karina Becerril y Fabian López, y mi hermano Sebastián, por el apoyo moral y los consejos brindados, por todo su esfuerzo para brindarme el soporte necesario para que yo pudiera finalizar mi carrera y por ser una motivación para mí cada día de mi vida.

Finalmente, a mis amigos, por brindar el apoyo en para sobrellevar la carga escolar en cada clase, por cada trabajo compartido, por las alegrías y por todas las risas que gracias a ellas la escuela fue un lugar gran cariño que permanecerá hasta el final.

## Índice

1. Introducción y Fundamentos .....	1
1.1. Solidificación.....	3
1.2 Aleaciones Aluminio – Silicio .....	4
2. Objetivos generales y particulares. ....	6
3. Procedimiento. ....	7
4. Marco teórico.....	8
1.3. Modificación.....	8
1.3.1. Morfología del silicio.....	9
1.3.2. Dendritas.....	10
1.4. Mecanismo de modificación.....	12
1.4.1 Modificación química.....	13
1.4.2. Modificación térmica.....	14
1.5. Efecto de la modificación sobre las propiedades mecánicas.....	15
1.6. Efecto de la rapidez de enfriamiento en el espacio interdendrítico secundario. ....	17
4. Resultados. ....	18
5. Discusión.....	51
6. Conclusiones.....	63
7. Referencias .....	65

## Índice de tablas

Tabla 1. Nomenclatura a las aleaciones de aluminio y su principal elemento aleante. ....	4
Tabla 2. Variación del % de elongación y dureza, en función del tipo de molde para la aleación A356.....	15
Tabla 3. Propiedades mecánicas de la aleación Al-7Si-0.3Mg.....	16
Tabla 4. Valores de propiedades mecánicas obtenidas posteriores a la aplicación de los tratamientos de agitación, refinación de grano y modificación.....	19
Tabla 5. Composición química de la aleación A356 (w%).....	20
Tabla 6. Composición química de las aleaciones utilizadas en el estudio (Sr en ppm). ....	26
Tabla 7. Composición química de la aleación A356.2 utilizada por Samuel A. [9].	28
Tabla 8. Valores promedio de la rapidez de enfriamiento obtenidos con la medición de SDAS a distintos contenidos de Sr.....	32
Tabla 9. Composición química de las aleaciones experimentales utilizadas. ....	34
Tabla 10. Composición química de aleación Al -7Si-0.3Mg y Al -7Si-0.3Mg +0.4 La. ....	37

## Índice de figuras

Figura 1. Proceso de solidificación y formación de granos. Imagen obtenida de: <a href="https://neetescuela.org">https://neetescuela.org</a> .....	3
Figura 2. Diagrama de fases de la aleación binaria Al-Si.....	5
Figura 3. Microestructura de aleación Al-Si: a) Si eutéctico sin modificar; b) Si eutéctico modificado; c) Imagen de Sr-modificada obtenida por SEM y atacada....	9
Figura 4. Nivel de modificación para aleaciones hipoeutécticas Al-Si basado en AFS. ....	10
Figura 5. Microestructura de aleación Al-Si, mostrando las dendritas de la fase primaria $\alpha$ (Al).....	11
Figura 6. Variación de las propiedades mecánicas (UTS resistencia a la tensión y % de elongación %E) en función del SDAS para diferentes condiciones de la aleación A356. [4].....	11
Figura 7. Microestructura de A356 con modificador y refinador de grano. ....	19
Figura 8. Pieza utilizada en el estudio con distintos espesores (6). ....	20
Figura 9. Influencia de espesor de las paredes y arenas moldeo en la resistencia a la tensión.....	21
Figura 10. Efecto del espesor de pared y tipo de arenas del molde en el espacio interdendrítico, modificada con 0.035% de Sr en la aleación A356.....	22
Figura 11. Molde permanente utilizado para la obtener piezas en el estudio.....	24
Figura 12. Microestructura obtenida a 0.04% de Ti y 0.03% de Sr a temperatura de molde de 230°C.....	25
Figura 13. Microestructura de la aleación A356: a) DC aleación base b) DC1 c) DC2 d) DC3.....	26
Figura 14. Microestructura de la aleación A356: a) SC aleación base b) SC1 c) SC2 d) SC3. ....	27
Figura 15. Microestructuras refinadas con diferentes aleaciones maestras: a)-d) Al-5Ti-1B, e)-h) Al-2.5Ti-2.5B y i)-l) Al-4B, y modificadas con 30 y 200 ppm de Sr. ...	29
Figura 16. Efecto de la temperatura del tratamiento de envejecimiento para la aleación 356 y 319 con contenido de intermetálicos a) $\beta$ (1%Fe) y b) $\alpha$ (1%Fe-0.4%Mn). Para aleaciones sin modificar y modificadas. ....	31
Figura 17. Microestructura de la aleación AlSi7Mg0.3 modificada con 170 ppm de Sr obtenida a 429 (a) y 857 Pa/s (b) de presión.....	33
Figura 18. Microestructura detallada de una laminilla de aleación Al-7Si preparada a una velocidad de rotación de 30 m/s.....	35
Figura 19. Microestructura detallada de una laminilla de aleación Al-7Si preparada a una velocidad de rotación de 50 m/s.....	36

Figura 20. Microestructura de colada convencional de Al-7Si-0.04Sr.....	36
Figura 21. Curvas de enfriamiento para a) Al-7Si-0.3Mg y b) Al-7Si-0.3Mg + 0.4% La. ....	38
Figura 22. Microestructura del silicio eutéctico en Al-7Si-0.3Mg a) con modificación y b) con modificación 0.4% La, a distintas velocidades de enfriamiento. ....	39
Figura 23. Longitud y radio promedio del Si eutéctico en la aleación Al-7Si-0.3Mg y Al-7Si-0.3Mg + 0.4% La, para diferentes rapidezces de enfriamiento, ....	39
Figura 24. Efecto del contenido de Sr y de la velocidad de enfriamiento sobre la temperatura de crecimiento eutéctica, $T_G$ . ....	41
Figura 25. Microestructuras de la fase eutéctica de Si: a) 2 ppm Sr 5.89 °C/s, b) 2 ppm Sr 0.14 °C/s, c) 31 ppm Sr 5.89 °C/s, d) 37 ppm Sr 0.14 °C/s, e) 154 ppm Sr 5.89 °C/s, f) 223 ppm Sr 0.14 °C/s. ....	42
Figura 26. Influencia del contenido de Sr y la rapidez de solidificación sobre las características morfológicas en el Si eutéctico.....	44
Figura 27. Efecto del espesor y la modificación en muestras coladas en molde de arena: a) 3 mm sin modificación, b) 9 mm sin modificación, c) 3 mm modificada Sr,) 9 mm modificada Sr.....	45
Figura 28. Efecto del espesor y modificación en muestras coladas en molde metálico: a) sin modificación, b) con modificación Sr. ....	46
Figura 29. Aspectos geométricos de partículas en función del SDAS: a) partículas por área b) diámetro promedio. ....	47
Figura 30. Propiedades mecánicas en función de SDAS: a) último esfuerzo de tensión-UTS y b) % de elongación. ....	47
Figura 31. Microestructura de aleación Al-Si-Cu-Mg: a) molde a 95°C, b) molde a 200°C, c) molde a 95°C con tratamiento de envejecimiento 180°C, c) molde a 200°C con tratamiento de envejecimiento a 180°C.....	48
Figura 32. Variaciones microestructurales de las partículas de silicio obtenidas por A95°C y A200°C: a) tamaño promedio de las partículas, b) cantidad de partículas, c) radio promedio de las partículas. ....	49
Figura 33. Variación del espacio interdendrítico secundario (SDAS) con temperatura de molde a 95°C y a 200°C, desde la pared del molde. ....	50

# 1. Introducción y Fundamentos

El enfoque del presente trabajo está dirigido al efecto que se produce por un cambio en las condiciones de solidificación asociadas a determinadas zonas donde puede haber un tipo de molde y otro que sea distinto, en este caso molde semipermanente. Dadas sus características las únicas aleaciones que son perceptibles de modificar son las aleaciones Al-Si, las cuales son ampliamente utilizadas en varios campos de aplicación, desde la automotriz, aeronáutica, naval, por mencionar solo algunas. Su alta, y amplia, demanda es debido a las condiciones que pueden ofrecer estos materiales, llegando a tener propiedades similares, con la aplicación de ciertos tratamientos, que presentan materiales de tipo ferrosos como los hierros colados o aceros, pero con una ventaja importante en cualquier área, el peso.

Justamente en la elaboración de diversos componentes, y debido a que comienza a sustituir a otros componentes metálicos, el uso de este metal se va dirigiendo hacia piezas cada vez más complejas, aquellas que presentan formas irregulares o zonas donde el flujo del metal sea lento para llenar las cavidades. Las aleaciones Al-Si de fundición pueden ser coladas en moldes metálicos y moldes de arena, cada molde tiene ciertas particularidades. El fenómeno físico es el llenado de una cavidad dentro de un molde en el cual el líquido adopta la forma y posteriormente la mantiene. La solidificación es la extracción de calor a modo que el material cambie de una fase líquida a una fase sólida mediante la disminución de temperatura. Un material puede extraer el calor de forma más rápida que otros dependiendo de sus características de transferencia de calor, esto se interpreta mediante la rapidez de enfriamiento la cual puede ser alta o baja.

La velocidad de enfriamiento es una variable sumamente importante para las aleaciones de Al-Si, a través de ella es posible predecir una microestructura final para el caso de una pieza que sea obtenida por el proceso de fundición. Una velocidad de enfriamiento baja produce estructuras bajo las cuales las propiedades mecánicas de la aleación son menores y se incrementan a mayores velocidades de

enfriamiento. Ya se mencionó que el material del molde es lo que controla en gran medida como será la estructura de la pieza final, y dado que como se ha comentado, cada vez en mayor medida se han solicitado piezas que tienen una forma y secciones más complejas. Para piezas que requieran una cavidad interna se requiere un molde constituido por 2 componentes, el primer componente es el molde permanente que da la forma a toda la pieza por lo general es fabricado de acero, y la parte interna del molde por lo general es una sección extra que debe añadirse manualmente, estos son los llamados corazones y se encuentran hechos de arena, conformando así un molde semipermanente.

Debido a que el molde está constituido por 2 materiales, los efectos producidos por la velocidad de solidificación son distintos. La zona que se encuentra aleada al corazón presenta una velocidad de enfriamiento lenta y en el área que se encuentra en contacto con las paredes metálicas se espera que la velocidad de enfriamiento sea mayor. En el caso particular, el efecto de los tratamientos de refinación y modificación puede presentarse parcialmente en una cierta región y en otra no dando como resultado una pieza con propiedades heterogéneas en distintas áreas.

Cuando se aplica a moldes semipermanentes el tratamiento de modificación en aleaciones de las series 3xx.x y 4xx.x se presenta cambio en la morfología acicular del silicio, afectada al mismo tiempo por la velocidad de enfriamiento, y que también impacta en el espacio interdendrítico secundario (SDAS).

## 1.1. Fundición.

La fundición es un proceso de manufactura el cual consiste en llevar el material de interés, en este caso aluminio, al estado líquido. Posteriormente, el metal líquido es vaciado en un molde con una cavidad para adoptar la forma del objeto deseado. El metal se conserva dentro del molde hasta que el calor haya sido extraído y pase a su estado sólido.

Existen distintas variantes del proceso, ya sea al cambiar el material del molde, la manera en que es introducida el metal o parámetros del proceso como puede ser temperatura de colada, velocidad de llenado, temperatura de fusión, etc.

## 1.2. Solidificación.

La solidificación es una transformación del estado líquido al estado sólido. Este proceso está caracterizado por un cambio estructural y de composición localizada, por esto, conocer sobre el proceso de solidificación es esencial para obtener control sobre los procesos de fabricación de piezas de fundición.

La solidificación involucra dos etapas: nucleación y crecimiento. La primera etapa es la de formar el núcleo con un tamaño específico (radio crítico) que garantiza su estabilidad en el medio líquido. Este proceso requiere de una alta cantidad de energía. Existen 2 tipos de nucleación: homogénea y heterogénea. La primera es más complicada que se efectuó, debido a que tendría que ser en condiciones de pureza total y con soluciones solidas o fases puras, por otra parte, la presencia de partículas extrañas en el baño en las paredes del molde, actúen como sitio de nucleación, por lo que en los procesos comerciales siempre está presente la nucleación heterogénea, el proceso se ejemplifica en la figura 1. [1]



Figura 1. Proceso de solidificación y formación de granos. Imagen obtenida de: <https://neetescola.org>

### 1.3. Aleaciones Aluminio – Silicio

El aluminio puede tener múltiples elementos con el cual puede alearse y tener un determinado tipo de aleación. Existe una clasificación que lo agrupa de acuerdo con el elemento aleante principal, entre los cuales se puede encontrar Si, Cu, Zn, Mg, entre otros más, cada elemento recibe una designación la cual se presenta en la tabla 1. Cada una tiene aplicaciones diferentes y también tratamientos distintos en su proceso de fabricación, ya que solo las aleaciones Al-Si (series 3xx.x y 4xx.x) son susceptibles de modificarse, este trabajo tiene enfoque en estas aleaciones.

Tabla 1. Nomenclatura a las aleaciones de aluminio y su principal elemento aleante.

<b>Aleación</b>	<b>Designación</b>
Aluminio puro, 99% min	1xx.x
Aluminio – Cobre	2xx.x
Aluminio – Silicio y Cobre; Silicio y Magnesio	3xx.x
Aluminio – Silicio	4xx.x
Aluminio – Magnesio	5xx.x
Sin usar	6xx.x
Aluminio – Zinc	7xx.x
Otros elementos	8xx.x

La particularidad y razón de esta aplicación se encuentra en el diagrama de fases Al-Si. En él se presentan una solución sólida conocida como  $\alpha$  donde el aluminio puede contener una mínima cantidad de Si en solución. Superando este valor límite de silicio contenido, se precipita la mezcla eutéctica Al + Si. El Si eutéctico tiene morfología acicular tipo placas largas. La cantidad relativa de este microconstituyente depende de la cantidad de silicio que contenga la aleación en particular. De acuerdo con el diagrama de fases Al-Si, mostrado en la Figura 2, el punto eutéctico se encuentra en el valor de 12.6% de silicio en la aleación de aluminio, por lo que aleaciones que se encuentren cercanas a este valor tendrán un mayor contenido de eutéctico en su estructura.

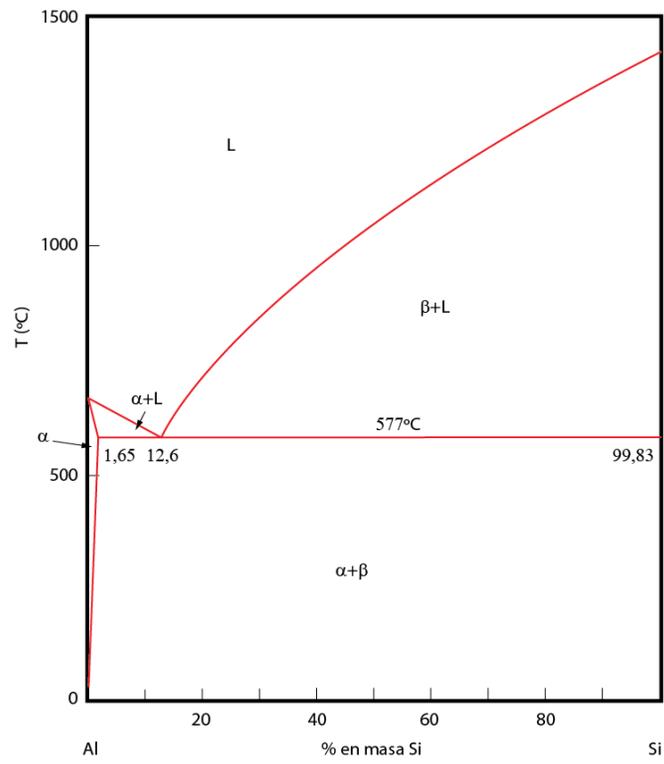


Figura 2. Diagrama de fases de la aleación binaria Al-Si.

## 2. Objetivos generales y particulares.

- ❖ Determinar el efecto de distintas rapidezces de enfriamiento locales de un molde semipermanente constituido por una matriz metálica y un corazón de arena.
  - Proponer un valor de contenido de Sr en la composición química para lograr una estructura homogéneamente bien modificada con distintas rapidezces de enfriamiento locales como lo son los moldes semipermanentes.
  - Evaluar los efectos que puedan producir la presencia algún otro elemento dentro de la composición química de la aleación sobre el cambio del silicio eutéctico.

### 3. Procedimiento.

Para la compilación de información, resultados y efectos de análisis se recurrió a la consulta de diversas fuentes. No se realizó una secuencia específica sin embargo cada fuente aporta información de relevancia para el desarrollo de este trabajo.

- Libros

Los libros de consulta aportan definición y objetividad a algunos conceptos que son aplicados en el desarrollo del trabajo. La mayoría de estas fuentes no son totalmente explícitos en un tema por lo que la búsqueda enfoca temas relacionados con el aluminio y sus aleaciones, pudiendo agregar procesos aplicados y estudio de componentes.

- Tesis

Las tesis consultadas para este trabajo de investigación aportan enfoque para el apartado de fundamentos teóricos. La búsqueda y consulta de estas es determinada por el enfoque de estudio, preferentemente relacionadas con el tema de modificación y algunos efectos en velocidades de enfriamiento.

- Artículos

Los artículos consultados para el desarrollo del trabajo aportan resultados y análisis desde distintos puntos de vista. La consulta de diversos escritos de este tipo de fuente es con el enfoque las condiciones de trabajo o el objetivo de estudio donde se encuentra implícito la modificación, y el efecto algunos parámetros como la velocidad de enfriamiento, para las aleaciones de Al-Si de las series 3xx.x y 4xx.x.

## 4. Marco teórico.

Las aleaciones a las que se puede aplicar el tratamiento de modificación son las aleaciones Al-Si. El tratamiento tiene una gran relevancia para mejorar las propiedades mecánicas correspondientes a la aleación, el cual es el objeto de estudio en el presente trabajo.

