



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

“Cuantificación de microconstituyentes de aleaciones coladas A356-Cu-Mg-Ni aplicando metalografía en color asistida por análisis de imágenes digitalizadas”

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERA QUÍMICA METALÚRGICA

PRESENTA:

Carolina Constantino Guzmán



México, D.F.

2010

JURADO ASIGNADO:



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.

PRESIDENTE: Profesor: Sergio García Galán

VOCAL: Profesor: Adrián Manuel Amaro Villeda

SECRETARIO: Profesor: José Alejandro García Hinojosa

1er. SUPLENTE: Profesor: Balbina Ojeda Ramírez

2° SUPLENTE: Profesor: Eusebio Cándido Atlatenco Tlapanco

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA: FACULTAD DE QUÍMICA EDIFICIO
"D" DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA

ASESOR DEL TEMA: DR. JOSÉ ALEJANDRO GARCÍA HINOJOSA

SUPERVISOR TÉCNICO : I.Q.M. EUSEBIO CÁNDIDO ATLATENCO TLAPANCO

SUSTENTANTE : CAROLINA CONSTANTINO GUZMÁN

AGRADECIMIENTOS

A Dios

A mis padres Xóchitl Guzmán Vázquez y Orlando Constantino Espinoza
Gracias por hacerme la mujer que soy ahora.

A mi tía Liz que sin su apoyo esto no hubiera sido posible.

A mi hermano Orlando, gracias por tu amistad.

A mi familia por su apoyo incondicional.

Tlapanco.

A mis amigas más queridas Ana y Tanna gracias por ser mis hermanas.

A mis amigos de la carrera Estefa, Gaby, Mona, Javi, Lilia, Diana, Abril, Mau,
Leo, Oswaldo, Mon, Diego, Pepe, Chino, Jon, Alberto, Zucoso.

A Leonardo por enseñarme a apreciar los pequeños instantes de la vida.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN

Objetivos

Objetivos particulares

CAPÍTULO I. Aleaciones de aluminio para fundición y efecto de los elementos de aleación

1.1 Aleaciones de colada

1.2 Designación de Aleaciones

1.3 Efecto de los elementos aleantes

1.4 Sistemas de aleación

1.4.1 Aleaciones Al-Cu-Si

1.4.2 Aleaciones Al- Si

1.5 Modificación de Aleaciones de colada Al-Si

1.5.1 Modificación del Silicio

1.5.2 Efecto en la microestructura

1.5.3 Sobremodificación

1.5.4 Decaimiento del modificador

1.5.5 Propiedades de las aleaciones modificadas

CAPÍTULO II. Aplicaciones y tendencias de aleaciones complejas base aluminio de fundición

2.1. Tendencias de aleaciones complejas base aluminio de fundición

2.2. Efecto del Mg y Sr en la formación de intermetálicos

2.3. Efecto del Fe y Sr en la formación de intermetálicos de Cu

2.4. Aplicaciones para intermetálicos Al-Ni

CAPÍTULO III. Métodos de caracterización metalográfica para aleaciones colada base aluminio

3.1 Microscopía Óptica

3.2 Microscopio Electrónico de Barrido (SEM)

3.3 Microanálisis Químico por EDS

3.3.1 Componentes del EDS

3.3.2 Análisis cualitativo por EDS

3.3.3 Análisis cuantitativo por EDS

3.4 Descripción cualitativa de microestructuras e identificación microconstituyentes en aleaciones de aluminio para fundición