### 4.1. Modificación.

La modificación es un tratamiento que se aplica al metal en estado líquido de las aleaciones Al-Si mediante la adición de algún elemento químico, de manera más común el Sr. Su razón de aplicación es debido a las características de estas aleaciones mencionadas en el punto anterior. Para el caso de las aleaciones Al-Si, el punto de partida comienza en tener dos microconstituyentes en la estructura, la fase eutéctica como la que posee una mayor resistencia y dureza comparada con la fase  $\alpha$  que es blanda y con mayor ductilidad.

La fase eutéctica tiene 2 aspectos que deben considerarse, la morfología del silicio que se encuentra dentro de ella y, además, que esta fase precipita en las zonas interdendríticas.

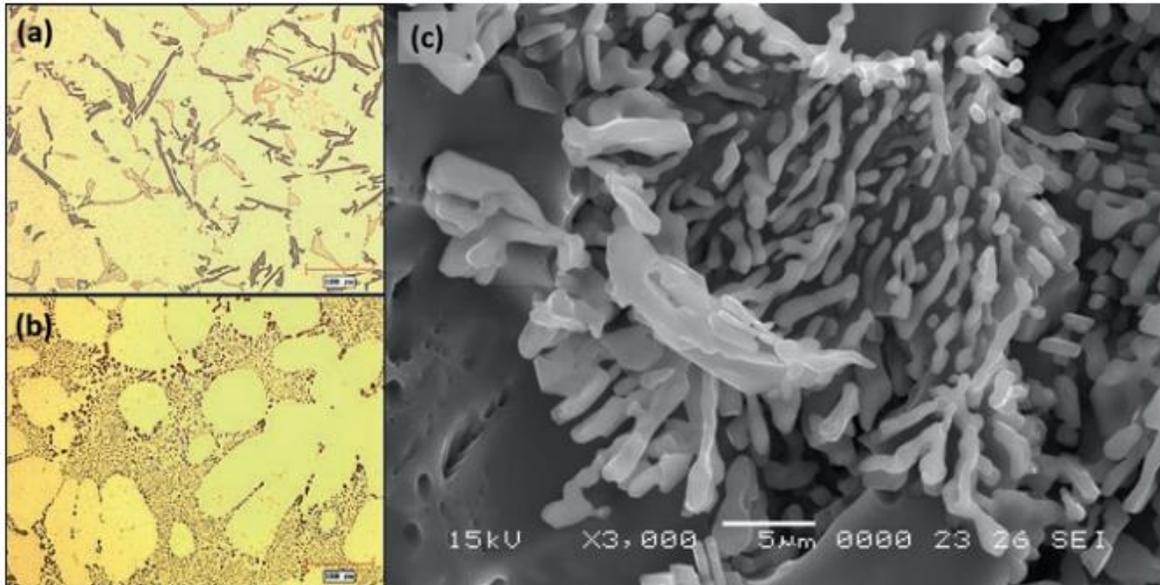


Figura 3. Microestructura de aleación Al-Si: a) Si eutéctico sin modificar; b) Si eutéctico modificado; c) Imagen de Sr-modificada obtenida por SEM y atacada.

#### 4.1.1. Morfología del silicio.

La morfología del silicio es un factor fundamental en el aspecto de las propiedades mecánicas. Si una aleación de Al-Si es colada sin aplicar ningún tratamiento el silicio precipita en forma de placas largas, llamada morfología acicular, con aspecto de agujas. Obtener esta morfología es dañino debido a que la forma del silicio actúa como concentrador de esfuerzos y puede provocar que la pieza sufra de una fractura, y por ende no desempeñe las propiedades que son requeridas comúnmente para este tipo de aleación. La modificación logra que la forma del silicio sufra un cambio, logrando una forma más globular, reduciendo la fragilidad del componente. Observando la Figura 3, se muestran los dos escenarios en los que se pueden presentar la microestructura de una aleación Al-Si, en el apartado a la fase eutéctica se encuentra sin modificar, en el apartado b después de un tratamiento de cambio en la morfología de la fase. La manera común de evaluar el nivel de modificación es realizando una inspección comparativa con el nivel modificación establecido por la AFS, el cual se muestra en la figura 4.

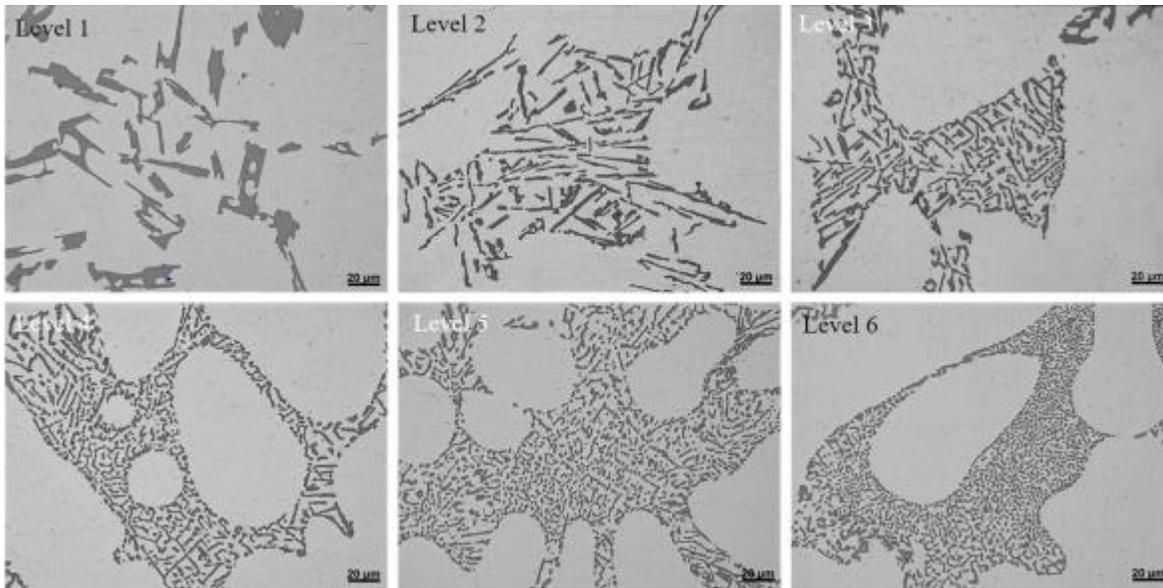


Figura 4. Nivel de modificación para aleaciones hipoeutécticas Al-Si basado en AFS.

#### 4.1.2. Dendritas.

La fase eutéctica precipita en zonas llamadas interdendríticas, el líquido remanente se va segregando hasta ir formando esta forma particular. La Figura 5 muestra la microestructura de una aleación Al-Si, las zonas blancas es fase  $\alpha$  de Al y es la primera fase que se forma directamente del líquido por debajo de la temperatura de líquidus por nucleación y crecimiento, dando origen a las dendritas. El aspecto importante se encuentra en el tamaño del espacio de separación entre las dendritas. Cuando el tamaño del espacio interdendrítico secundario (SDAS) es muy grande las propiedades mecánicas tienden a disminuir. Por el caso contrario, si el SDAS es de un tamaño menor, se obtienen propiedades mecánicas mayores. Eso se puede observar gráficamente en la Figura 6.

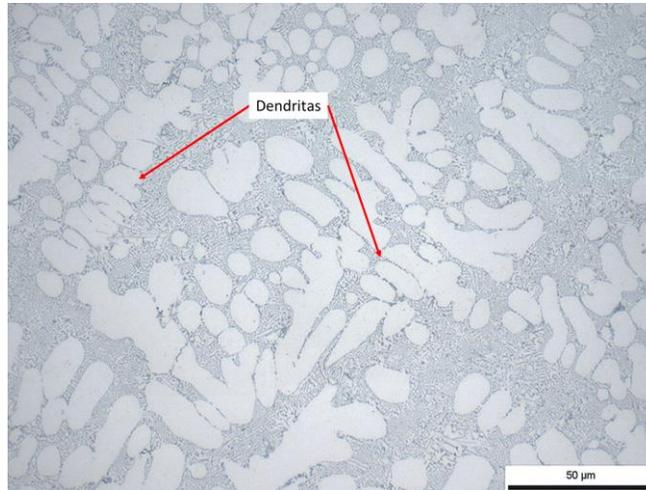


Figura 5. Microestructura de aleación Al-Si, mostrando las dendritas de la fase primaria  $\alpha$ (Al).

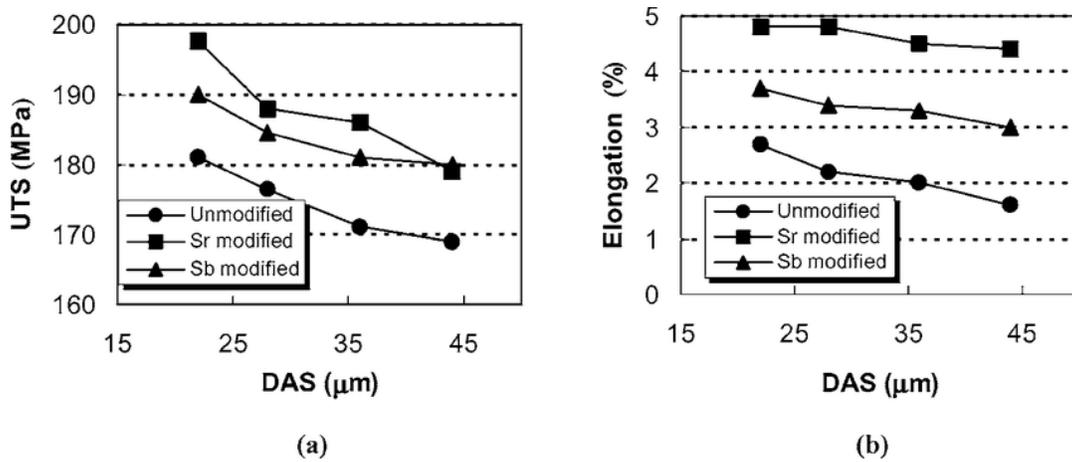


Figura 6. Variación de las propiedades mecánicas (UTS resistencia a la tensión y % de elongación %E) en función del SDAS para diferentes condiciones de la aleación A356. [4]

## 4.2. Mecanismo de modificación.

El mecanismo de modificación comprende diversas etapas, las cuales parten de la formación del Si eutéctico durante la solidificación, así como del crecimiento de dendritas primarias. Cuando las dendritas chocan entre ellas durante el crecimiento, su movilidad se restringe y permite el transporte de masa a través de los espacios interdendríticos. No se conoce con exactitud el mecanismo exacto de la modificación, pero es sabido que uno de los principales factores en el cambio de la morfología del silicio eutéctico radica en la variación de la tensión y energía interfacial de este. [2]

Se han planteado algunas teorías que busquen explicar con detenimiento cual es el efecto producido durante la modificación, algunos mecanismos planteados son:

- Un análisis térmico realizado en las aleaciones que sufrieron modificación mostró un abatimiento de la temperatura eutéctica, así como la temperatura de formación de Si primario (rango de 5 a 10°C). La técnica mostro que el abatimiento de estas temperaturas es mayor a niveles de modificación altos.
- Impurezas que provocan la generación de planos gemelados de Si, lo cual no es observable en el caso de la modificación térmica, a comparación de la modificación química.

Considerando los puntos anteriores, se observa que la nucleación y crecimiento de Al y Si se llevan a la par, en el mismo tiempo. El cambio en la morfología del Si se atribuye a factores que afectan la nucleación o el crecimiento del Si eutéctico. [2]

Existen 2 formas en las cuales puede efectuarse la modificación, una de ellas es la modificación química mediante la adición de algún elemento en particular y otra que está relacionada con el enfriamiento, llamada modificación térmica

#### 4.2.1. Modificación química.

La modificación química ocurre con la adición de algún elemento en particular que afectará en el crecimiento de las partículas de Si. Los dos principales elementos que son utilizados como agentes modificadores son el sodio (Na) y el estroncio (Sr). El Na por mucho tiempo ha sido utilizado como agente modificador dado que cumple su objetivo con resultados positivos, sin embargo, su tratamiento debe ser muy cuidadoso ya que es un elemento extremadamente reactivo y su mal trato puede ocasionar serios problemas. Por ello el elemento que es ahora el más comúnmente utilizado en la industria es el Sr.

Debido a que el Sr tiene menor reactividad, la adición de este elemento es un método fiable al añadirlo al aluminio líquido. La recuperación es alta y se reduce la pérdida durante el proceso de fusión de manera importante comparado con el sodio. Además, cuando el lingote de aluminio modificado previamente con estroncio se vuelve a fundir, existe una aceptable retención del estroncio [3].

Puede conseguirse la modificación completa de una aleación con un nivel de estroncio residual de alrededor de 0.01% y algunas pruebas han demostrado que se consigue la modificación completa con tan solo 0.005%. Sin embargo, generalmente se añade aleación maestra Al-Sr para aportar del 0.02 al 0.04% de estroncio a la aleación.

El contenido de silicio de la aleación y la velocidad de solidificación de la pieza puede influir el nivel residual de estroncio necesario para alcanzar la modificación total del silicio eutéctico. Por la naturaleza en que el metal conduce más rápido el calor, la rapidez de solidificación en las piezas de molde permanente es generalmente superior a la de las piezas coladas en molde de arena, por lo tanto, la rapidez de enfriamiento ayuda en el tratamiento y demanda menos estroncio para una modificación satisfactoria.

La modificación con estroncio es una práctica aceptada en las fundiciones de piezas en molde de arena o molde permanente. El proceso es útil especialmente para las aleaciones de piezas de aluminio-silicio empleadas en la fabricación de pistones de automóvil, cabezas de automotores, monoblocks, cilindros de freno y piezas de pared delgada, además de algunas otras aplicaciones que exigen buena resistencia mecánica y ductilidad [3].

Una ventaja adicional que provoca la adición de Sr a la aleación de Al-Si es que también mejora la maquinabilidad, lo cual permite lograr mejores acabados o acceder a requerimientos dimensionales que solo se pueden lograr con este proceso. Un rasgo que se debe tomar en cuenta, su contenido también debe ser controlado ya que a niveles altos también aumenta el nivel de porosidad, es por ello que en algunas circunstancias no es empleado para fabricación de algunas piezas aeronáuticas. [4]

#### 4.2.2. Modificación térmica.

Otra manera de alcanzar cierto nivel de modificación en la microestructura de las aleaciones Al-Si es a través del efecto térmico que ocurre durante la solidificación. La modificación es llevada a cabo por este método por distintas razones y ellas pueden ser variadas lo que resulta en distintos niveles de modificación de la pieza. La causa que determinará el efecto más significativo será la velocidad de enfriamiento local. Los diagramas de fases (microconstituyentes) son obtenidos bajo condiciones de equilibrio, es decir a velocidades de enfriamiento muy lentas. Los diagramas de estabilidad tienen la particularidad de obtenerse a solidificación muy lenta, controlando que no rebase un cierto valor (aproximadamente de 1 a 2 °C/s) [3]. Al modificarse este valor, los parámetros cambian, la solidificación puede iniciar antes, cambiar las temperaturas del eutéctico, de *solidus* y *solvus*, incluso la composición química del eutéctico. Al cambiar estos valores, una aleación con composición eutéctica puede comportarse como hipoeutéctica por el cambio de composición química del eutéctico y por ende tener una estructura mucho más fina.

Al realizar una comparación con una aleación que es enfriada rápidamente, se notan cambios en la estructura del material. Los cristales de aluminio comienzan a adoptar una morfología dendrítica, para el caso del enfriamiento rápido, siendo indicativo de que ocurre una modificación parcial. Un incremento en la velocidad de enfriamiento da como resultado una reducción en el espaciamiento de las agujas de silicio y, consecuentemente, un aumento de la resistencia a la tensión y la ductilidad de las aleaciones Al-Si [3]. La Tabla 2 presenta variación en propiedades para diferentes tipos de molde.

Tabla 2. Variación del % de elongación y dureza, en función del tipo de molde para la aleación A356.

Tipo de molde	Elongación (%)	Dureza Brinell
Molde de arena	2	50
Molde metálico	3.6	60

### 4.3. Efecto de la modificación sobre las propiedades mecánicas.

La modificación es un tratamiento que cambia la morfología acicular del silicio eutéctico a globular fibrosa, esta transición influye directamente en las propiedades mecánicas del material. Las placas gruesas presentes en una aleación no modificada actúan como concentradores de esfuerzos, siendo estos los posibles generadores de grietas o fracturas cuando el componente fabricado se encuentre en condiciones de servicio. El aplicar el tratamiento de modificación, la microestructura pasa a ser fina (considerando que también hay influencia de las velocidades de enfriamiento) y el silicio tiende a redondearse; ambos fenómenos contribuyen a que la aleación presente valores más altos en el valor de máximo esfuerzo a la tensión (UTS), así como un aumento pronunciado en la ductilidad (% de elongación).

El cambio de las propiedades mecánicas de aleación está en función directamente de las características de una aleación modificada y una no modificada, así como el proceso de fundición, asociado al tipo de molde. Una cuestión en particular que se presenta con velocidades de enfriamiento elevadas es que ocurre una modificación térmica, por lo que la modificación se potencializa cuando se adiciona Sr.

En la Tabla 3 se presentan algunos valores de propiedades mecánicas en función de la morfología que adopta el silicio, para la aleación Al-7Si-0.3Mg. [3]

Tabla 3. Propiedades mecánicas de la aleación Al-7Si-0.3Mg.

Morfología de Si eutéctico	UTS (MPa)	Elongación (%)
Acicular	180	7
Laminar	200	12-16
Globular fibrosa	200	16

Para alcanzar un nivel de modificación correcto (nivel 5 de acuerdo a patrones de AFS American Foundry Society) corresponde a un determinado %Sr, entre 0.02 y 0.04%; superar este valor de Sr residual provocarán estructuras sobremodificadas y cantidades menores producirán estructuras parcialmente modificadas. La cantidad de Sr influirá directamente en las propiedades tensiles de la aleación. Las propiedades tensiles de la aleación cambian lentamente con altas cantidades de Sr y presentan mayor variación con niveles bajos de modificación. En consecuencia, se puede determinar que el efecto de la sobremodificación sobre las propiedades no es tan grande como el caso de aleaciones parcialmente modificadas.

#### 4.4. Efecto de la rapidez de enfriamiento en el espacio interdendrítico secundario.

Los brazos dendríticos secundarios son aquellos que crecen a partir de los brazos primarios de una dendrita. El espaciado entre los brazos dendríticos secundarios depende fuertemente de la rapidez de enfriamiento de una aleación sin importar si esta es de rango corto o de rango largo de solidificación; consecuentemente es independiente del tipo de grano que se presente en la aleación, ya sea del tipo columnar o equiaxial.

Durante la solidificación, los brazos dendríticos secundarios empiezan a formarse muy cerca de la dendrita primaria y aparecen inicialmente como una perturbación de morfología sinusoidal. Con el progreso de la solidificación, dichos brazos secundarios crecen y se eliminan entre sí a medida que su longitud sea menor.

Como se mencionó, las dimensiones del espaciamiento dendrítico secundario dependen principalmente de la rapidez de enfriamiento, es de suma importancia debido a que estas coadyuvan al incremento o decremento de las propiedades mecánicas de una aleación. Se ha demostrado que las propiedades tensiles de una aleación aumentan en presencia de dimensiones pequeñas de SDAS, mientras que se observa decremento en estas propiedades con el aumento en el tamaño del SDAS [2], observar Figura 6.

## 5. Resultados.

En este capítulo se presentan los resultados de estudios realizados por diversos investigadores que posteriormente son analizados y discutidos en el capítulo siguiente.

En el trabajo de Shakti S. [5], se presenta el estudio de la aleación de aluminio A356 que se compone de dendritas y partículas intermetálicas eutécticas de Si y Fe, así como fase de equilibrio de  $Mg_2Si$ . Las agujas eutécticas de silicio actúan como iniciadores de grietas y debilitan a la aleación afectando las propiedades mecánicas significativamente. La aleación A356 contiene aproximadamente 50% en volumen de fases eutécticas. La colada se realizó en un molde metálico donde la velocidad de enfriamiento será relativamente alta y el efecto de modificación es más notable.

El autor menciona de algunos tratamientos que se realizan para mostrar su efecto, estos son la agitación, adición de modificador y posteriormente de refinador de grano. Al realizar estos tratamientos, se observa en los resultados de la prueba de tracción, que, al agregar una pequeña cantidad de agentes modificadores y refinadores de grano, el cambio en la resistencia es significativo. La resistencia a la tracción se mejora sensiblemente con la cantidad óptima de refinador de grano 0.3% de Ti y de modificador 0.025% de Sr. Los resultados se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Valores de propiedades mecánicas obtenidas posteriores a la aplicación de los tratamientos de agitación, refinación de grano y modificación.

<b>Muestra</b>	<b>Resistencia a la tensión (N/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Dureza HRB</b>	<b>Micro dureza (Vickers)</b>	<b>% Elongación</b>
<b>Condición de colada</b>	157.86	82	52	2.00
<b>Agitada y en condiciones de colada</b>	163.07	40	76	2.00
<b>Con modificador (M)</b>	205.13	58	75	1.12
<b>Refinación de grano (RG)</b>	211.64	62	77	1.00
<b>M + RG</b>	246.34	65	88	1.33

Como ocurre en muchos casos, se combinan algunos tratamientos para lograr óptimas propiedades, la Figura 7 presenta la microestructura de los tratamientos combinados de modificación y refinación. La figura presenta una estructura bien modificada, contemplando la acción combinada de modificador y rapidez de enfriamiento elevada, además de algún efecto por la refinación, por lo que la cantidad de Sr añadida (0.025%) es adecuada bajo estas condiciones.

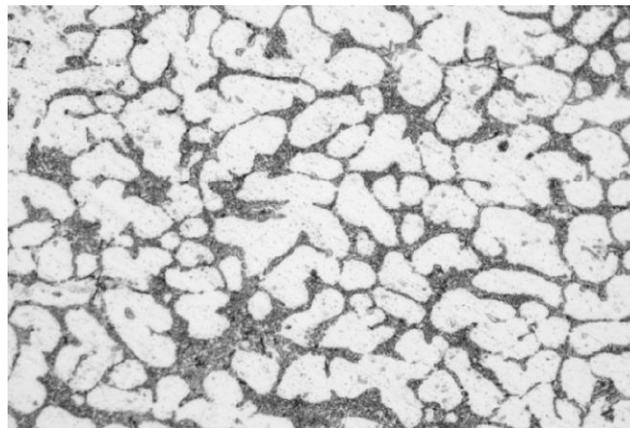


Figura 7. Microestructura de A356 con modificador y refinador de grano.

Para Shao-Chun S. [6], se presentan varios planteamientos, un efecto ocasionado por la velocidad de enfriamiento y su impacto que tiene en el espacio interdendrítico, así como en el cambio morfológico del silicio eutéctico o modificación térmica. De esta manera también se encuentra afectada algunas propiedades mecánicas como la resistencia a la tensión y la elongación. La aleación de estudio es la A356, con su composición presentada en la Tabla 5. La cantidad de Sr agregada fue de 0.035% (w%).

Tabla 5. Composición química de la aleación A356 (w%).

Si	Mg	Fe	Cu	Mn	Zn	Al
6.5-7.5	0.2-0.4	≤0.2	≤0.1	≤0.1	≤0.1	Bal.

Debido a sus efectos estables, el estroncio es ahora un modificador estándar que se utiliza en aleaciones de colada Al-Si. Las partículas eutécticas de silicio se encuentran influenciada por este elemento. Sin embargo, no todos los efectos de modificación son totalmente debidos al Sr, también se encuentran algunas otras características como las condiciones de enfriamiento que también afectan de manera directa.

En el artículo, se emplea el uso de una pieza con diferentes espesores para simular, utilizando además 3 diferentes tipos de arena para el molde (medio de moldeo), arena sílica (cuarzo), alúmina y de cromita, las cuales tendrán distinto nivel de extracción de calor y por ende distintas rapidezces de enfriamiento. La pieza se muestra en la Figura 8.



Figura 8. Pieza utilizada en el estudio con distintos espesores (6).

En los resultados se presentan varios comportamientos. Con el incremento del espesor de las paredes, la resistencia a la tensión y la elongación decrecen, tal como se muestra en la Figura 9 donde también se presenta el efecto de los diferentes medios de moldeo empleadas en el estudio.

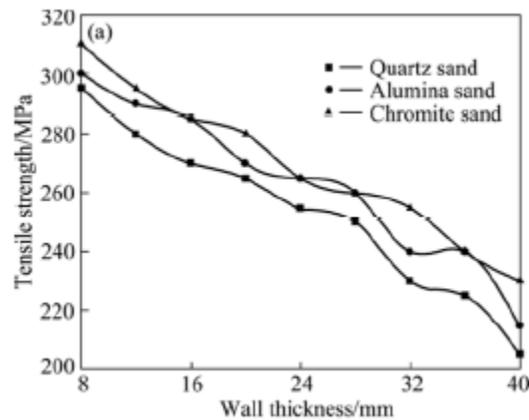


Figura 9. Influencia de espesor de las paredes y arenas moldeo en la resistencia a la tensión.

Analizando la anterior figura, las muestras que fueron obtenidas de los moldes de arena de cromita presentan una mayor resistencia a la tensión en comparación de las otras arenas (arena de cuarzo y arena de cromita) por tener una rapidez de enfriamiento relativamente mayor. La rapidez de enfriamiento tiene una influencia significativa en el efecto que provoca el Sr. Las propiedades mecánicas de las aleaciones Al-Si no dependen solamente de su composición química sino también de sus microestructuras, específicamente de la morfología de la fase  $\alpha(\text{Al})$ , y las partículas de Si eutéctico. Las altas rapidezces de enfriamiento tienen sus efectos marcados en el incremento del cambio de morfología ocasionado por el Sr, pero con el efecto de un incremento en el espesor, las propiedades pueden ser menores.

Cuando se cambia el material de los moldes de arena, la microestructura de una misma sección de espesor también y se ve afectada. Con el incremento del espesor, la rapidez de enfriamiento también se reduce, provocando que ocurra un bajo grado de subenfriamiento y menor rango de nucleación, así como un tiempo mayor de crecimiento para los granos, y la formación de agujas o placas de silicio eutéctico cuando no se adiciona Sr.

En el caso particular del molde de arena sílica (cuarzo), el efecto más notable es que el SDAS de la fase  $\alpha$  incrementa considerablemente con el incremento del espesor de las paredes, así como el silicio eutéctico y también el tamaño de grano. Otro caso particular ocurre con el molde de arena de cromita donde el SDAS y el tamaño del silicio eutéctico son mucho más finos, la razón es debida a que esta arena posee la capacidad de enfriamiento mayor y por ende la rapidez de enfriamiento mayor. Por lo tanto, el SDAS de espécimen obtenido en el molde de arena de cromita es el menor y el SDAS mucho más grande es el obtenido por el molde de arena de cuarzo. Estas observaciones pueden apreciarse en la Figura 10.

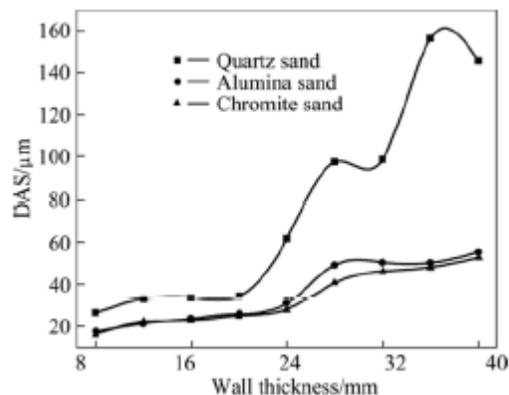


Figura 10. Efecto del espesor de pared y tipo de arenas del molde en el espacio interdendrítico, modificada con 0.035% de Sr en la aleación A356.

En el caso de la cromita, la rapidez de enfriamiento es más rápida, resultando en menor DAS, tamaño de grano y de partículas de silicio más finas, es decir la presencia de modificación térmica. De esta manera, elegir materiales con alta capacidad térmica y calorífica como la arena de cromita son de mucha utilidad para incrementar la rapidez de enfriamiento, refinar microestructura y reducir el efecto sensible de las secciones relativamente gruesas.

Finalmente, las propiedades mecánicas son correspondientes de sus microestructuras y de su espacio interdendrítico como parámetro en la aleación. Debido a los resultados presentados, el valor de Sr residual es adecuado para espesores menores de 24 mm. obteniendo el objetivo del tratamiento que es presentar una estructura bien modificada, para mayores valores se recomendaría una cantidad poco mayor.

En el trabajo de Sachin K. [7] se estudia la aleación Al-7Si-3Cu cuando esta es colada en molde permanente y se encuentra a una elevada temperatura, dado que es altamente susceptible a tener agrietamiento térmico. El elevar la temperatura del molde ayuda en la reducción de la susceptibilidad del agrietamiento, mediante el llenado en las últimas zonas de solidificación. Otro factor que tiene un efecto significativo es la aplicación de refinadores y modificadores. La pieza utilizada en el estudio se muestra en la Figura 11. La cantidad de Sr añadida es variable donde se observa el efecto de su contenido en la microestructura final con los valores de 0.01, 0.02 y 0.03%.

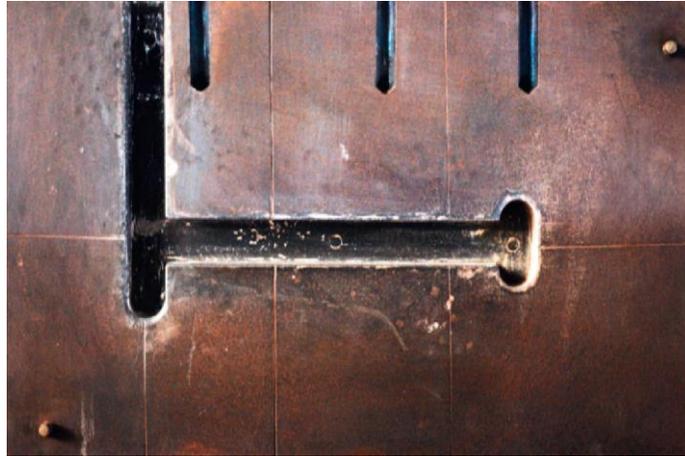


Figura 11. Molde permanente utilizado para la obtener piezas en el estudio.

En la parte experimental se realizaron algunas pruebas donde se varia la cantidad de adición de refinador de grano y modificador. Desde el punto de vista de la adición de Sr y Ti tendrá efecto en el cambio de las temperaturas importantes, temperatura eutéctica y temperatura *liquidus*. Al incrementar la temperatura de *liquidus* se indica que el subenfriamiento requerido para la nucleación de la fase  $\alpha$  es menor, logrando así granos de fase  $\alpha$  mucho más finos.

Dado que el interés es el efecto de Sr, se analiza el efecto combinado, donde se agrega tanto Ti como el Sr, que mediante los resultados obtenidos se muestra que el contenido donde se elimina el agrietamiento es de 0.02% de Sr y 0.04% de Ti. El efecto del estroncio al modificar el silicio eutéctico es que aumenta la fluidez del metal resultando en que el líquido eutéctico se observa en las últimas instancias de solidificación reduciendo la posibilidad de agrietamiento. La rapidez de enfriamiento que se calcula en el estudio es alrededor de 4°C/s, debido a que el molde recibe calentamiento a diferentes temperaturas. El efecto de los tratamientos se observa en la Figura 12, donde la temperatura de calentamiento del molde es de 230°C.



*Figura 12. Microestructura obtenida a 0.04% de Ti y 0.03% de Sr a temperatura de molde de 230°C.*

La imagen requiere de mayores aumentos para determinar mejor como se presenta la morfología del silicio, sin embargo, cualitativamente se puede estimar que el silicio adopta una morfología globular por su estructura fina, y con SDAS pequeño. Un efecto aumentado en el objetivo de la modificación puede resultar de aumentar la rapidez de enfriamiento.

Finalmente, los valores de Sr utilizados muestran ciertos resultados cada uno, pero el valor de 0.03% es el que mejor presenta una efectividad del tratamiento y que tiene concordancia, de acuerdo con la proximidad con los valores comúnmente aplicados. En cambio, el efecto puede verse afectado por la rapidez de enfriamiento como sucede en este trabajo.

En la investigación de İsmail Ö. [8], se estudia el efecto que existe sobre la microestructura con la adición de Sr a la aleación A356. Aunque el enfoque del artículo es dirigido hacia el ámbito corrosivo, se analiza las microestructuras obtenidas bajos los procesos de colada comunes, colada en molde de arena y colada a presión. Las piezas de colada que se obtienen son cilindros de 15 mm de diámetro y longitud de 150 mm. Esta pieza es simple debido a que el objeto de estudio es el aumento de la cantidad de Sr añadida o cuando es nula. La Tabla 6 presenta la composición de las aleaciones utilizadas en el estudio, donde DC es colada a presión y SC colada en molde de arena. Al ser distintos métodos la velocidad de enfriamiento es distinta y los resultados también lo serán.

Tabla 6. Composición química de las aleaciones utilizadas en el estudio (Sr en ppm).

Muestra	Si	Fe	Cu	Mg	Ti	Mn	Sr (ppm)	Al
<b>DC/SB Base</b>	6.45	0.22	0.04	0.24	0.015	0.340	0	Rem.
<b>DC1/SC1</b>	6.48	0.12	0.03	0.28	0.110	0.002	120	Rem.
<b>DC1/SC1</b>	6.46	0.10	0.03	0.27	0.110	0.002	170	Rem.
<b>DC1/SC1</b>	6.54	0.10	0.03	0.26	0.110	0.002	250	Rem.

La aleación A356 tiene una fase dendrítica con partículas de Si aciculares. En la investigación se varía el contenido de Sr a 120, 170 y 250 ppm y posteriormente es colada en los dos métodos mencionados anteriormente. La Figura 13 y 14 muestra las microestructuras obtenidas de las variaciones realizadas al contenido de Sr para colada a presión y colada en molde de arena, respectivamente.