3.5. Métodos de cuantificación en microscopía óptica

CAPÍTULO IV. Desarrollo experimental

4.1. Preparación metalográfica

4.1.1 Secuencia de corte y desbaste

4.1.2 Formulación de reactivos de ataque

4.1.3 Secuencias de ataque químico

4.1.4 Selección del reactivo de ataque químico

4.2. Observación microscópica y cuantificación de fases

4.3. Análisis cualitativo de fases

CAPÍTULO V. Resultados y Análisis

5.1. Aleaciones sin modificación

5.1.1 Aleación A356-1%Cu-1%Mg-0.25%Ni

5.1.2. Aleación A356-1%Cu-1%Mg-0.50%Ni

5.1.3. Aleación A356-1%Cu-1.5%Mg-0.25%Ni

5.1.4. Aleación A356-1%Cu-1.5%Mg-0.50%Ni

5.1.5. Aleación A356-1%Cu-2%Mg-0.25%Ni

5.1.6. Aleación A356-1%Cu-2%Mg-0.50%Ni

5.2. Aleaciones modificadas

5.2.1 Aleación A356-1%Cu-1%Mg-0.25%Ni

5.2.2. Aleación A356-1%Cu-1%Mg-0.50%Ni

5.2.3. Aleación A356-1%Cu-1.5%Mg-0.25%Ni

5.2.4. Aleación A356-1%Cu-1.5%Mg-0.50%Ni

5.2.5. Aleación A356-1%Cu-2%Mg-0.25%Ni

5.2.6. Aleación A356-1%Cu-2%Mg-0.50%Ni

5.3. Microscopio electrónico de barrido (MEB)

5.4. Análisis de resultados

5.4.1 Aleaciones sin modificación

5.4.2 Aleaciones modificadas

5.4.3 Comparación entre aleaciones no modificadas y modificadas

CAPÍTULO VI. Conclusiones

BIBLIOGRAFIA

REFERENCIAS

APENDICE

APENDICE

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de aleaciones ligeras para aplicaciones de alta demanda en propiedades mecánicas y químicas es cada vez más demandante por la industria, especialmente la automotriz y la aeronáutica. Lo anterior ha llevado al desarrollo de nuevas aleaciones con más de dos o tres elementos aleantes, en las que precipitan microconstituyentes complejos ternarios o cuaternarios, a diferencia de los tradicionales sistemas binarios o ternarios base aluminio. El propósito de la adición de aleantes es el de incrementar las propiedades mecánicas. Considerando que las propiedades mecánicas dependen de las características microestructurales como: espaciamiento interdendrítico, así como también de la fracción, ubicación, tamaño y forma de los microconstituyentes, el objetivo de esta tesis es desarrollar y aplicar métodos de evaluación cuantitativa de microconstituyentes en aleaciones multielementos o complejas A356-X%Cu-Y%Mg-Z%Ni. Para ello se aplicaron métodos de metalografía óptica en color (MOC) para identificación de forma, tamaño, ubicación y distribución de las fases complejas precipitadas adicionales a los microconstituyentes fundamentales de la aleación A356 que son las fases Al(α) y el silicio eutéctico. Mediante análisis químicos puntuales por microscopía electrónica de barrido (MEB) y microanálisis por espectrometría de energía dispersiva (EDS) se determinó la composición química de las fases y microconstituyentes. Finalmente la cuantificación de las fases complejas solidificadas se realizó por análisis de imágenes digitalizadas mediante el software Image Pro-Plus.

El capítulo I describe de forma general las aleaciones de aluminio de fundición, sus principales propiedades y procesos de fabricación. Así como también la designación de estas y el efecto de los elementos aleantes.

Se menciona y se describe los sistemas de aleación principales, Al-Si y Al-Cu-Si.

La modificación de silicio eutéctico, sus efectos, propiedades, principales elementos modificadores, microestructuras resultantes y decaimiento del modificador.

El capítulo II describe de forma más detallada las aleaciones modificadas de Al-Si, el efecto de algunos elementos en la formación de intermetálicos, aplicaciones de estos y tendencias de las aleaciones modificadas de aluminio para fundición.

En el capítulo III se abarcan los métodos de caracterización metalográfica más utilizados para las aleaciones de aluminio de fundición y la descripción cualitativa de microconstituyentes, con apartados donde se describen las fases más comunes y los reactivos de ataque selectivos para estas aleaciones.

El capítulo IV abarca toda la fase experimental de esta tesis, desde el diseño y fabricación de cada aleación, la secuencia de fusión, la preparación metalográfica, así como la cuantificación cualitativa y cuantitativa de cada fase presente en las aleaciones modificadas.

En el capítulo V se encuentran todos los resultados obtenidos en la presente tesis, en primer lugar se encuentran las aleaciones en las cuales el silicio eutéctico no fue modificado, el porcentaje de cada fase, las mascaradas en las cuales se llevo a cabo la cuantificación y la composición química real obtenida para cada aleación. A continuación se encuentran las aleaciones en las que el silicio eutéctico si fue modificado y se muestran de igual manera que las anteriores, el porcentaje de cada fase, las mascaradas en las cuales se llevo a cabo la modificación y la composición química real obtenida.

Después se muestran los resultados obtenidos en el microscopio electrónico de barrido (SEM), lo cual se utilizó para saber la composición química de cada fase encontrada, se muestra una imagen de la fase, el espectro de la composición química, la composición en por ciento en peso y por ciento atómico y la estequiometría de dicho microconstituyente.

Por último se muestran los análisis de dichos resultados.

En el capítulo VI se encuentran las conclusiones de esta tesis.

Objetivos

- Evaluar el efecto de adición de niveles superiores a los nominales en la aleación A356 (en condiciones de colada) de Cu, Mg, y Ni sobre su microestructura. Sin y con tratamiento de modificación del silicio eutéctico.
- Cuantificación de microconstituyentes solidificados y evaluación puntual de la composición química de dichos microconstituyentes, al variar el contenido de Mg y Ni.

Objetivos particulares

- Preparación metalográfica de cada una de las aleaciones.
- Identificación de microconstituyentes y análisis de composición química de estos.
- Evaluación de la microestructura al modificar los contenidos de Mg y Ni.
- Evaluación de la microestructura una vez realizado el tratamiento de modificación del Si eutéctico.

Capítulo I. Aleaciones de aluminio para fundición y efecto de los elementos de aleación

1.1 Aleaciones de colada

Las aleaciones de aluminio para fundición son las más versátiles de todas las aleaciones de fundición y generalmente tienen altos rangos de colabilidad. Como materiales de fundición, las aleaciones de aluminio deben tener las siguientes características:

- Buena fluidez para secciones delgadas
- Puntos de fusión relativamente bajos en comparación con otros metales
- Rápida transferencia de calor del aluminio líquido al molde, con esto se promueven los ciclos de colada cortos
- El hidrógeno es el único gas con solubilidad apreciable en el aluminio y sus aleaciones, y la solubilidad del hidrógeno en el aluminio puede ser controlada durante el proceso.
- Muchas aleaciones de aluminio están relativamente libres de sufrir fracturas en caliente y tendencias a esta
- Buena estabilidad química
- Buena superficie de colada, con superficies lustrosas y libres de manchas

Las aleaciones de aluminio para fundición son normalmente producidas por los procesos de colada a presión (die-casting), molde permanente, arena en verde, cera perdida (investment y plaster casting). También son rápidamente coladas en vacío, baja presión, colada centrifuga y por procesos convencionales como modelo evaporable (lost foam).