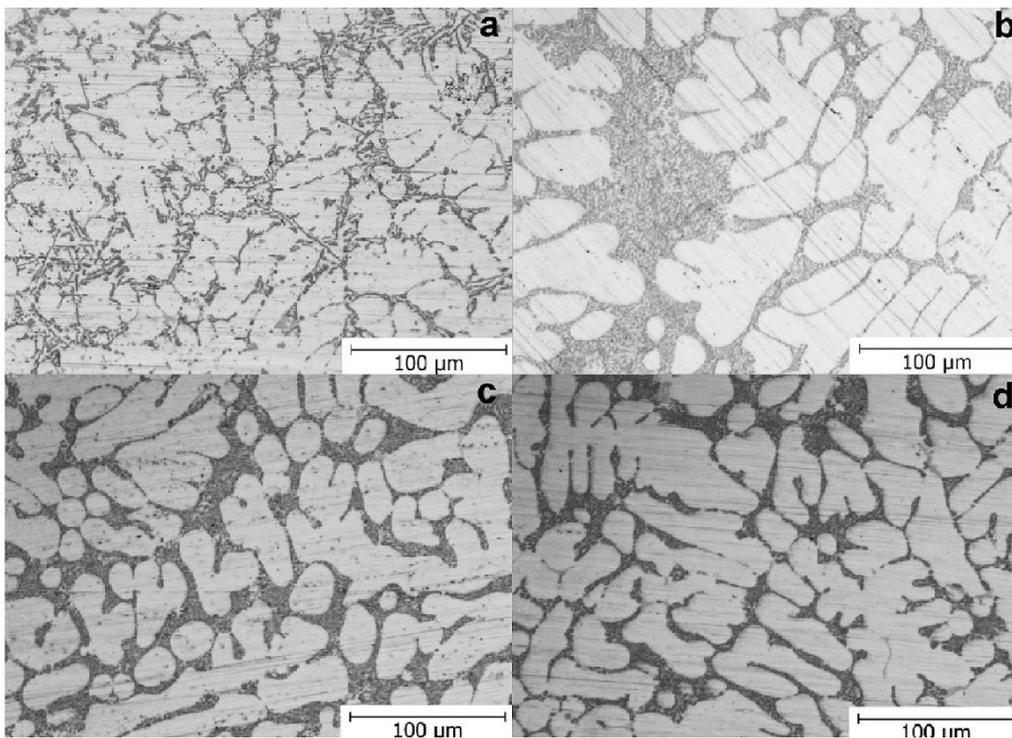
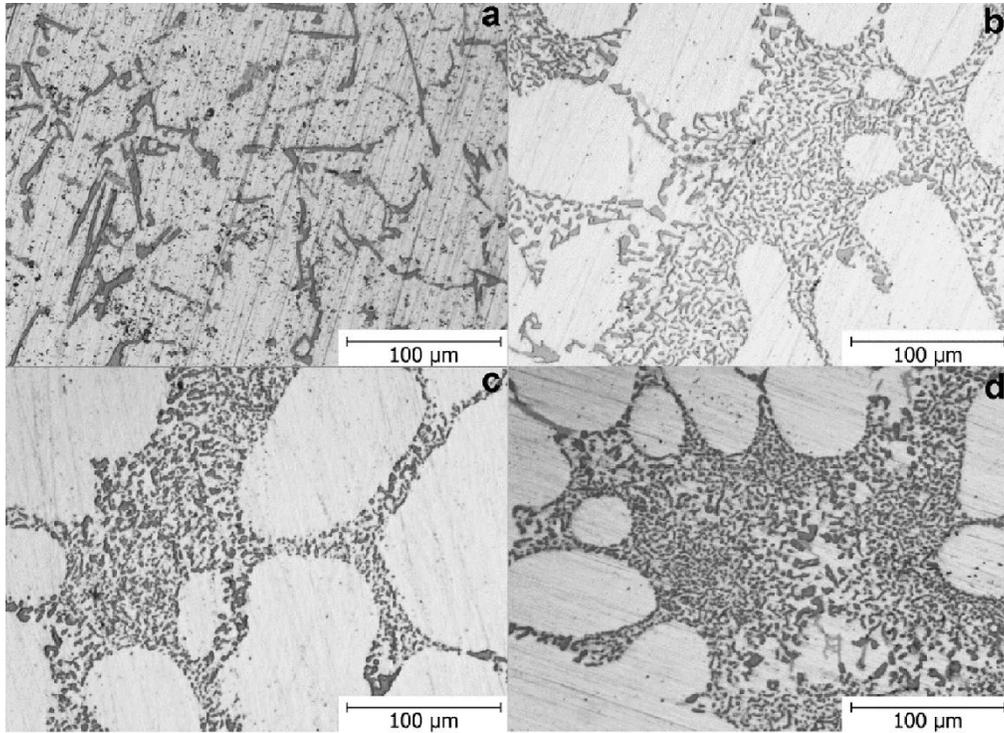


Figura 13. Microestructura de la aleación A356: a) DC aleación base b) DC1 c) DC2 d) DC3.



*Figura 14. Microestructura de la aleación A356: a) SC aleación base b) SC1 c) SC2 d) SC3.*

Las microestructuras muestran que la morfología del silicio no es la misma para los procesos aplicados, aún cuando el contenido de Sr sea el mismo. Las coladas en molde arena presentan una estructura más gruesa debido a un efecto adicional, la velocidad de enfriamiento es más lenta y promueve el crecimiento de Si. La causa de que el Sr provoca modificación es debido al decrecimiento en la temperatura eutéctica.

Las estructuras correspondientes a la nula adición de Sr muestran claramente el efecto de la velocidad de enfriamiento. En la colada a presión se obtiene una estructura ligeramente modificada, pero con una morfología más globular comparada con la colada en molde de arena. Si se observa el caso donde ocurre la mayor cantidad de Sr añadida en este estudio, en molde de arena la morfología del silicio es globular fibrosa, pero aun de tamaño grueso, en cambio la comparación con la colada a presión se observa que la estructura es más fina y se obtiene una estructura bien modificada.

La razón de que ocurran estos resultados es que, en la colada a presión, lo que ocurre es que la aleación solidifica en menor tiempo en comparación con la de arena, por lo tanto, la morfología del silicio no puede crecer, volverse gruesa, y resulta en forma globular. La cantidad de Sr añadida de 250 ppm es ideal para coladas a presión, pero este valor debe aumentar para cuando se presente una colada con molde de arena, para la obtención de una estructura bien modificada.

En el artículo de Samuel A. [9], indica que los tratamientos más aplicados a piezas de aleaciones Al-Si son la refinación y modificación, en la mayoría de las ocasiones combinadas. Para realizar estos tratamientos es común añadir algunos elementos en especial, Ti y B para el caso de refinación y Sr para la modificación. Pero, la adición de estos elementos no debe superar ciertos valores ya que pueden producir algunos efectos adversos que perjudiquen en el objetivo del tratamiento, o incluso la formación de algunos compuestos intermetálicos. En este estudio se utilizó la aleación A356.2, su composición química se presenta en la Tabla 7. La colada fue realizada en moldes metálicos, con el objetivo de obtener probetas de impacto.

Tabla 7. Composición química de la aleación A356.2 utilizada por Samuel A. [9].

<b>Si</b>	<b>Mg</b>	<b>Cu</b>	<b>Ti</b>	<b>Mn</b>	<b>Zn</b>	<b>Fe</b>	<b>Al</b>
7.21	0.41	0.01	0.11	0.01	0.01	0.08	Bal.

La experimentación utiliza distintas aleaciones maestras para realizar el objetivo de refinación pues se busca observar el efecto que tienen bajo 2 valores de Sr para el tratamiento de modificación. Los valores de Sr son de 30 ppm y 200 ppm, correspondientes a valores bajos y valores comúnmente utilizados, las microestructuras resultantes se muestran en la Figura 15.

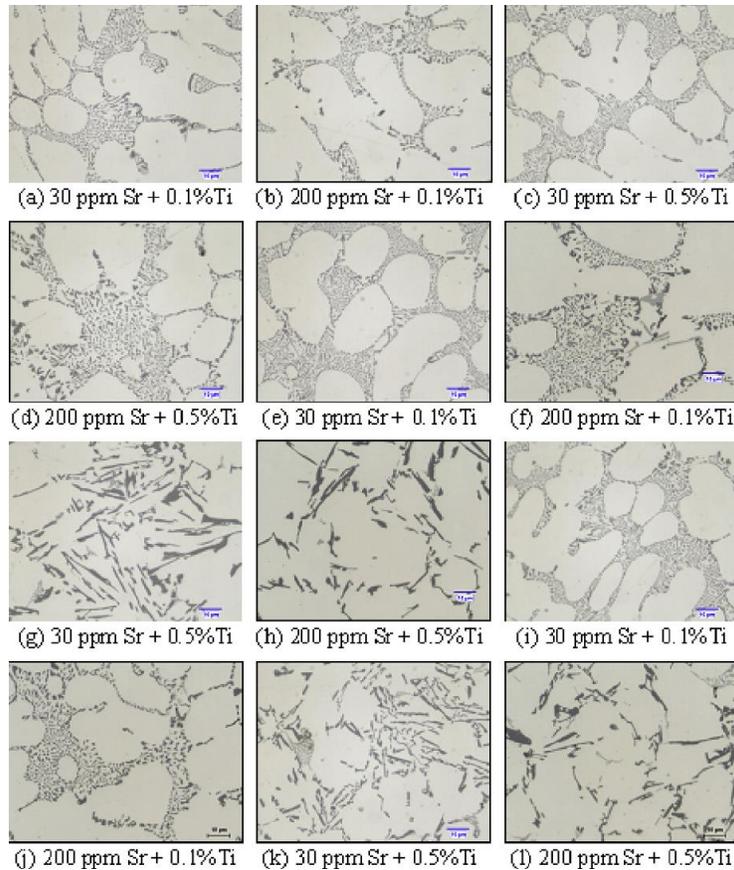


Figura 15. Microestructuras refinadas con diferentes aleaciones maestras: a)-d) Al-5Ti-1B, e)-h) Al-2.5Ti-2.5B y i)-l) Al-4B, y modificadas con 30 y 200 ppm de Sr.

Los resultados de la experimentación muestran un caso particular para el boro. Cuando se añade boro a la aleación produce eliminación de una cierta cantidad de átomos de Sr, debido a su interacción y a que forman el compuesto  $\text{SrB}_6$ , donde también hay pérdida de átomos de B para producir la refinación del grano. En las distintas pruebas se muestra que, para el caso del Ti, el añadirlo no causa un efecto significativo en la cuestión de la modificación del Si eutéctico, por lo que la morfología de este está en función de la cantidad de Sr añadida. Por otro lado, el boro si tiene un efecto significativo pues para modificaciones con cantidad de Sr baja, se observa que para valores de 0.01% la modificación ya tiene una pérdida de efecto en modificar la morfología del eutéctico, añadir una mayor cantidad de Sr, la que comúnmente es utilizada en el tratamiento, se observa que la pérdida es baja o nula. Si se aumenta la cantidad de boro añadida se observa que la interacción es

menor y la influencia sobre la modificación del silicio también decrece. Lo anterior mencionado se debe a que la interacción entre el Ti y el Sr es mínima o nula.

El valor del contenido de Ti no es muy perjudicial para la modificación si se eleva, sin embargo, si se realiza la refinación con B este valor no debe superar 0.1% ya que se observa deficiencia en el efecto de la modificación. Respecto a la parte de interés, se determina que el valor de 200 ppm presenta una estructura modificada, aunque no es la estructura buscada, ya que normalmente siempre se busca una estructura bien modificada. La particularidad es que este valor es válido para el molde metálico sin calentamiento, es decir una velocidad de enfriamiento elevada.

En el artículo realizado por Tash M. [10], se comenta acerca del efecto que hay en los parámetros metalúrgicos para aleaciones de aluminio-silicio, particularmente para el caso de una aleación 356 y 319. Estas aleaciones tienen distinta composición química.

El estudio presenta la variación dentro de los parámetros de la composición química de la aleación, al agregar una mayor cantidad de ciertos elementos para lograr un cierto objetivo, y además también la aplicación de algunos tratamientos térmicos y su efecto sobre las propiedades, particularmente la dureza.

En relación con el tema de este estudio, se realizó la colada de ambas aleaciones en un molde metálico, pero recibiendo un calentamiento cercano a 400°C. Para la modificación se añade cantidades variables de Sr, pero la más frecuente es de 170 ppm.

En la Figura 16 se evalúa el efecto de la temperatura del tratamiento de envejecimiento y su efecto en la dureza de la pieza obtenida. El punto de interés es en la primera condición, la de colada (as-Cast), pues en este apartado es posible observar el efecto de la modificación sobre las propiedades y también del efecto de la rapidez de enfriamiento. Dado que la colada se realizó en molde metálico es de esperarse que ocurra modificación térmica cercana a las paredes del molde y que, con el efecto de la adición de Sr al baño, el efecto se presente en toda la estructura

de la pieza. El molde fue calentado, al realizar esto la solidificación y el enfriamiento será más lento, por ello la modificación térmica también se verá disminuida. Estas condiciones logran asimilar más bien el efecto de que la colada se realizó en un molde de arena más que de tipo metálico por la rapidez de enfriamiento que se vio disminuida.

Una cuestión importante que se considera es que las aleaciones la presencia de intermetálicos. Se observa que cuando se encuentra la presencia de Mn a los intermetálicos el efecto de modificación se ve más pronunciado para el caso de la aleación 356. Donde en este caso se puede observar que, aunque la modificación térmica no tiene un efecto muy significativo, esta se ve potencializada con la adición de Sr.

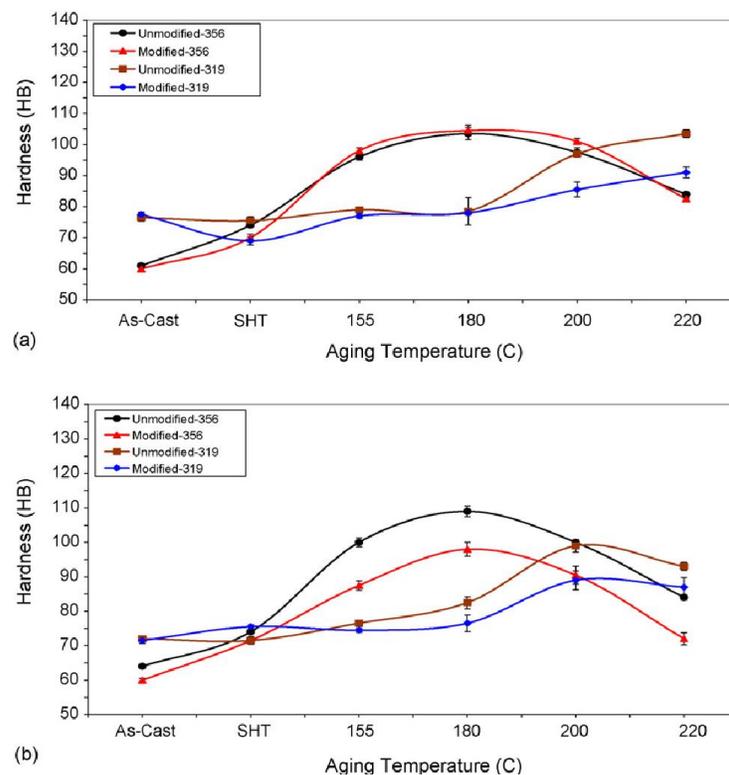


Figura 16. Efecto de la temperatura del tratamiento de envejecimiento para la aleación 356 y 319 con contenido de intermetálicos a)  $\beta$  (1%Fe) y b)  $\alpha$  (1%Fe-0.4%Mn). Para aleaciones sin modificar y modificadas.

El artículo de Guilio T. [11], comenta acerca de la influencia de los parámetros del proceso en las características microestructurales, particularmente de la aleación A356, en la fabricación de monoblocks.

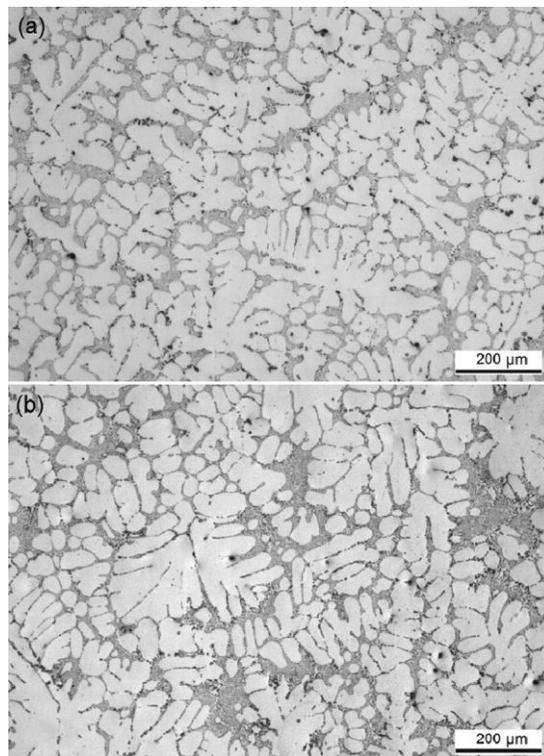
La fabricación de este componente es llevada a cabo por diversas vías, en la que se enfoca el artículo es la vía de colada a presión baja, donde se presentan varias características y parámetros que al modificarse pueden presentar resultados muy distintos. El material de fabricación utilizado es la aleación A356, la cual es fundida y para el proceso de colada, se coloca el molde sobre el horno que contiene el metal líquido y este llegar al molde cuando se aplica una ligera presión de aire dentro de la olla, haciendo que el metal fluya a través de tubos que llenan el molde.

El molde recibe un cierto calentamiento para el cual se analiza su efecto más adelante, sin embargo, lo relevante se encuentra relacionado con la rapidez de enfriamiento y el contenido de Sr adicionado, dando una cierta relación con el tamaño del espaciamiento interdendrítico secundario, como se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8. Valores promedio de la rapidez de enfriamiento obtenidos con la medición de SDAS a distintos contenidos de Sr.

<b>Sr(wt%)</b>	<b>Rapidez de presurizado (Pa/s)</b>	<b>SDAS (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Rapidez de enfriamiento (<math>^{\circ}\text{C/s}</math>)</b>
0.009	429	58	0.3
0.017	429	48	0.54
0.009	857	67	0.19
0.017	857	55	0.35

El objetivo planteado no es observar el efecto de la presión, sin embargo, ocurre un efecto en conjunto con la temperatura. El aumento de la presión de llenado, implica que la rapidez de enfriamiento se vea disminuida o aumentada. Los resultados parecen estar en contradicción en la parte de que mediante la aplicación de una menor presión se puede obtener una estructura mucho más fina y que al aumentarse esta presenta mayor grosor en algunas características, como el SDAS. Tal como se observa en la Figura 17. la particularidad esta con los valores de la presión, pero deben contemplarse ciertos aspectos en esta consideración, la presión provocara un ligero cambio en el punto de fusión del metal y la que es de nuestro interés es que se afecta la velocidad de enfriamiento al tener un mayor contacto del metal con las paredes del molde en menor tiempo, es por eso por lo que, con respecto a la rapidez de enfriamiento, el valor de SDAS disminuye cuando esta aumenta y viceversa.



*Figura 17. Microestructura de la aleación AlSi7Mg0.3 modificada con 170 ppm de Sr obtenida a 429 (a) y 857 Pa/s (b) de presión.*

En el artículo de Qing L. [12] se estudia el efecto que tienen algunos elementos que se adicionan a la aleación Al-7Si, elementos relacionados con el tratamiento de modificación, pero en combinación con una solidificación muy rápida, es decir, con el efecto de la rapidez de enfriamiento.

Las aleaciones de Al-Si tienen varias formas de ser obtenidas por procesos de fundición, en estos procesos la rapidez de enfriamiento de la pieza no es la misma. El artículo plantea el caso de un proceso de colada con rotación, es decir un proceso donde la velocidad de solidificación es muy elevada y por tanto se afectan las características microestructurales.

Es conocido que la rapidez de enfriamiento tiene influencia en la morfología del silicio, y en el trabajo se presentan estudios de cómo es influenciada por una mayor o menor velocidad. El proceso no es muy equivalente con los procesos que se estudian en este trabajo, pero se puede analizar el efecto que tiene la rapidez de enfriamiento.

La composición de la aleación utilizada se presenta en la Tabla 9, donde el enfoque será la aleación que recibe adición de Sr para modificar. El valor relevante de la tabla es el contenido de Sr, pues es el comúnmente utilizado en procesos de colada convencionales. Las revoluciones a las que gire el disco para obtener una laminilla de Al-Si provocan que la rapidez de enfriamiento sea mayor o menor. Si las revoluciones son menores, la rapidez es más lenta, si las revoluciones aumentan, la rapidez también lo hará. El artículo utiliza dos casos para analizar el cambio producido, estos casos son de 30 m/s (rapidez estimada de  $2 \times 10^7$  K/s) y de 50 m/s con una rapidez mayor que el caso anterior.

Tabla 9. Composición química de las aleaciones experimentales utilizadas.

<b>Alloy designation</b>	<b>Si (wt%)</b>	<b>Mg (ppm)</b>	<b>Fe (ppm)</b>	<b>P (ppm)</b>	<b>Sr (ppm)</b>	<b>Ce (ppm)</b>	<b>Al (ppm)</b>
Al-7Si	6.99	5	95	1	0	0	Balance
Al-7Si-0.008P	7.09	7	95	84	0	0	Balance
Al-7Si-0.04Sr	7.11	7	92	0	426	0	Balance
Al-7Si-0.5Ce	7.05	6	92	1	0	0.52	Balance

Los resultados muestran que, para la rapidez de enfriamiento menor, al agregar la cantidad de Sr modificador, la morfología del Si eutéctico permanece sin cambio, y que incluso al realizar un análisis más profundo se revela que la estructura presenta formas de cadenas que son diferentes a las obtenidas por procesos convencionales de colada. En el caso de la rapidez mayor, la estructura exhibe una morfología fina. Estos resultados se presentan en la Figura 18 y 19.

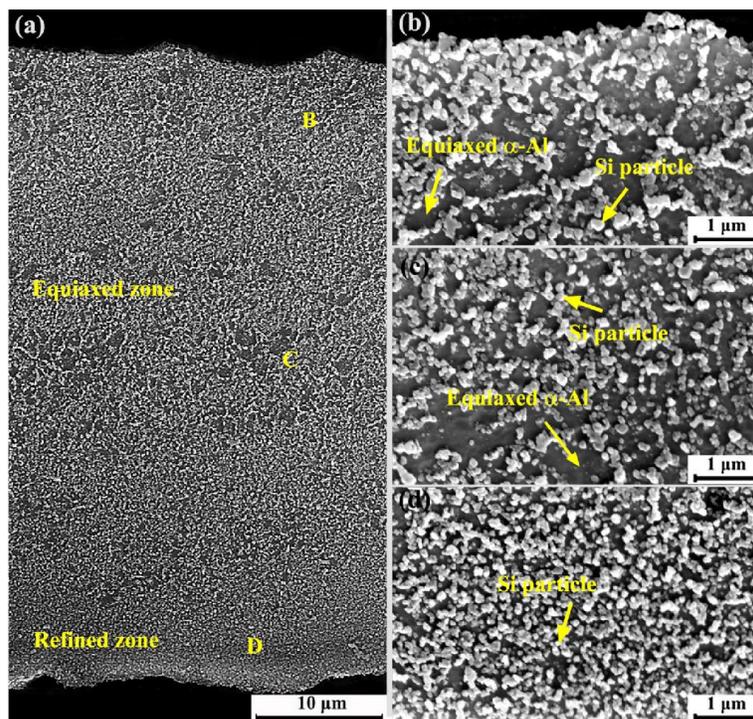


Figura 18. Microestructura detallada de una laminilla de aleación Al-7Si preparada a una velocidad de rotación de 30 m/s.

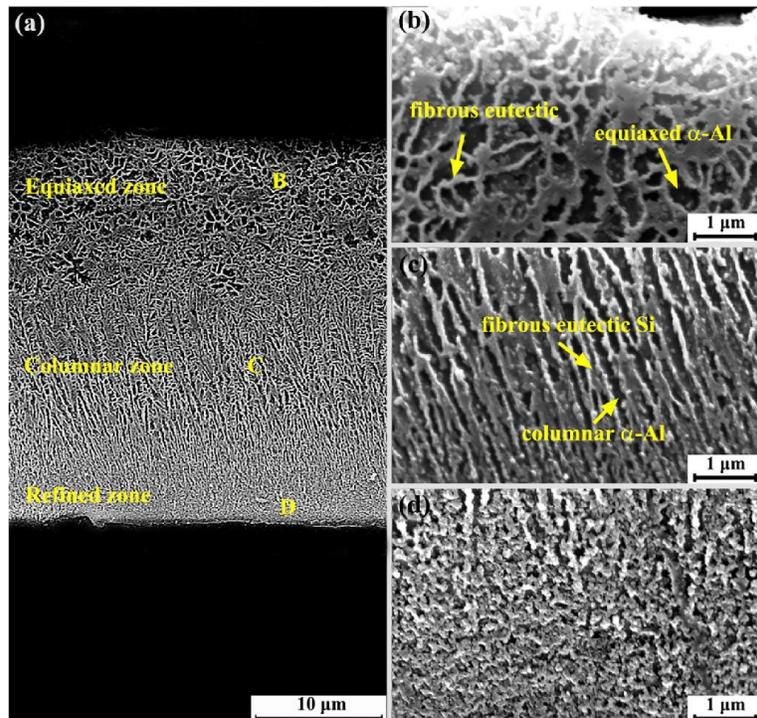


Figura 19. Microestructura detallada de una laminilla de aleación Al-7Si preparada a una velocidad de rotación de 50 m/s.

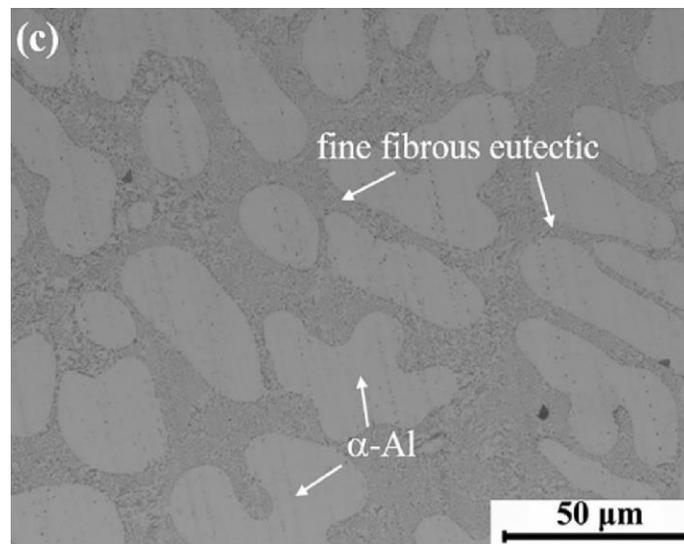


Figura 20. Microestructura de colada convencional de Al-7Si-0.04Sr.

La Figura 20, muestra la estructura obtenida bajo condiciones convencionales de colada, con lo cual el silicio presenta su estructura fina fibrosa, pero a un aumento mucho mayor. Esta figura demuestra que el efecto de la velocidad de enfriamiento potencializa la modificación cuando es agregada la cantidad de Sr y a su vez se aplica una rapidez de enfriamiento mayor. El valor de 0.0426% de Sr es ideal para una correcta modificación.

En el artículo de Longfei L. [13], se presenta el estudio de la rapidez de enfriamiento sobre la aleación de Al-7.0Si-0.3Mg modificada con un elemento no tan común, el lantano. La modificación es un tratamiento que se puede realizar con elementos considerados tierras raras, en este caso se selecciona el La, el efecto es similar en relación con el Sr, pudiendo ser que se requiera mayor o menor cantidad, pero se puede ver influenciado por la rapidez de enfriamiento que se aplica. Algunos autores también concuerdan con la idea de que el efecto modificador cuando se añade un elemento se ve aumentado con el hecho de aumentar la rapidez enfriamiento. El estudio utiliza la aleación Al-7Si-0.3Mg, su composición química se presenta en la Tabla 10, antes y después de agregar 0.4% de lantano como modificador. La pieza utilizada presenta 2 secciones que pueden simular una pared de espesor muy delgado (0.8 mm) y otra de mayor grosor (30 mm).

Tabla 10. Composición química de aleación Al -7Si-0.3Mg y Al -7Si-0.3Mg +0.4 La.

<b>Alloy</b>	<b>Si (wt%)</b>	<b>Mg (wt%)</b>	<b>La (wt%)</b>	<b>Ti (wt%)</b>	<b>Sr (wt%)</b>	<b>Others (wt%)</b>	<b>Al</b>
Al-7Si-0.3Mg	7.05	0.368	<0.01	<0.0002	<0.0001	<0.10	Bal.
Al-7Si-0.3Mg-0.4 La	6.96	0.349	0.380	<0.0002	<0.0001	<0.10	Bal.

En la experimentación se recurrió al uso de 2 tipos de colada, que son la colada en matriz metálica por gravedad y una de tipo semisólido. Estas condiciones provocan que se obtengan distintas rapidezces de enfriamiento, unas mucho más lentas que otra, obteniendo valores aproximados y el efecto específico para cada uno de ellos. La Figura 21 presenta las curvas de enfriamiento para la aleación a cada rapidez de enfriamiento, y el efecto en la morfología del silicio eutéctico se presenta en la Figura

22. Para los casos presentados la rapidez de 30 K/s corresponde al espesor de 30 mm y la de 130 K/s corresponde a 0.8 mm de espesor.

Los resultados muestran que para las primeras 3 rapidezces 0.2, 1.5 y 9 K/s el efecto de modificación es muy bajo incluso también para la rapidez de 30 K/s. El efecto si se ve aumentado conforme el valor crece, sin embargo, ya que los valores de la longitud y radio promedio del Si disminuyen conforme la velocidad aumenta, sin embargo, los casos que presentan estas rapidezces de enfriamiento son caso con espesores grandes. Agregar Lantano aumenta el efecto de modificación, pero es hasta el valor de 30 K/s donde se puede estimar una modificación bien realizada.

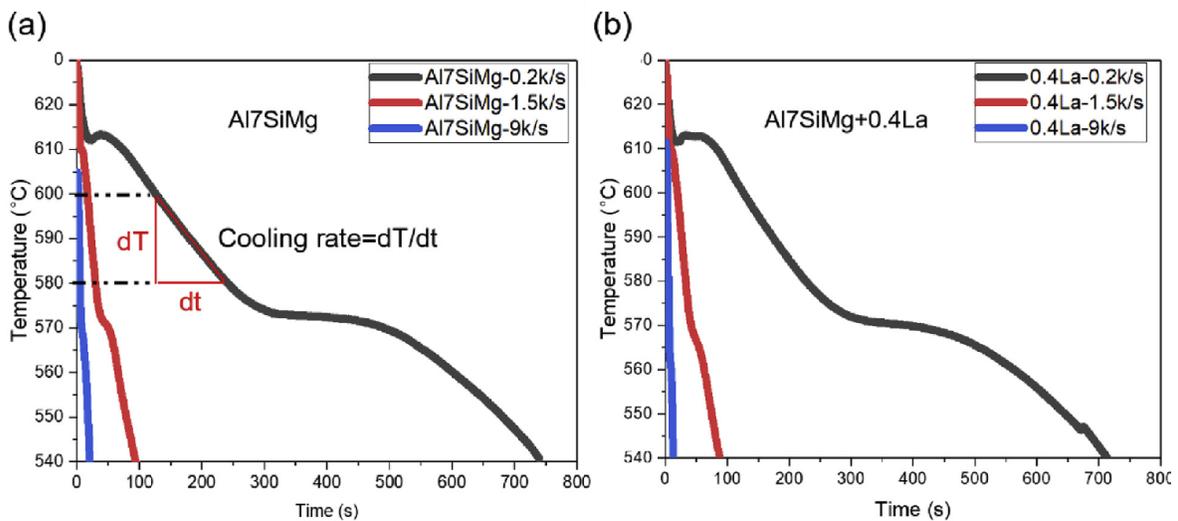


Figura 21. Curvas de enfriamiento para a) Al-7Si-0.3Mg y b) Al-7Si-0.3Mg + 0.4% La.

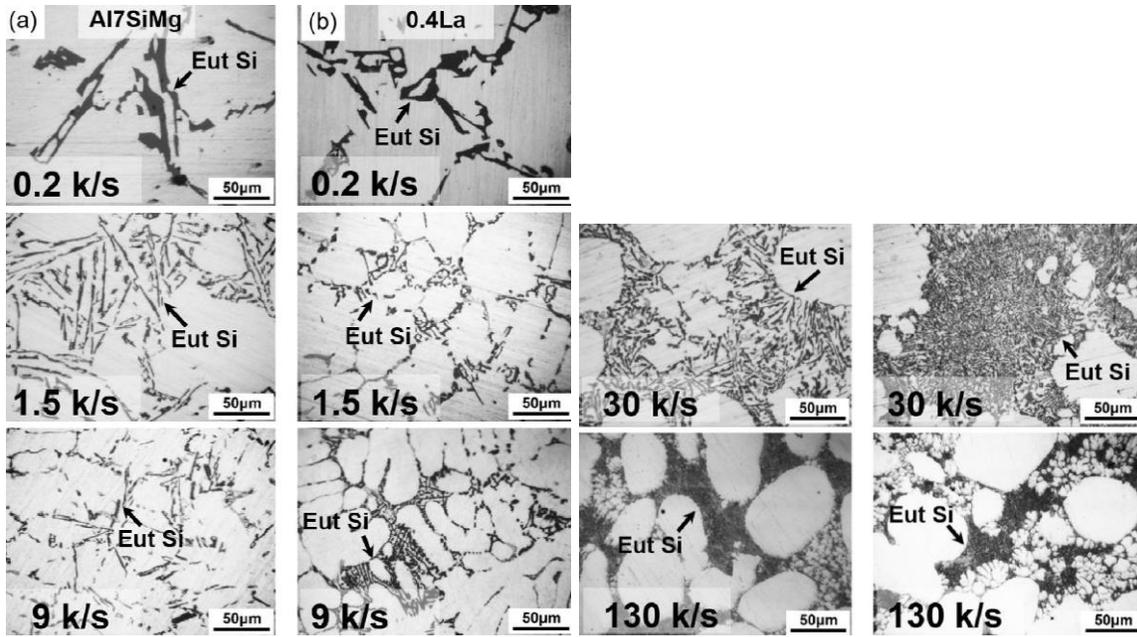


Figura 22. Microestructura del silicio eutéctico en Al-7Si-0.3Mg a) con modificación y b) con modificación 0.4% La, a distintas velocidades de enfriamiento.

Los resultados muestran una particularidad, con la rapidez de enfriamiento más elevada, el efecto es bastante similar sino es que igual en la reducción de la longitud y radio promedio del Si eutéctico. Se observa una estructura bien modificada en ambos casos, sin y con La. Con este resultado se puede estimar el efecto del modificador es disminuido, pero aún existe, y de no alcanzar esta velocidad la estructura puede no presentar el mismo nivel modificación. Este efecto se presenta gráficamente en la Figura 23.

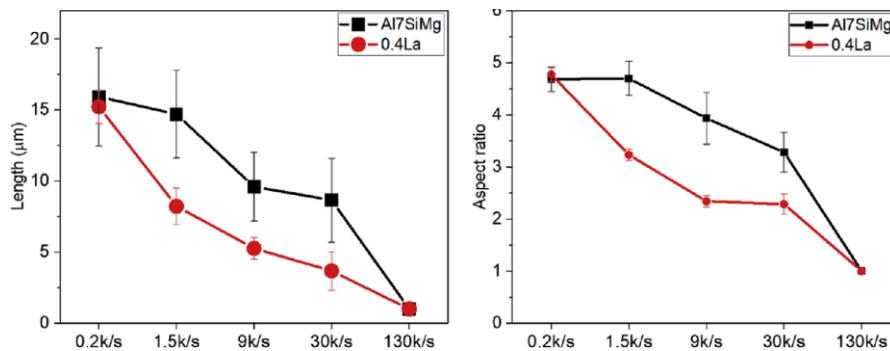


Figura 23. Longitud y radio promedio del Si eutéctico en la aleación Al-7Si-0.3Mg y Al-7Si-0.3Mg + 0.4% La, para diferentes rapidezces de enfriamiento,

El valor de la cantidad agregada de modificador puede ser cambiada si la velocidad de enfriamiento es cercana o igual a 130 K/s. Sin embargo, el efecto puede cambiar ligeramente para casos donde se añade otro elemento modificador por lo cual no es recomendable eliminar el efecto de los elementos modificadores.

Al igual que los autores anteriores E. Vandersluis [14], analiza la relación existente entre el contenido de Sr y la rapidez de solidificación con una modificación parcial. Apoyado con algunas investigaciones previas, se comenta que incluso sin la presencia de agentes químicos, es posible obtener una estructura con buena modificación simplemente con una rapidez de enfriamiento elevada. Sin embargo, es útil el estudio de la combinación de 2 factores que afectan a la modificación.

En el estudio se utiliza la aleación 319.0, una aleación que tiene múltiples usos industriales, los cuales son justificados debido al tratamiento de modificación que se aplica a la aleación mejores propiedades mecánicas. Para observar el efecto de la rapidez de enfriamiento, se utilizó un molde metálico el cual es precalentado a temperaturas de 600, 500, 450, 300 y 200 °C. En el caso del Sr, los niveles se establecen en cantidades de 0, 50, 70, 150 y 300 ppm con el objetivo de observar su efecto y la obtención de una estructura parcialmente modificada. Además de ello, también existe un efecto sobre la temperatura eutéctica de la aleación, la cual sufre un descenso.