1.2 Designación de Aleaciones

Los sistemas usados para designar la composición no están estandarizados internacionalmente. En los Estados Unidos, la designación de aleaciones se realiza por especificaciones requeridas por agencias del gobierno (federal, militar, etc.), y por sociedades técnicas como ASTM y SAE International.

Las aleaciones registradas por la AA (Aluminium Association) están designadas por su uso principal; esta nomenclatura es decimalizada para definir las variaciones en composición de la aleación.

La designación en la forma xxx.1 y xxx.2 incluyen la composición específica de las aleaciones en lingote para su refusión y llenado de moldes.

La designación en la forma xxx.0 define los límites de composición aplicables en las piezas de fundición. Algunas variaciones en la composición específica son denotadas por letras como prefijos, usados principalmente para definir límites de impurezas.

De acuerdo con lo anterior, una de las aleaciones más comunes es la 356, en la que se muestran variaciones como A356, B356 y C356; cada una de estas aleaciones tienen similares contenidos en los aleantes principales, pero poseen un decremento en los límites específicos para impurezas, especialmente en hierro.

En el apéndice I se presentan las tablas de composición química y designación de algunas aleaciones de colada. La tabla 1.1 muestra la designación para las aleaciones de Aluminio coladas (ACA), así como sus principales aleantes.

Tabla 1.1. Designación de las aleaciones de Aluminio coladas (ACA):

| Designación | Aleación |
|-------------|--|
| 1xx.x | Aluminio 99% de pureza o mayor |
| 2xx.x | Aleaciones de Aluminio con Cobre como principal elemento aleante |
| 3xx.x | Aleaciones Aluminio-Silicio con contenidos de Magnesio y/o Cobre |
| 4xx.x | Aleaciones binarias Aluminio-Silicio |
| 5xx.x | Aleaciones de Aluminio con Magnesio como principal elemento aleante |
| 6xx.x | No utilizadas actualmente |
| 7xx.x | Aleaciones de Aluminio con Zinc como principal elemento aleante, usualmente también contienen Cobre, Magnesio, Cromo, Manganeso o combinaciones de estos elementos |
| 8xx.x | Aleaciones de Aluminio con Estaño como principal elemento |

| | |
|-------|---------------------------|
| | aleante |
| 9xx.x | No utilizadas actualmente |

1.3 Efecto de los elementos aleantes

A continuación se describe el efecto de los elementos de aleación más importantes en las aleaciones base aluminio, estos fueron seleccionados en base a la aleación de estudio para la presente tesis.

Silicio: El efecto en las aleaciones de aluminio es la mejora de las propiedades en condiciones de colada. La adición de silicio al aluminio puro mejora drásticamente la fluidez, la resistencia a la fractura en caliente y las características de alimentación.

En general, el contenido óptimo de silicio es asignado por el proceso de fundición. Para procesos con enfriamientos lentos el rango va de 5 a 7%, para molde permanente de 7 a 9%, y para colada a presión (die casting) de 8 a 12%. Las bases para estas recomendaciones son la relación entre el rango de enfriamiento y la fluidez y el efecto del porcentaje de eutéctico a alimentar. El silicio también reduce la gravedad específica y el coeficiente de expansión térmica.

Cobre: El primero y más utilizado en las aleaciones de aluminio con contenidos de 4 a 10%. El cobre mejora sustancialmente la resistencia y la dureza en condiciones de colada y tratamiento térmico. También reduce la resistencia a la fractura en caliente y disminuye la colabilidad.

Magnesio: Es la base para desarrollar la resistencia y dureza en el tratamiento térmico de aleaciones aluminio-silicio que contienen cobre, níquel y otros elementos. Comúnmente en la familia de aleaciones aluminio-silicio los contenidos de magnesio empleados se encuentran en el rango de 0.70 a 0.04%.

Níquel: Usualmente es empleado con cobre para mejorar las propiedades a elevada temperatura. También reduce el coeficiente de expansión térmica.

Titanio: Es usado en la refinación de grano en las aleaciones de aluminio, en combinación con pequeñas cantidades de boro. El titanio con frecuencia es utilizado en cantidades mayores a las requeridas para el refinamiento, para reducir la tendencias a la fractura.

Estroncio: Es usado para la modificación del eutéctico en aleaciones aluminio-silicio. Para una modificación efectiva los contenidos son muy bajos, de 0.008 a 0.04%. Altos contenidos de estroncio están asociados con la presencia de porosidad, especialmente en piezas con espesores delgados y con velocidades de enfriamiento lentas.

Hierro: mejora la resistencia a la fractura en caliente y disminuye la adherencia entre la pieza sólida y el molde metálico en procesos de colada a presión (die sticking/soldering). Al incrementar el contenido de hierro disminuye la ductilidad. El hierro reacciona para formar fases insolubles en aleaciones fundidas de aluminio, los más comunes son FeAl_3 , FeMnAl_6 y αAlFeSi . Estas fases esencialmente insolubles son responsables de mejorar la resistencia, especialmente a altas temperaturas.