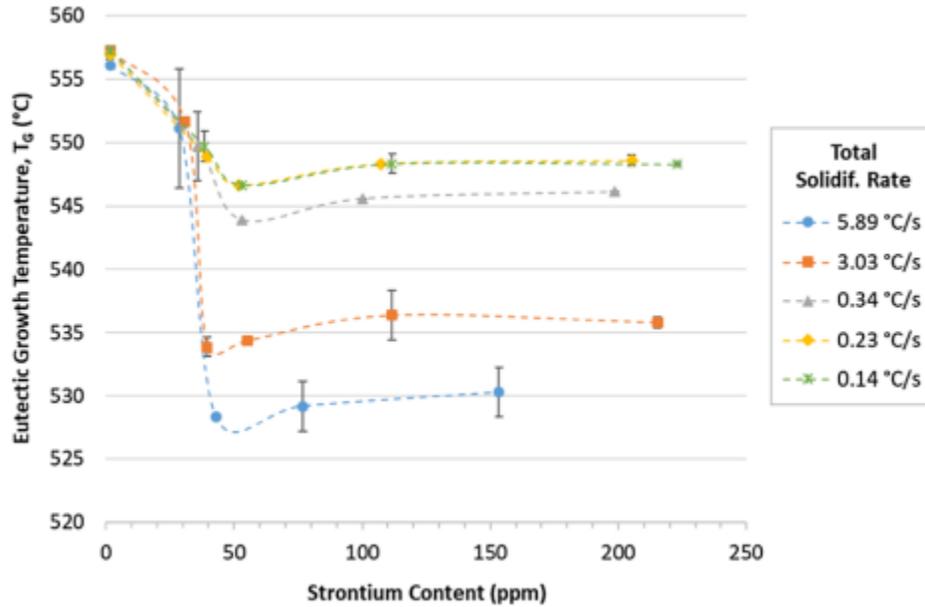


Figura 24. Efecto del contenido de Sr y de la velocidad de enfriamiento sobre la temperatura de crecimiento eutéctica,  $T_G$ .

El efecto mencionado anteriormente, se ilustra en la Figura 24, donde se obtienen observaciones importantes. Cuando no hay presencia de Sr, la temperatura eutéctica no sufre ningún tipo de cambio, por lo que se puede estimar que es independiente de la rapidez de enfriamiento. Posteriormente, al agregar una cierta cantidad, cercana a los 30 ppm la temperatura decrece hasta los 551 °C con una ligera variación entre las velocidades de enfriamiento. Si el nivel de Sr aumenta entonces es posible observar variaciones significativas donde para una rapidez promedio de 5.89 °C/s se alcanza un valor mínimo de 528 °C. Esto establece la relación de la temperatura eutéctica con un grado de modificación en la estructura la cual se plantea más adelante.

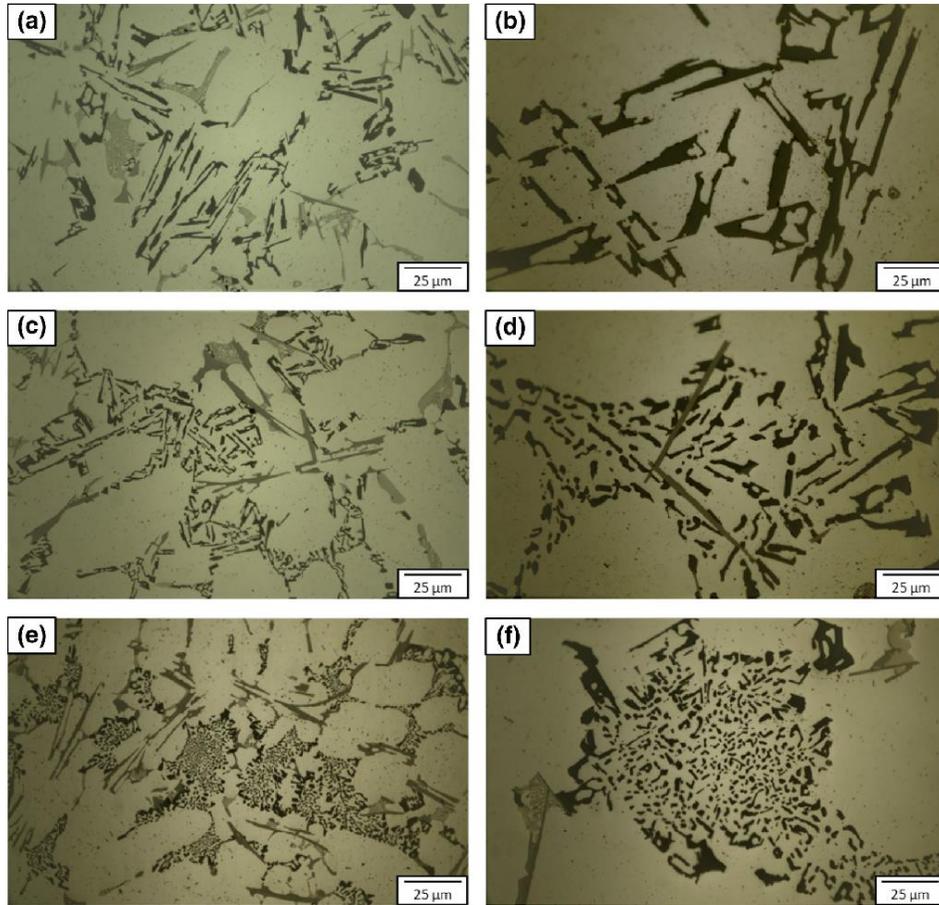


Figura 25. Microestructuras de la fase eutética de Si: a) 2 ppm Sr 5.89 °C/s, b) 2 ppm Sr 0.14 °C/s, c) 31 ppm Sr 5.89 °C/s, d) 37 ppm Sr 0.14 °C/s, e) 154 ppm Sr 5.89 °C/s, f) 223 ppm Sr 0.14 °C/s.

La Figura 25 presenta las microestructuras de la aleación A319 donde se observan diferencias en la fase eutética obtenida por distintas condiciones. Las estructuras, en la mayoría de los casos, presentan formas alargadas y con morfología tipo acicular, excepto para los últimos dos casos que ya presentan estructuras parcialmente modificadas. En los primeros 4 casos la cantidad de Sr es bastante baja lo que no permite que el Si eutético pueda adoptar una forma redondeada, pero es posible observar algunos cambios, la sección a) y c) presentan una estructura más fina en comparación de las estructuras b) y d), su diferencia principal es la velocidad de enfriamiento la cual, como se mencionó anteriormente, tiene efecto en la formación de la fase eutética y permite que el silicio eutético se presente como una fase globular fibrosa. Ahora bien, respecto con los últimos 2

casos, las fases presentan la relación importante de la adición de Sr con rapidez de enfriamiento, el primer caso se realiza con una velocidad de enfriamiento alta, pero con Sr menor que en el caso f) y obtiene una estructura parcialmente modificada, sin embargo, para el siguiente caso se realiza con una rapidez de enfriamiento baja, pero con un alto contenido de Sr obteniendo una estructura modificada o cerca a bien modificada.

Las observaciones hechas anteriormente se complementan con la Figura 26, donde el contenido de Sr y la rapidez de enfriamiento determinarán los aspectos geométricos de la fase eutéctica principalmente el radio promedio, esfericidad y diámetro circular. Los resultados muestran que para rapidez de enfriamiento de 0.34 °C/s o menores es con un contenido de 53 ppm lo que produce un efecto modificador en la estructura, mientras que para las rapidez de enfriamiento mayores este efecto es producido con una menor cantidad de Sr añadido. Comparando con el valor de 53 ppm la modificación provoca cambios importantes en la forma del Si eutéctico.

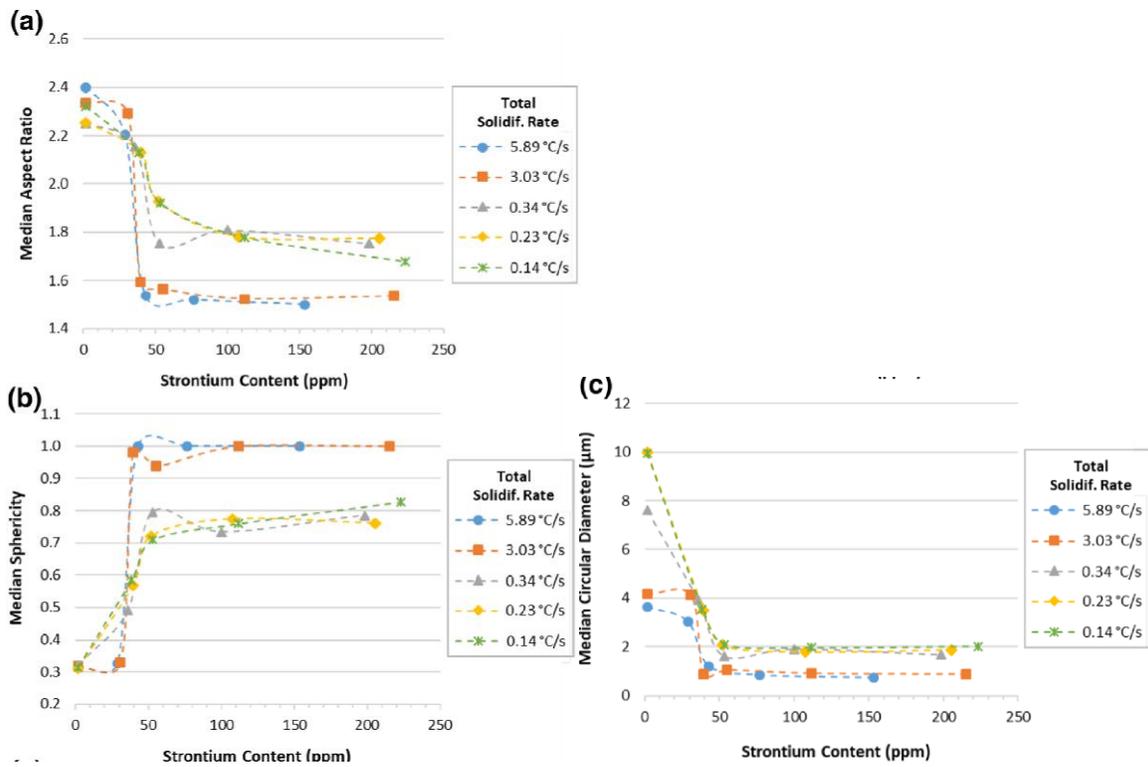


Figura 26. Influencia del contenido de Sr y la rapidez de solidificación sobre las características morfológicas en el Si eutéctico.

El autor G. Shabestari [15], muestra más información respecto de esta relación tan importante, la modificación provocada por la adición de un elemento en particular y el efecto de la rapidez de enfriamiento en la morfología de la fase eutéctica. En la experimentación, el efecto de distintas rapidezces de enfriamiento es propuesto mediante distintos espesores en un molde de arena, pero también se realizan coladas teniendo una condición más en la cuestión de obtener rapidezces de enfriamiento elevadas. Las rapidezces de enfriamiento no fueron citadas, pero estas son interpretadas con un valor de SDAS (espacio dendrítico) y además se relacionaron los resultados con propiedades mecánicas obtenidas de la aleación. Cabe mencionar que la modificación se realizó con 2 agentes, Sr y Sb, pero en este trabajo el enfoque será únicamente para el Sr con una cantidad adicionada de 0.02%.

La aleación de trabajo fue la A356, la Figura 27 muestra los resultados para un molde de arena con una rapidez de enfriamiento elevada y para una lenta, de acuerdo con espesores de 3 y 9 mm respectivamente, con y sin modificación de Sr. La Figura 28 muestra los resultados de muestras con y sin modificación de Sr, coladas en un molde metálico. Se determina claramente que, en el caso del molde de arena, la estructura es acicular con algunas zonas donde incluso se encuentra en forma de placas, aumentar la rapidez de enfriamiento ayuda a que estas placas no aparezcan, pero aún continúa presentándose una estructura bastante acicular alargada, que es perjudicial para la aleación en las propiedades mecánicas. Adicionar una cantidad de Sr mejora significativamente la estructura donde para un espesor delgado se observa una estructura modificada. El molde metálico tiene una rapidez de enfriamiento incluso mayor y presenta una estructura bien modificada.

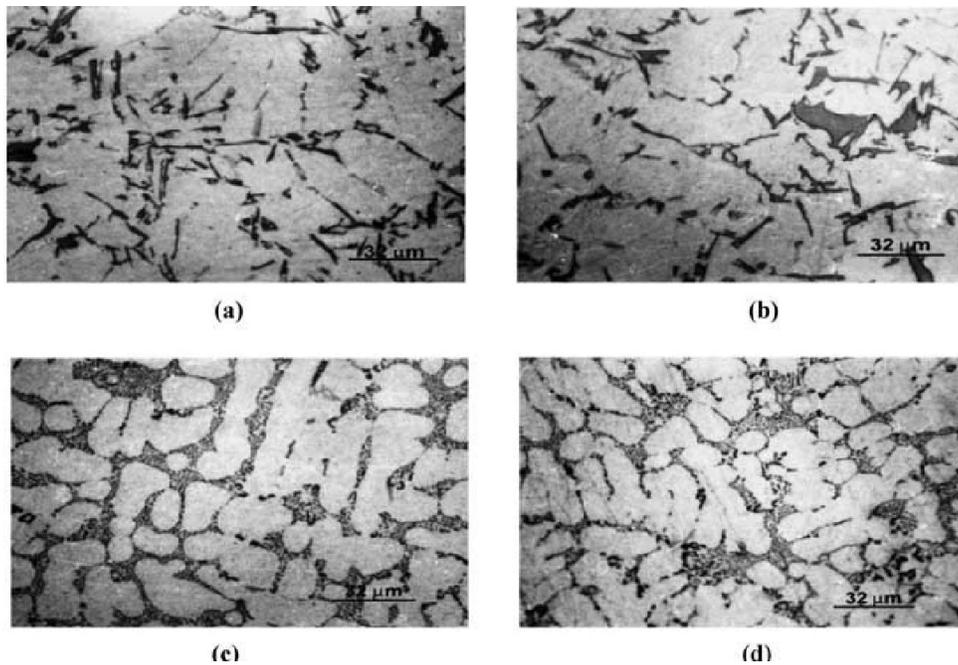
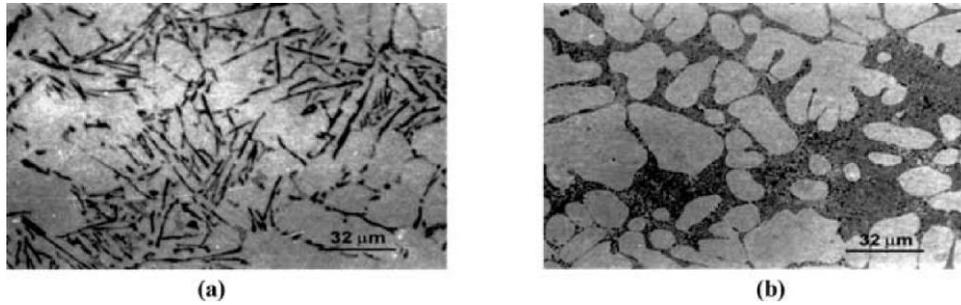


Figura 27. Efecto del espesor y la modificación en muestras coladas en molde de arena: a) 3 mm sin modificación, b) 9 mm sin modificación, c) 3 mm modificada Sr, d) 9 mm modificada Sr.



*Figura 28. Efecto del espesor y modificación en muestras coladas en molde metálico: a) sin modificación, b) con modificación Sr.*

El efecto en la modificación de la estructura se cuantifica mediante aspectos geométricos de las partículas de Si en la matriz y la cantidad de partículas tal como se muestra en la Figura 29. Los resultados se muestran bajo el efecto de la rapidez de enfriamiento, que se encuentra relacionada con el SDAS, y con el tratamiento de modificación aplicado con Sr. El aumentar la rapidez de enfriamiento si presenta un ligero cambio, pero el verdadero se muestra con la adición de un agente modificador, como el caso del Sr, el cual provoca disminución hasta de 400 % para el caso del diámetro promedio o aumento para el caso de las partículas, dependiendo nuevamente de caso en particular de SDAS. Lo mismo ocurre con las propiedades mecánicas, tal como se muestra en la Figura 30 donde los aumentos en las propiedades pueden ser de 4.4% para la resistencia y mucho mayor para la elongación, llegando hasta un 80 % de aumento para los distintos casos de SDAS obtenidos, mostrando la importancia del tratamiento.

Resultados similares se obtienen con el molde metálico, las propiedades se elevan ligeramente más debido justamente a que se produce una rapidez de enfriamiento mayor, donde se establece que a efectos combinados, una cantidad 0.02%Sr obtiene una estructura bien modificada para piezas obtenidas por colada en molde metálico.

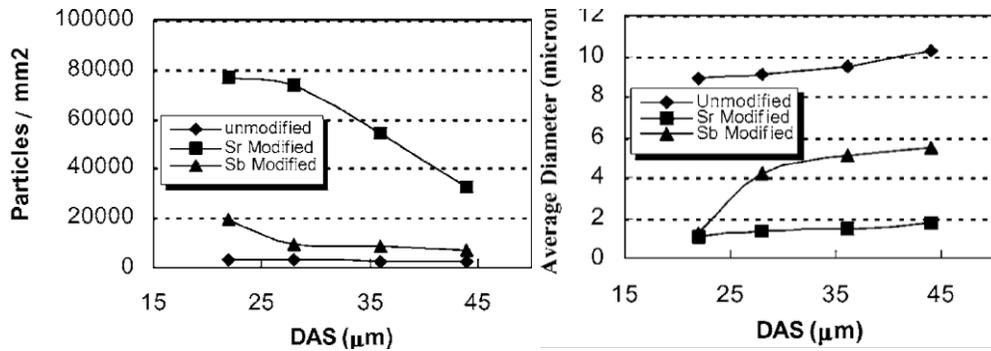


Figura 29. Aspectos geométricos de partículas en función del SDAS: a) partículas por área b) diámetro promedio.

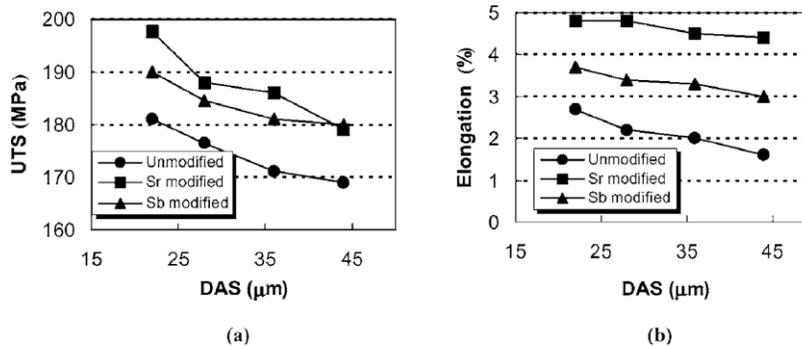


Figura 30. Propiedades mecánicas en función de SDAS: a) último esfuerzo de tensión-UTS y b) % de elongación.

W. Choi [16], quien presenta el estudio del efecto que tiene la rapidez de enfriamiento en la morfología del silicio eutéctico y en las propiedades mecánicas de una pieza que es obtenida por colada en molde metálico. El estudio se realiza con la aleación Al-9.7Si-0.7Cu-0.4Mg la cual tiene una composición similar a la 356, la muestra obtenida es una probeta rectangular colada en un molde metálico. Para lograr el fenómeno de tener una velocidad de enfriamiento distinta, se calentaron los moldes a 2 distintas temperaturas, uno a 95°C y otro a 200°C. En el estudio se incluye tratamiento térmico de envejecimiento para observar el efecto en la microestructura, y se examinan los resultados. Los resultados de la microestructura se presentan en la Figura 31.

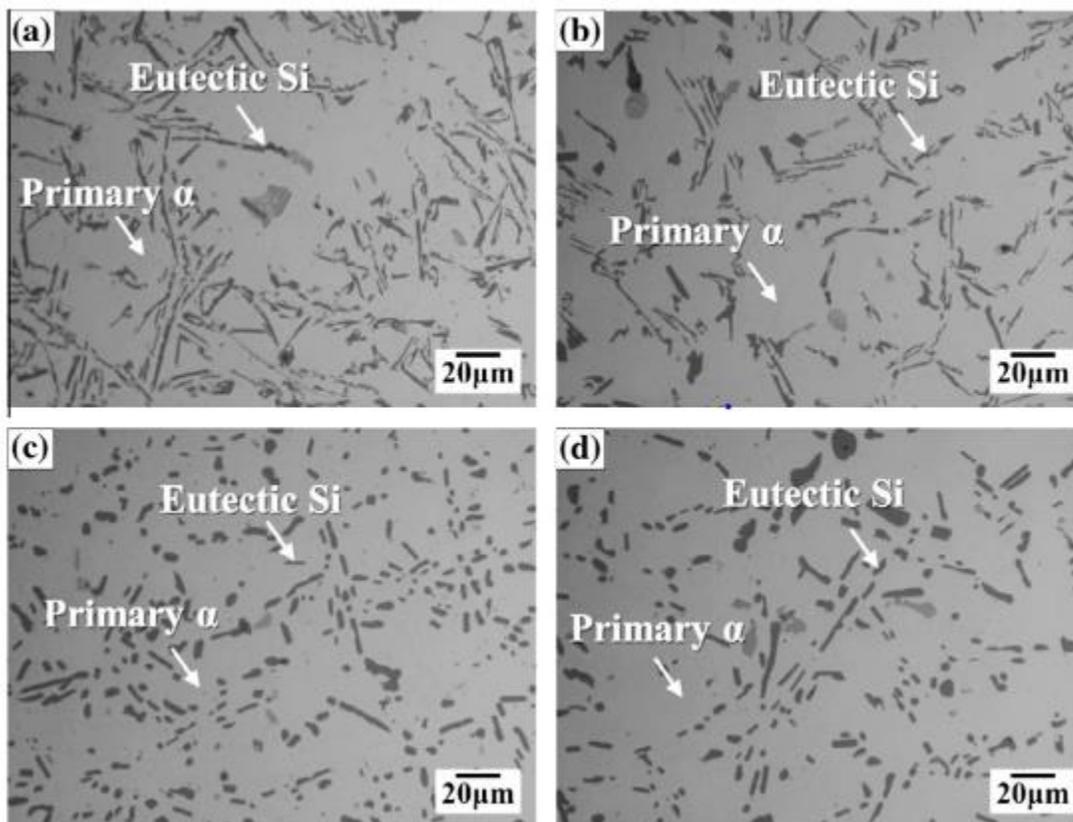


Figura 31. Microestructura de aleación Al-Si-Cu-Mg: a) molde a 95°C, b) molde a 200°C, c) molde a 95°C con tratamiento de envejecimiento 180°C, c) molde a 200°C con tratamiento de envejecimiento a 180°C.

En la Figura 32 se muestran los resultados de evaluar las partículas de silicio en las microestructuras. Los parámetros de los cuales se obtienen resultados son tamaño promedio de las partículas, radio promedio, así como cantidad de partículas presentes. Para esta evaluación se contempla el cambio cuando se aplica un tratamiento térmico de envejecimiento a la pieza, a 180° y 190°C, lo cual muestra una diferencia entre la morfología del silicio que se obtiene después de aplicar dicho tratamiento, mucho más notorio en el tamaño promedio de las partículas.

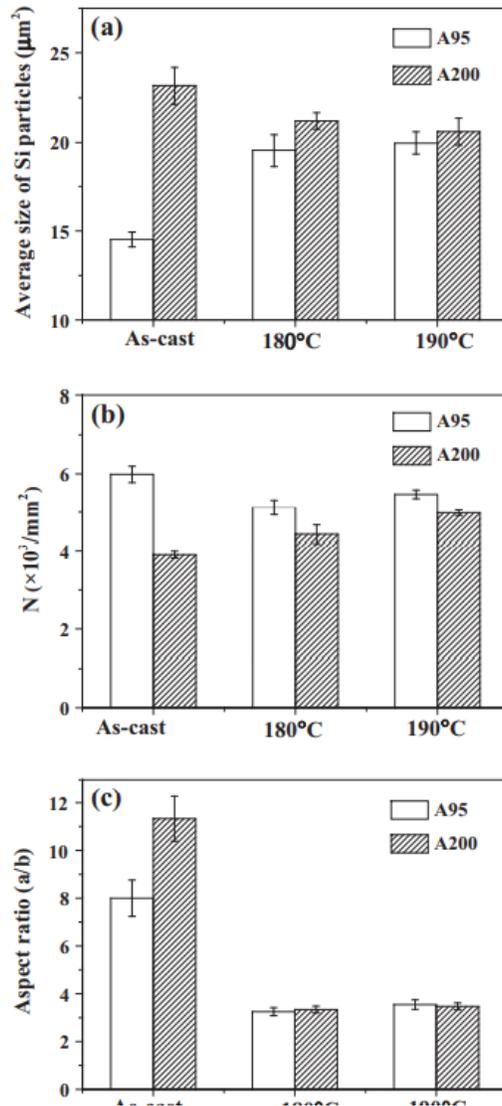


Figura 32. Variaciones microestructurales de las partículas de silicio obtenidas por A95°C y A200°C: a) tamaño promedio de las partículas, b) cantidad de partículas, c) radio promedio de las partículas.

Los resultados muestran que una mayor diferencia entre las temperaturas del molde cuando no se aplica un tratamiento térmico, es decir las partículas obtenidas son mucho más grandes para el caso con molde a 200°C, y relativamente más finas en el molde a menor temperatura, esto debido al efecto de la velocidad de enfriamiento que se presenta en cada caso.

Un factor más son los resultados del SDAS, el cual se presenta en la Figura 33. Una particularidad importante es que cuando se evalúan ambos ensayos, si están relativamente cerca de las paredes del molde el SDAS no cambia. A medida que la distancia de las paredes del molde aumenta también lo hace el SDAS y para el caso del molde a 200°C el valor es cercano a las 23  $\mu\text{m}$ .

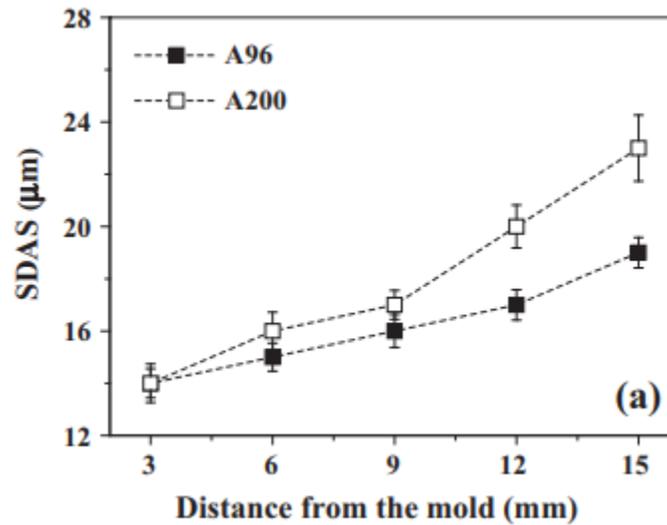


Figura 33. Variación del espacio interdendrítico secundario (SDAS) con temperatura de molde a 95°C y a 200°C, desde la pared del molde.

## 6. Discusión.

En este capítulo se analiza la información presentada en el apartado anterior para realizar la relación con los objetivos de la tesina y poder llegar a establecer valores de los parámetros adecuados para la obtención de una modificación correcta.

En todos los artículos se estudia o comenta acerca del efecto que tiene la modificación química y/o la rapidez de enfriamiento en la morfología del silicio eutéctico, Shakti [2017] toma algunas investigaciones y propone un valor cercano a 0.025% de Sr. El procedimiento se lleva a cabo en un molde metálico y aunque no se menciona el valor de la velocidad de enfriamiento, se estima que es alta debido a la capacidad de los moldes metálicos para extraer el Calor.

El planteamiento del problema se establece debido a los múltiples procesos de fabricación en las que se obtienen piezas hoy en día. Ya no son obtenidas únicamente por molde metálico que ha sido el más común, la complejidad de las piezas ha ido en aumento, por lo que se recurre a utilizar algunos otros medios dentro el molde para obtener las formas deseadas del componente. Estos son comúnmente llamados corazones, y por lo general, son fabricados de arena. De esta manera físicamente quedan 2 materiales por los cuales el material tendrá que pasar por el proceso de solidificación, a través de uno se presentará una velocidad de enfriamiento mayor que en el otro, refiriéndose al corazón, por lo que se esperan resultados distintos dependiendo de la zona con la que este en contacto el metal líquido.

Modificar la morfología del silicio provoca un cambio en las propiedades mecánicas del material, donde el autor señala que un valor adecuado es superior a los 200 MPa. El valor del Sr utilizado puede ser adecuado para moldes metálicos, pero no puede ser el establecido para el tipo de molde planteado en este trabajo, molde semipermanente. Por ello se continua con la opinión de más autores.

Shao-chun [2012], comenta acerca de la relación que se presenta entre la variación de la rapidez de enfriamiento y la microestructura obtenida, el autor realiza varias experimentaciones donde cada una de ellas arroja una rapidez de enfriamiento distinta, cambio el material del molde o para distintos niveles de espesor, estas condiciones tiene una relación paralela con el estudio de este trabajo ya que el efecto similar se presenta en el molde semipermanente, existe una extracción de calor más acelerada en una determinada zona. A pesar de que todos los moldes son fabricados a partir de arenas, las velocidades de enfriamiento son distintas, al obtener distintos valores de propiedades mecánicas y SDAS.

El autor del trabajo encuentra que, en espesores grandes, velocidades de enfriamiento altas, el efecto del Sr no parece ser muy significativo, pero esto es porque se alcanza un nivel óptimo de modificación. Se comenta que la velocidad de enfriamiento si tiene un efecto significativo en las propiedades del material y en su estructura que obtendrá al final del proceso de fabricación.

Otra cuestión similar ocurre con el espacio interdendrítico secundario (SDAS), donde también se ve afectado en forma similar. En el trabajo se presentan resultados donde el SDAS se ve aumentado en mayor tamaño para el caso donde la velocidad de enfriamiento es menor, en contra parte, si la velocidad de enfriamiento es mayor, de acuerdo con el material del cual está fabricado el molde, el SDAS es menor. El análisis del trabajo revela que, al tener velocidades de enfriamiento elevadas, ocurre una pseudo modificación y un decrecimiento en el SDAS obtenido, por lo que, relacionando con el caso en particular de este trabajo se espera que haya una modificación en la zona de la cual el componente este en contacto con molde metálico, teniendo estructuras heterogéneas en el componente. Shao, utiliza la cantidad de 0.035% de Sr para todos los ensayos y como punto de partida para el análisis térmico de cada caso.

De acuerdo con los resultados, este valor es ideal para espesores menores de 24 mm de espesor, ya que aun para los distintos tipos de arena utilizados los cambios

en el SDAS no serán muy significativos con el cambio de material, si el espesor aumenta es recomendable utilizar una mayor cantidad, para la obtención de una estructura bien modificada.

Mediante el trabajo realizado por el autor, se entiende que la zona sobre la cual se debe poner una atención especial es la que se encuentre en contacto con el molde de arena, ya que será la zona que de alguna manera tenga debilitamiento sobre el efecto del Sr que sea añadido al baño líquido. Bajo esta consideración se estima que una cierta parte del Sr que se vaya a añadir sea enfocada para la zona con menor velocidad de enfriamiento. Sin embargo, el valor de trabajo puede ser cercano al recomendado pues el material del molde fue de arena.

El autor Sachin Kumar [2017], realiza un análisis similar donde realiza el estudio de la rapidez de enfriamiento, pero ahora enfocado a un molde metálico que recibe un calentamiento a distintas temperaturas, teniendo una rapidez de enfriamiento baja, determinando su efecto en la estructura obtenida. Las condiciones del estudio son particulares, se realiza el estudio del efecto combinado de modificación y refinación.

En la pieza utilizada en el artículo ocurre la presencia de un agrietamiento, que resulta de ciertas consideraciones, la que tiene mayor interés es que se considera como la última zona en solidificar. Dado esto, el Sr pierde efecto en su objetivo modificador, y donde el silicio tiende a seguir de manera más paulatina al diagrama de fases estable, produciendo placas de silicio aciculares. Estas placas actuarán como concentradores de esfuerzos provocando la presencia de un agrietamiento.

De los valores utilizados en el estudio, el valor de 0.03% de Sr es el que mejor presenta una efectividad del tratamiento bajo las condiciones de un calentamiento de molde a 300°C, disminuyendo la rapidez de enfriamiento y que al mismo tiempo lo proteja de un agrietamiento. Con este valor se obtiene una estructura bien modificada y es cercano al valor que ha ido estimando.

La aleación A356 también se estudia desde otros puntos, como la corrosión. Para esto İsmail Öztürk [2018], primero realiza el estudio de la aleación obtenida bajo 2 métodos de colada muy conocidos, colada en molde de arena y colada a presión.

La experimentación consistió en aumentar la cantidad de Sr que se encuentra en el baño, y observar la modificación obtenida en los 2 métodos mencionados. Los valores utilizados son de 120, 170 y 250 ppm de Sr, valores que son menores a los que hemos estado estudiando, el detalle se encuentra en el método de fabricación. El proceso de colada a presión es el proceso que mayor velocidad de enfriamiento tiene, por lo que la modificación térmica es la que mayor efecto tiene. Las microestructuras que se obtienen del proceso de colada en molde de arena, aun con el valor más alto de modificación presentado en el estudio resultan en partículas de silicio gruesas, adoptando en algunas zonas la forma globular fibrosa pero no puede considerarse como una estructura bien modificada. Caso contrario ocurre con la colada a presión, aun sin agregar Sr la estructura ya presenta una cierta modificación, que aumenta conforme el contenido de Sr también lo hace, pero que al valor de 170 ppm ya se obtiene una estructura modificada y a 250 ppm bien modificada.

Este valor estimado es ideal y adecuado para el caso de la colada a presión, pero nuevamente, este método tiene la velocidad de enfriamiento mayor de todos los casos, es recomendable realizar una estimación de la velocidad de enfriamiento y posteriormente realizar una comparación con las rapidezces impuestas en los métodos tradicionales.

Se ha mencionado que este proceso no es único en los tratamientos comúnmente aplicados a las aleaciones de Al-Si. El tratamiento que acompaña es la refinación del grano A.M. Samuel [2014] realiza estudios sobre la interacción y combinación de estos tratamientos. En el trabajo, para analizar la interacción que tiene los tratamientos se realizan ensayos de impacto a barras normalizadas.

El enfoque de trabajo está en la cantidad de Sr que se aplica a distintos ensayos, fijando 2 valores y variando el contenido de los elementos de Ti y B, que, aunque no son objetivos de este trabajo, la interacción que tienen con el Sr afecta al grado de disminuir su efecto. Esta observación es la más importante, pues para un caso donde se tengan que aplicar ambos tratamientos, el valor de Sr que se deba añadir sea mayor.

El boro es un elemento que tiene interacción con el Sr, llegando a formar un compuesto, y con ello disminuyendo el contenido de Sr para que ocurra la modificación. Los resultados de la investigación demostraron que para un cierto nivel de modificación la cantidad de B no debe ser muy elevada dado que existen estas interacciones mencionadas y puedan provocar que el efecto de la modificación se vea disminuido. Para el caso del Ti no se presenta este problema, dado que al tener cantidades elevadas de Ti no existe interacción con Sr, lo que se traduce en el efecto modificador no presenta alguna complicación.

Ahora bien, en el ámbito de interés para nuestro trabajo, el autor desarrolla la investigación con un valor de Sr de 200 ppm y es colada en un molde permanente. Ya se dijo que la modificación si tendrá efecto por el elemento del B que comúnmente es utilizado para realizar la refinación, sin embargo, el efecto puede continuar siendo analizado al observar la microestructura de la pieza y el valor de Sr contenido. La velocidad de enfriamiento es alta por la condición del molde, el elemento de Ti no tiene interacción respecto al efecto modificador y son las imágenes que se presentan en la figura del estudio, observe Figura 15.

Observando las microestructuras se puede determinar que aun con el valor de Sr añadido de 200 ppm, la modificación no es adecuada, en algunos casos parece estar modificada, pero debe avanzar hacia el siguiente nivel. Por tanto, el valor no es recomendado para este método de colada, estimando que el valor debe aumentar para lograr que la morfología del silicio cambie a una estructura más globular fibrosa.