Manganeso: Es considerado como una impureza en las aleaciones de colada.

1.4 Sistemas de aleación

Las aleaciones de colada base aluminio están basadas en los mismos sistemas que las aleaciones metalmecánicas, están respaldadas por los mismos mecanismos (con excepción del endurecimiento por deformación), y son clasificadas similarmente en tratables térmicamente y las no tratables térmicamente. La mayor diferencia de las aleaciones de colada con respecto a las aleaciones para trabajado mecánico es que contienen grandes cantidades de silicio. Estas necesitan contenidos suficientes de eutéctico, en adición con elementos que aumentan la resistencia, usualmente silicio, para alcanzar la adecuada fluidez en la relación alimentación - contracción. Los beneficios que derivan de los efectos del silicio son incrementar fluidez, reducir agrietamientos y mejorar el sistema de alimentación para minimizar porosidades.

La fase desarrollada en el sistema aluminio-silicio es un eutéctico simple, esto hace posible la viabilidad comercial de aluminio colado. Los contenidos de silicio se encuentran alrededor del 4 al 12%, siendo este último el punto eutéctico, que reduce notablemente las pérdidas por escoria; permite producciones con diseños mucho más intrincados con variaciones grandes de espesor, con buena calidad superficial y alta calidad microestructural.

Las cantidades requeridas para la formación de eutécticos dependen en parte del proceso de fundición. Las aleaciones coladas en arena generalmente tienen bajos contenidos de eutéctico, en comparación con las coladas en moldes permanentes, debido a que los moldes de arena pueden tolerar un grado de contracción sólido-sólido que evitan el agrietamiento excesivo en los moldes.

1.4.1 Aleaciones Al-Cu-Si

Estas son las más usadas, la cantidad de ambos aleantes varía ampliamente, de modo que el cobre predomina en unas aleaciones y el silicio en otras. En estas aleaciones el cobre contribuye a la resistencia, y el silicio mejora la colabilidad y reduce las contracciones sólido-sólido; las aleaciones con alto contenido de silicio normalmente son usadas para piezas complejas, para fundiciones en molde permanente y colada a presión (die casting). En la figura 1.1. se muestra el diagrama ternario Al-Cu-Si, en este se pueden apreciar las fases estables al variar la temperatura y el contenido de cada elemento.

Las aleaciones que contienen entre 3 a 4% de cobre son tratables térmicamente, pero generalmente el tratamiento térmico es usado sólo cuando la aleación contiene magnesio, con esto se mejora la respuesta al tratamiento.

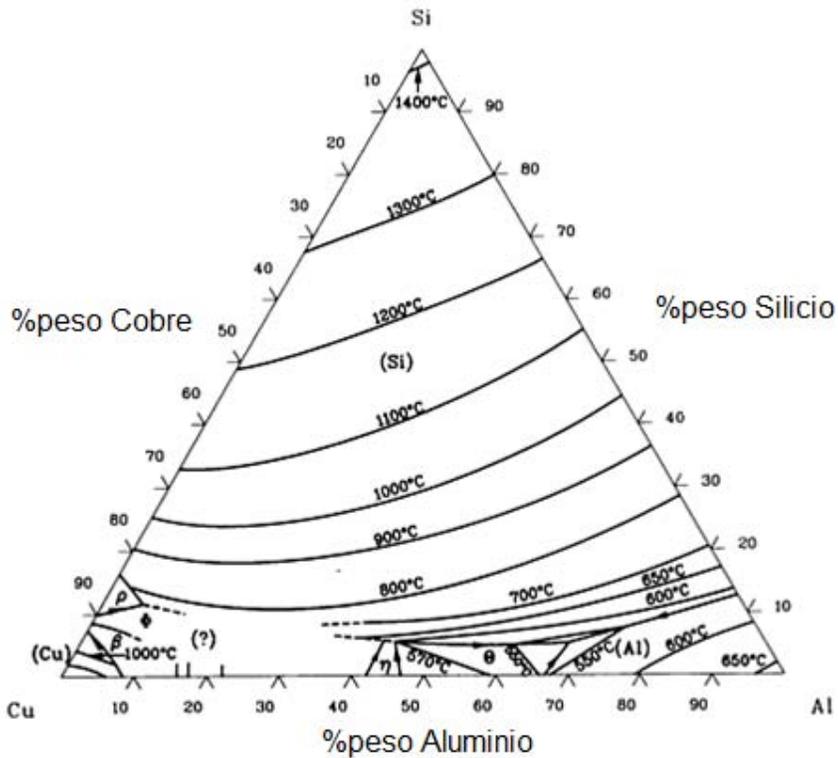


Figura 1.1 Diagrama de fase ternario Al-Cu-Si

1.4.2 Aleaciones Al-Si

Estos sistemas no contienen cobre cuando se necesita buena colabilidad y buena resistencia a la corrosión, las estructuras metalográficas para las composiciones puras y para las composiciones promedio se muestran en la fig.1.2.