M. Tash [2007] realiza el estudio para observar las diferencias, comparando la aleación A356 y la A319. Estas son aleaciones que se pueden modificar y que por lo general reciben algunos tratamientos, como el de envejecimiento, para aumentar las propiedades mecánicas de la pieza. En el estudio destaca el hecho de que las propiedades son mayores en la 319 que en comparación con la 356, varios factores pueden influir. Revisando la composición química, el Si tiene un valor similar en ambas aleaciones por lo que no es quien provoca este efecto significativo, por otra parte, el Mg se encuentra en mayor cantidad en la aleación 356 lo que origina que parte del Sr añadido forme intermetálicos con el Mg y disminuir el efecto modificador.

El enfoque está dirigido a la fabricación de estas piezas y que no hayan recibido algún tratamiento posterior, ya que de ser así los resultados ya no serían los correspondientes de acuerdo con el método de fabricación. Sin embargo, también está la contribución de los intermetálicos de la aleación ya que estos también pueden afectar al momento de añadir el elemento modificador, logrando que la modificación pueda verse disminuida.

La cantidad de Sr no es un parámetro que se encuentre definido pues se varia un poco respecto a cada medición, pero, la que tiene más predominancia es la de 170 ppm y, aunque no se observa una imagen de cada microestructura, no es un valor recomendado. La colada se realiza en molde permanente, que provoca una rapidez de enfriamiento elevada, pero no lo suficiente como para presentar una estructura modificada con una baja cantidad de Sr. Esto también en conjunto las ideas presentadas anterior y posteriormente por los autores analizados. Una manera posible de poder confirmar esto es mediante el análisis de los valores de propiedades mecánicas, que aun con modificación continúan bajas o similares a como si no se hubiera aplicado el tratamiento.

Analizando los casos de estudio que son similares, Guilio [2016] comenta de la obtención de un componente de los automóviles muy importante como lo es el monoblock, pero obtenido bajo un proceso de colada a presión baja. Este proceso tiene ciertos aspectos que asimilan el proceso con las condiciones que se generan cuando se recurre a otro método de fabricación. Si bien es cierto que la colada requiere de presión, no es el mismo fenómeno que se observa con la colada a presión alta. Para este caso, la presión se aplica sobre la olla y el metal fluye hacia el molde que se encuentra en la parte superior, el molde es llenado de manera lenta y aunque su material es de metal, la velocidad de enfriamiento es muy lenta obteniendo valores bajos como los que se presentan en el artículo.

Para la obtención de las rapidezces de enfriamiento, el autor lo relaciona con el SDAS y a manera de alguna relación matemática es como obtiene este valor, que, analizando objetivamente, se obtienen valores muy pequeños. Ahora bien, con estos resultados, se nota un cierto comportamiento cuando la presión tiende a disminuir el valor del SDAS es pequeño, pero cuando la presión aplicada a la olla aumenta, el tamaño del SDAS también lo hace, lo cual parece ser una contradicción pues sabemos que la presión influye en la rapidez de enfriamiento.

La presión que se aplique a la olla tiene un efecto además en la temperatura de fusión de la aleación, esto por causas termodinámicas. Pero, desde el punto de vista interno del molde, la presión provoca que haya un mayor contacto con las paredes del molde en un menor tiempo, posteriormente el llenado con metal caliente provoca que la extracción de calor sea más lenta. Esta observación se confirma al analizar los valores de la velocidad de enfriamiento, que también presentan una disminución pero que, al analizar su relación con el SDAS, los valores tienen concordancia, una velocidad de enfriamiento baja tiene SDAS alto y viceversa con una rapidez de enfriamiento alta. El autor señala el uso de 170 ppm de Sr y aunque el valor es bajo y no logra una estructura bien modificada, si se puede observar el efecto de la rapidez de enfriamiento sobre la modificación, el valor no se considera como el adecuado considerando además el tipo de molde.

Un caso donde la rapidez de enfriamiento sea excesivamente alta lo presenta Qing [2018]. Su trabajo presenta el caso donde el método de colada es la caída de metal líquido en una rueda de cobre para generar una laminilla de Al-7Si, esta rueda está girando a determinada rapidez y con base en ello se estima la rapidez de enfriamiento, las cuales de acuerdo con el estudio son muy elevadas cercanas al valor  $2 \times 10^7$  K/s.

Comencemos por analizar la cantidad de Sr añadida, que hasta el momento es el valor más alto de todos los estudios analizados. Su valor de 426 ppm es elevado, y en conjunto con una rapidez de enfriamiento tan elevada es de esperarse que la estructura está bien modificada, incluso pudiendo ser que llegara a presentar sobremodificación.

Las imágenes de las microestructuras de la investigación revelan que la morfología del silicio está completamente globular fibrosa, esto para el caso de la rapidez lenta, en el otro caso presentado donde el disco gira a una mayor velocidad, estructura de igual manera está bien modificada e incluso parece que la morfología del silicio parece engrosarse un poco, señales de la sobremodificación, aunque es muy poco y para observar con más detalle sería necesario algunas imágenes extra.

Una característica extra que se puede observar es la forma del grano de la aleación, donde en la rapidez alta se presenta una mayor zona de grano columnar, señal de que la solidificación ocurre en forma unidireccional. Pero para nuestro caso de interés, el valor de Sr es ideal para esta rapidez de enfriamiento e incluso para menores, de acuerdo con lo que se ha venido reportando en conjunto con la opinión de los otros autores. El valor de Sr también puede ser ligeramente disminuido estimando ya un valor de 0.04% de Sr.

Longfei [2020] presenta un estudio más relacionado con el objetivo y planteamiento de este trabajo. Se presentan 2 situaciones con distinta longitud de espesor para determinar específicamente una velocidad de enfriamiento. Respecto al agente modificador, se utiliza un elemento de tierra rara, el La. El elemento no tiene el mismo efecto que el Sr, pero tiene una cierta equivalencia al ocasionar que el efecto de modificación se vea aumentado cuando la rapidez de enfriamiento es alta.

Se presentan distintos valores de la rapidez de enfriamiento, estos valores mucho más acorde con los que posiblemente se presenten en el molde semipermanente. El autor analiza los resultados para las distintas rapidezces de enfriamiento, con y sin agregar el elemento modificador. Para el caso en cuestión donde no se agrega modificador, las primeras velocidades que plantea el autor no presentan un nivel de modificación aceptable, sino es necesario llegar hasta el último valor, el de 130 K/s. Si ahora agregamos la cantidad de modificador que se plantea, los resultados si presenta una variación entre sí. Como se ha mencionado anteriormente, la modificación química se apoya con la térmica y logran una estructura bien modificada, por lo que al valor estimado de 30 K/s ya se presenta que el silicio adopta la forma globular fibrosa.

Ahora bien, hay una cuestión interesante con la rapidez de enfriamiento más alta, la estructura con o sin modificador logran resultados similares en la longitud y radio promedio del silicio eutéctico. El efecto puede ser similar con el caso del Sr, ya que su objetivo es el mismo, aunque si debe mencionar que si habrá una pequeña variación debido a que tanto el La cómo el Sr ayudan a lograr el efecto de modificación en mayor medida cuando se ha realizado la modificación térmica. Lo trascendente del estudio es que estas rapidezces son las que probablemente se presenten en el molde semipermanente y por lo tanto lograr una estructura bien modificada en toda la pieza.

E. Vandersluis [2020] enfocó su estudio en analizar el efecto que se produce por tener distintas velocidades de enfriamiento, esto mediante el calentamiento del molde. El contenido de Sr afecta incluso la Temperatura eutéctica pues los resultados muestran que esta solamente sufre un cambio al momento de tener un contenido de Sr. En el análisis del silicio eutéctico, los resultados muestran dos casos muy interesantes de analizar. En el apartado (e) de la figura 25 muestran que presenta una estructura muy similar al apartado (f), la particularidad se encuentra que para el apartado (e) se utilizó una menor cantidad de Sr pero con una velocidad de enfriamiento mucho mayor en comparación con el apartado (f). Para compensar la velocidad de enfriamiento mucho más lenta se añade una mayor cantidad de Sr (223 ppm) logrando dos estructuras similares y con un silicio eutéctico más cercano al globular fibroso.

Las gráficas muestran la comparación de aspectos del Si eutéctico, donde el radio promedio, diámetro circular y esfericidad coinciden en tener una tendencia constante después de poco más de 100 ppm de Sr, donde es relevante que incluso con un rango separado de velocidades de enfriamiento los valores no se encuentran tan separados y es posible que en algún momento la distancia entre rangos incluso sea menor. Esto es lo que ocurriría en las distintas zonas que conforman un molde semipermanente.

G. Shabestari [2004] enfoca su estudio en observar el efecto que tiene la velocidad de enfriamiento, como tal no presenta algún valor numérico de las velocidades enfriamiento, sin embargo, el valor de DAS es quien indica que si la solidificación es más lenta o rápida. Al analizar los resultados, se indica que se agrega 0.02% de Sr, es evidente que el DAS cambio en cuando aumento el espesor del molde de arena, obteniéndose un DAS mayor y por ende las partículas de Si eutéctico también poseen mayores dimensiones, ambas estructuras se encuentran modificadas. En cambio, en el molde metálico con el mismo contenido de Sr la estructura obtenida se encuentra bien modificada, indicando nuevamente la importancia de la velocidad de enfriamiento.

Para cuantificar el impacto provocado por obtener un valor de DAS menor (velocidad de enfriamiento alta) se realiza un gráfico donde se observa que es posible obtener hasta un 400% de más partículas cuando se añade la cantidad de Sr en el estudio, 0.02%, y que el diámetro promedio también disminuirá, esto con un valor de DAS cercano a los 20  $\mu\text{m}$ , pero que también es conveniente no tener valores de DAS en un rango amplio para no evitar tener esta variación tan grande en el Si eutéctico.

El trabajo de W. Choi [2014] no se encuentra enfocado en la adición de un elemento modificador, sin embargo, todos los resultados presentados en el artículo se enfocan en el efecto que tiene la velocidad de enfriamiento en la estructura eutéctica que se obtiene en el material.

Para efectuar este análisis se utilizaron 2 moldes y se calentaron a distinta temperatura, uno a 95°C y otro a 200°C. Los resultados muestran que efectivamente la rapidez de enfriamiento, controlada por la temperatura del molde, afectan las características de forma del silicio eutéctico, las propiedades mecánicas y el SDAS. Sin embargo, un gráfico muestra que cuando la distancia del molde es corta, el SDAS no tiene una variación en cuanto a la temperatura del molde, esto es porque la solidificación en las paredes del molde es casi instantánea y no permite que la distancia interdentica incremente.

La aportación de W. Choi [2014], para este trabajo es el haber involucrado un tratamiento térmico de envejecimiento. El tratamiento térmico el encargado en este estudio de lograr la estructura modificada y lo hace de una manera efectiva, al igual algunos otros autores también han concordado en que este proceso ayuda a obtener la estructura deseada en las piezas de Al-Si. Este proceso puede considerarse como una alternativa a aplicar cuando se obtiene una pieza por molde semipermanente dado justamente las diferencias entre velocidades de enfriamiento, y que al momento de aplicar este proceso adicional puede ayudar a lograr el resultado deseado.

Con el análisis de todas las investigaciones presentadas es posible llegar a establecer un rango de valores óptimos de Sr y condiciones que serían aplicables al molde semipermanente. En cuestión del contenido de Sr se establece que el valor recomendado este entre 0.025% y 0.035%. Estos valores garantizan una microestructura bien modificada y una transición completa de morfología acicular a globular fibrosa por parte del Si eutéctico. El establecer estos valores es válido para el caso del molde semipermanente, pues se presentarán rapidezces de enfriamiento que los autores han señalado y estudiado con las condiciones del material del molde o espesores de pieza, los valores cercanos a este rango de cantidad de Sr añadido han podido obtener una estructura bien modificada. Una cuestión que si debe cuidarse es que las rapidezces de enfriamiento no sean tan bajas (menores a un valor de 9 a 30 K/s) ya que el resultado puede no ser homogéneo en toda la pieza.

## 7. Conclusiones.

- S. Shakti, establece un valor óptimo de contenido 0.025% Sr para un molde permanente, obteniendo altas propiedades mecánicas.
- Shao-Chun, establece el valor 0.035% de Sr para la colada en molde de arena, aun cuando haya distinta capacidad de enfriamiento, para espesores menores a 25 mm.
- K. Sachin, recomienda el valor de 0.03% de Sr, pero la estructura requiere de mayor aumento para observar si la modificación es completa.
- İ. Öztürk, encuentra que el valor de 250 ppm es adecuado para moldes metálicos, aunque para los de arena no tanto, sin embargo, la pieza fabricada es de pequeño espesor, lo que implica rapidez de enfriamiento alta.
- Samuel A., experimenta con valores de 200 ppm para observa la interacción con otros elementos, sin embargo, la estructura no parece estar bien modificada.
- M. Tash, también experimenta con valores bajos de Sr (170 ppm), pero debido al poco cambio en propiedades y sin una buena modificación.
- T. Guilio, utiliza el mismo valor que el autor anterior, se observa una estructura con un bajo nivel modificación, pero la rapidez de enfriamiento está influenciada por la presión aplicada al método de fabricación
- L. Qing, trabaja con un valor de 426 ppm de Sr, la estructura obtenida está bien modificada, sin embargo, la velocidad de enfriamiento es muy alta.
- L. Longfei estima un valor de 0.4% de La, y aunque no es el elemento de interés Sr, establece un rango de rapidezces de enfriamiento para modificación bien realizada con valores cercanos de otros elementos.
- E. Vandersluis, muestra que a valores superiores a 200 ppm, el Si logra adoptar un rápido promedio y diámetro circular similar en la velocidad de enfriamiento más lenta con la velocidad de enfriamiento mayor, análogo al molde semipermanente.

- G. Shabestari, empleo un contenido de Sr de 0.02 realizo el estudio en un molde metálico y en un molde de arena, en el cual para el molde metálico se obtiene un silicio eutéctico bien modificado, en molde de arena se observa el silicio de mayor tamaño debido al cambio en la velocidad de enfriamiento
- W. Choi, muestra que el tratamiento térmico de envejecimiento también ayuda para lograr que el silicio adopte una forma más cercana a la globular fibrosa por lo que en caso de permitirse, añadir un tratamiento térmico es una opción a considerar para lograr una estructura bien modificada.
- En conjunto con el análisis de los resultados presentados, el rango de ente 0.025% y 0.035% de Sr es adecuado para colada en moldes semipermanentes para obtener una estructura bien modificada, nivel 5 del patrón de AFS.

## 8. Referencias

### Libros y Tesis

1. D. S. Cubero. Modificación de la morfología de silicio en la aleación de aluminio A356 mediante ciclos de calentamiento y enfriamiento. Universidad Central de Venezuela. Caracas, 2002, p 4.
2. Y. A. Solano. Estudio del efecto del nivel modificación, tiempo de tratamiento y velocidad de enfriamiento en una aleación Al-Si sobre la morfología del silicio eutéctico empleando la técnica de análisis térmico. Tesis UNAM. CDMX, 2019. p 2-4, p 14
3. R. M. Alvarado. Relación entre microestructura y propiedades mecánicas en piezas vaciadas de aluminio. Tesis UANL. Nuevo León, 1999. p 28-31 <http://eprints.uanl.mx/654/1/1020126379.PDF>
4. F.C. Robles, Et al. Al-Si Alloys Automotive, Aeronautical, and aerospace applications. Springer. Switzerland, 2017. p 189, 190.

### Artículos

5. S. Shakti, Et al. Effect of Grain refinement, Modifier and Stirring on properties of A356, Materials Today: Proceedings, Volume 4, Issue 2, Part A, 2017, Pages 734-739.
6. S. Shao-chun, Et al. Effects of molding sands and wall thickness on microstructure and mechanical properties of Sr-modified A356 aluminum casting alloy, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Volume 22, Issue 8, 2012, Pages 1884-1890
7. K. R. Sachin, Et al. Effect of mold temperature, grain refinement and modification on hot tearing test in Al-7Si-3Cu alloy, Engineering Failure Analysis, Volume 79, 2017, Pages 592-605.
8. İ. Öztürk, Et al. Effects of strontium addition on the microstructure and corrosion behavior of A356 aluminum alloy, Journal of Alloys and Compounds, Volume 763, 2018, Pages 384-391.
9. A.M. Samuel, Et al. Effect of grain refining and Sr-modification interactions on the impact toughness of Al-Si-Mg cast alloys, Materials & Design (1980-2015), Volume 56, 2014, Pages 264-273.
10. M. Tash, Et al. Effect of metallurgical parameters on the hardness and microstructural characterization of as-cast and heat-treated 356 and 319 aluminum alloys, Materials Science & Engineering, Volume 443, 2007, pages 185-201
11. T. Guilio, Et al. Influence of process parameters and Sr addition on the microstructure and casting defects of LPDC A356 alloy for engine blocks, Materials Science & Technology, Volume 32, 2016, pages 515-523.
12. L. Qing, Et al. Effects of Sr, Ce and P on the microstructure and mechanical properties of rapidly solidified Al-7Si alloys, Materials Characterization, Volume 140, 2018, pages 290-298.

13. L. Longfei, Et al. Effect of cooling rate on eutectic Si in Al-7.0Si-0.3Mg alloys modified by La additions, *Journal of Alloys and Compounds*, Volume 826, 2020, pages 1-10.
14. E. Vandersluis, Et al. Solidification rate and the partial modification of 319 aluminum alloy with strontium, *International Journal of Metalcasting*, Volume 14, 2020, pages 37-46
15. S.G. Shabestari, Et al. Influence of modification, solidification conditions and heat treatment on the microstructure and mechanical properties of A356 aluminum alloy. *Journal of Materials Science*. Volume 39, 2004, pages 2023-2032.
16. S. W. Choi, Et al. The effect of cooling rate and heat treatment on mechanical and thermal characteristics of Al-Si-Cu-Mg foundry alloys. *Journal of alloys and compounds*. Volume 617, 2014, pages 654-659.