Las composiciones intermedias son mezclas de aluminio con contenidos alrededor del 1% de silicio en solución sólida como fase continua, con partículas de silicio esencialmente puro.

Las aleaciones con menos del 12% son hipoeutéticas, las cercanas al 12% son eutéticas y las que poseen contenidos mayores al 12% son hipereutéticas.

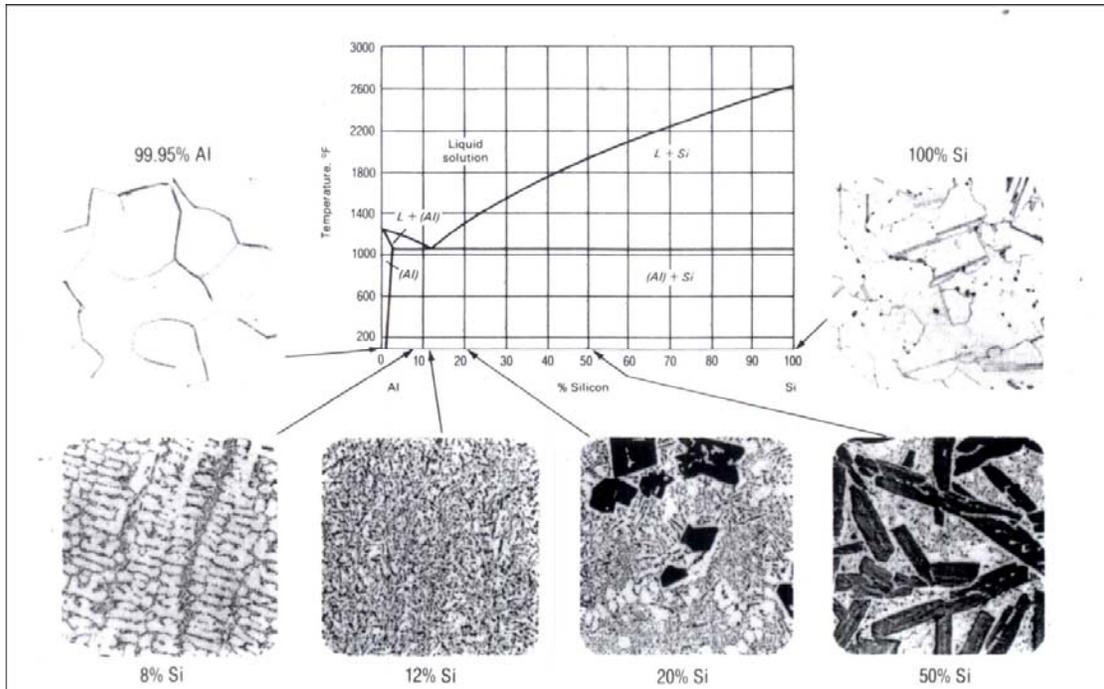


Figura 1.2 Diagrama de fases Al-Si y microestructuras para diferentes composiciones

El Mg se adiciona si se requiere alta resistencia y elevada dureza, y hace que estas aleaciones sean tratables térmicamente. Las aleaciones con contenidos menores al 2% de silicio pueden ser usadas como aleaciones para fundición, pero el silicio usualmente se encuentra entre el 5 y 10%. La resistencia y dureza de estas aleaciones puede mejorarse, especialmente con altos contenidos de silicio, y con la modificación de la fase eutéctica aluminio-silicio.

La modificación de las aleaciones hipoeutécticas (menos de 12% de silicio), es deseable en piezas coladas en arena y se lleva a cabo mediante la adición de sodio o estroncio, los cuales modifican la fase eutéctica.

En aleaciones hipereutécticas se modifica la fase de silicio proeutéctica, mediante la adición de fósforo, esto es esencial en la colada y el producto terminado.

1.5 Modificación de Aleaciones de colada Al-Si

Las propiedades de estas aleaciones dependen principalmente del proceso de colada (Tabla 1.2), las adiciones químicas controlan la estructura eutéctica, la morfología del silicio primario y la estructura de grano, y el tratamiento del metal líquido reduce el contenido de hidrógeno gaseoso y remueve inclusiones.

Tabla 1.2. Propiedades tensiles mínimas para la aleación A356.0 de fundición usando varios procesos

| Proceso de Colada | Condiciones | Resistencia a la Tensión | | Resistencia a la Cedencia | | Elongación (%) |
|----------------------|-------------|--------------------------|-----------|---------------------------|------|----------------|
| | | MPa | Ksi | MPa | Ksi | |
| | | Colado en arena | De colada | 130 | 19 | |
| Colado en arena | T6 | 234 | 34 | 166 | 24 | 3.5 |
| Molde permanente | De colada | 160 | 23 | 80 | 11.6 | 3 |
| Molde permanente | T61 | 255 | 37 | 179 | 26 | 5 |
| Colada por vibración | De colada | 195 | 28 | 124 | 18 | 15 |

1.5.1 Modificación del Silicio

En la práctica es necesario llevar a cabo la modificación de la estructura eutéctica, esto se ve reflejado en las propiedades mecánicas.

El tratamiento más usual y efectivo es la modificación de la fase eutéctica de silicio, aunque en ocasiones esto puede incrementar la porosidad. En la tabla 1.3 se muestran los modificadores más utilizados en la modificación de la fase eutéctica de silicio, sus características y su poder modificante.

La modificación ocurre naturalmente con altas velocidades de enfriamiento, se requiere un agente modificante cuando las velocidades de enfriamiento son lentas, lo cual es típico en fundiciones coladas en arena.

Los elementos del grupo I, IIa y las tierras raras europio, lantano, cerio, praseodimio y neodimio son modificadores pero solo el sodio y el estroncio producen una acción de fuerte modificación, además de que se requieren bajas concentraciones, ideales para aplicaciones comerciales

Tabla 1.3. Características de los elementos usados como modificadores de silicio en aleaciones Al-Si.

| Elemento | Ra ^{a)} | T _f (K) | P _v (1000K) | | ΔG _{oxido} (1000K) (KJ/mol) | Observaciones de la capacidad modificante |
|-----------|------------------|--------------------|------------------------|----------------------|--|---|
| | | | (Pa) | (Atm) | | |
| Bario | 1.85 | 998 | 5.07 | 5x10 ⁻³ | -482 | Moderado poder modificante |
| Calcio | 1.68 | 1112 | 26.3 | 2.6x10 ⁻⁴ | -509 | Moderado poder modificante |
| Estroncio | 1.84 | 1042 | 101.3 | 0.001 | -480 | Moderado poder modificante; contenido óptimo: 0.01 a 0.02%, buena eficiencia, efecto semi permanente, mayor facilidad para almacenar y manipular que el sodio, la sobremodificación no es tan grave como con el sodio, pero puede incrementar porosidad |
| Sodio | 1.58 | 371 | 2x10 ⁴ | 0.2 | -367 | Modificante muy potente con contenidos de 0.1%; se disuelve rápidamente, difícil manejo y almacenamiento, si no es controlada la adición provoca sobremodificación, puede incrementar porosidad |
| Cerio | 1.56 | 1071 | 10 ⁻¹¹ | 10 ⁻¹⁶ | -497 | Conviene agregarlo como mischmetal, requiere de 60min para disolverse, el efecto modificador se incrementa con contenidos mayores al 2%, reduce el |

| | | | | | | espaciamiento entre los brazos dendríticos en aleaciones hipoeutécticas |
|----------------|-------------|-------------|---------------------------------------|---|------|---|
| Aluminio | 1.22 | 933 | 5.5×10^{-6} | 5.3×10^{-11} | -354 | ... |
| Silicio | 1.00 | 1683 | 9×10^{-12} | 8.9×10^{-17} | | ... |

a) radio atómico respecto al radio atómico del Silicio

El silicio eutéctico normalmente solidifica en forma acicular, por lo que se requiere de la modificación para producir una estructura fina a partir de una forma acicular gruesa.

La proporción de silicio acicular presente depende del gradiente de temperatura, de su velocidad de crecimiento y de la cantidad de silicio en la aleación.

Las cantidades requeridas del modificador dependen de la composición química de la aleación (a mayor cantidad de Si se requiere mayor cantidad de modificador), por ejemplo para la aleación 7% de silicio (A356) con 0.002% Sr es suficiente para lograr una buena modificación, con 0.005% a 0.01% Na y con 0.1% Sb se obtienen buenos resultados.

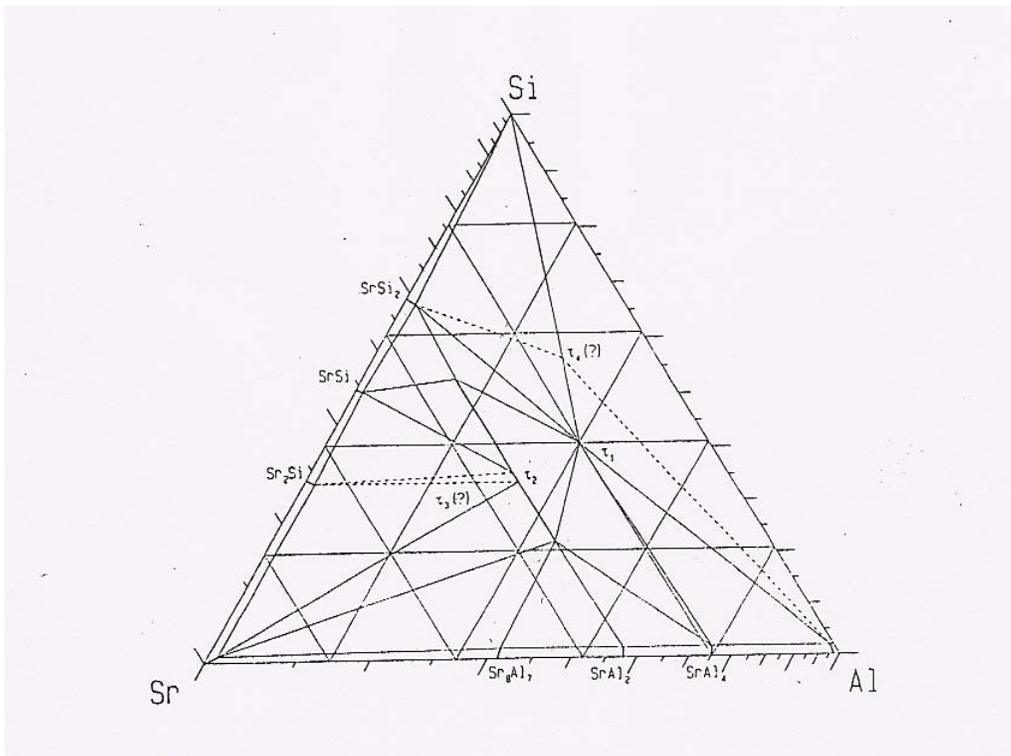


Figura 1.3. Diagrama de fases de Al-Si-Sr a 800K.

Debido a que el estroncio es un elemento muy reactivo no se usa como elemento puro ya que reacciona rápidamente con el aire y con el vapor de agua formando SrO , SrO_2 , Sr(OH)_2 y $(\text{CaSr})\text{NO}_3$, los cuales son insolubles en la aleación, por esta razón se adiciona en forma de aleación maestra, por ejemplo:

- Al-3.5%Sr
- Al-10%Sr
- Al-10%Sr-14%Si
- Sr-10%Al

La manufactura de las aleaciones maestras se realiza mediante el diagrama de fases (Fig. 1.3 y Fig. 1.4) ya que se forman varios compuestos intermetálicos. Las aleaciones maestras que contienen menos del 45%Sr no reaccionan con el aire y no es necesario tomar precauciones para su empaquetamiento y almacenaje. Las aleaciones de 20 a 60% Sr tienen su punto de fusión arriba de los 900°C aunque son estables en presencia del aire no son muy prácticas. La aleación con 90%Sr contiene algo de Sr elemental en su manufactura, por consiguiente algo reacciona con el aire, pero es menor la cantidad de lo que reaccionaría si se adiciona puro.

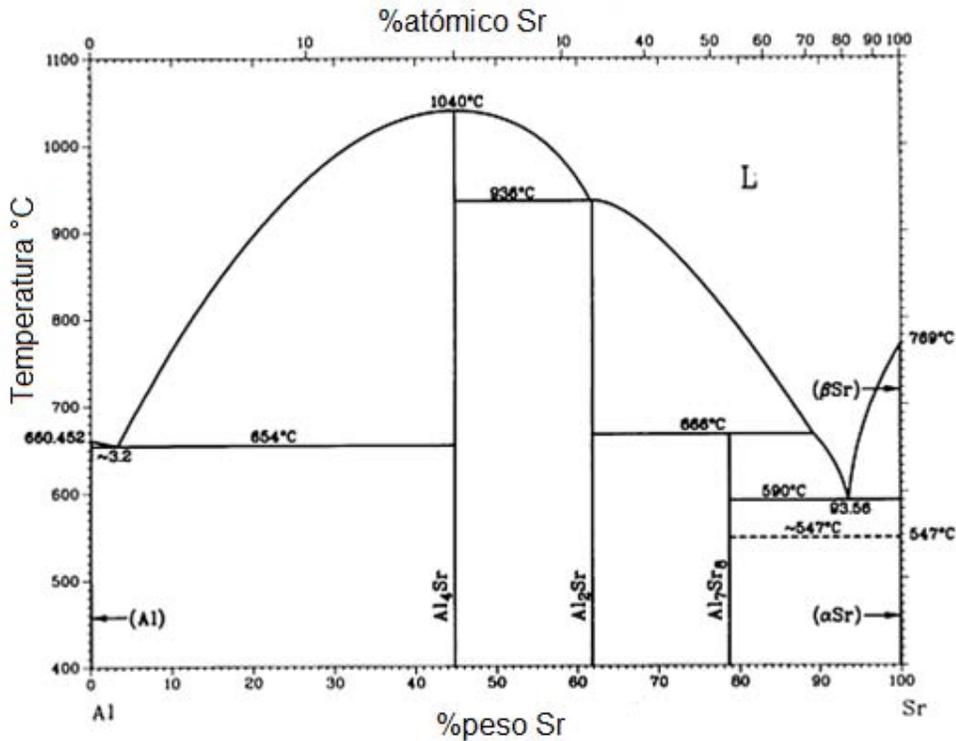


Figura 1.4. Diagrama de fases Al-Sr

La disolución del estroncio depende del contenido en la aleación maestra, para altos contenidos de estroncio (90%Sr), el estroncio elemental reacciona con la aleación Al-Si produciendo compuestos intermetálicos, los cuales no han sido completamente identificados, pero se cree que se forma el SrAl₂Si. En la fig. 1.5 se muestra la recuperación del estroncio en las aleaciones maestras más usadas para la aleación 356.

Para bajos niveles de estroncio en la aleación maestra su disolución mejora al incrementarse la temperatura. Para la aleación Al-10%Sr se observa la formación de placas largas de Al₂Sr₂Si en la interfase Al-Si_{eut} por lo que el proceso de disolución involucra la formación de compuestos intermetálicos, los cuales se van disolviendo gradualmente en el metal, y por consiguiente se tienen altas recuperaciones de estroncio a altas temperaturas y es pobre la recuperación a bajas temperaturas.

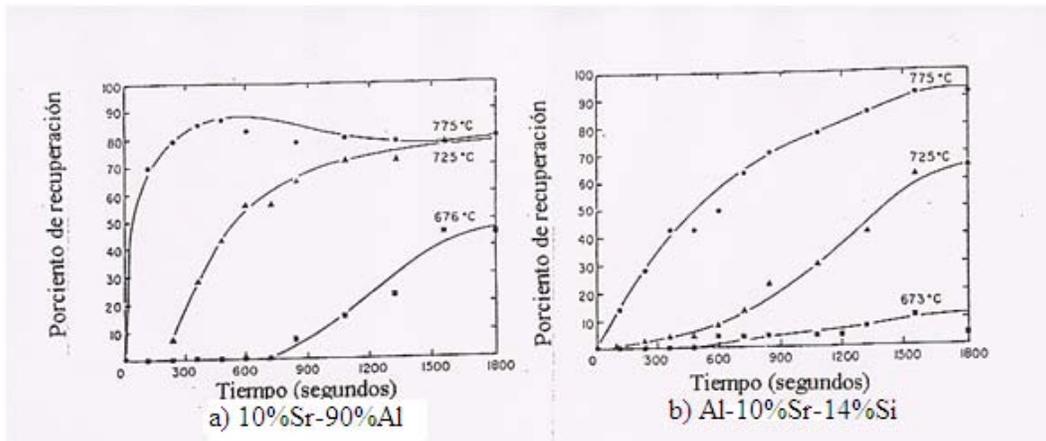


Figura 1.5. Grafica experimental de la recuperación de la aleación Al-10%Sr y Al-10%Sr-14%Si en una aleación A356

1.5.2 Efecto en la microestructura

El cambio de la microestructura del silicio acicular a fibrosa depende de la cantidad de sodio o estroncio adicionado, ya que si no es el nivel requerido se puede obtener una estructura intermedia de silicio (fibroso, laminar y acicular). La modificación con estroncio es menos uniforme que con el sodio.

El tipo de microestructura que se observa en una aleación hipoeutéctica depende del grado de modificación (ver apéndice I).

Las variables que determinan el nivel de modificación son:

- Tipo de modificador empleado
- Impurezas presentes en el metal
- Cantidad de modificador adicionado
- Velocidad de enfriamiento
- Contenido de Si en la aleación

Estas cinco variables interactúan de manera compleja por lo que es difícil predecir de manera exacta el tipo de microestructura que se obtiene.

El tipo de modificador, ya sea Sr o Na, es capaz de modificar completamente la microestructura, sin embargo, el sodio tiene una mayor capacidad de modificar en menores concentraciones que el estroncio.

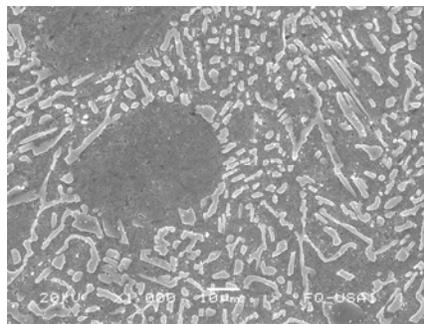
La presencia de impurezas en el metal como el fósforo dificulta la modificación, por lo que es necesario la cantidad de este elemento en la aleación a modificar sea muy baja.

La velocidad de enfriamiento ayuda al proceso de modificación por lo que se recomiendan altas velocidades de enfriamiento, por esto en molde permanentes se utilizan menores niveles de modificador.

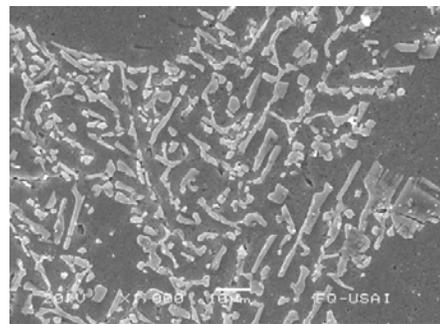
1.5.3 Sobremodificación

Dos distintos fenómenos son asociados con la sobremodificación con estroncio, tal es el caso de la estructura gruesa de silicio y su transformación a un silicio fibroso fino a partir de placas (Fig. 1.6).

Otra evidencia de la sobremodificación con estroncio es la aparición de estroncio en los compuestos intermetálicos como el intermetálico $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{Sr}$. Es claro que ambos efectos reducen las propiedades de la aleación además de que los dos fenómenos pueden o no ocurrir simultáneamente para que ocurra la sobremodificación (Fig. 1.7).



(a) 0.035% Sr



(b) 0.115% Sr

Figura 1.6. Imágenes obtenidas con MEB de una aleación A356

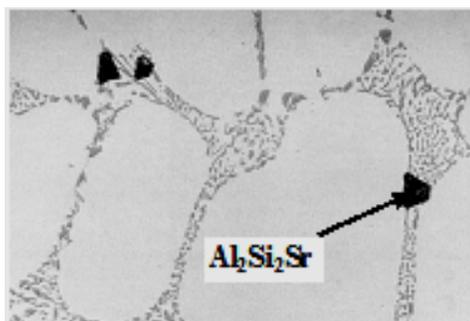


Figura 1.7. Sobremodificación del Si eutéctico causado por la adición de Sr, Además se observa la presencia de partículas del intermetálico $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{Sr}$.

1.5.4 Decaimiento del modificador

De todos los modificadores comercialmente empleados, el Na y Sr están sujetos a disminuir su poder modificador con el tiempo, la disminución en el metal puede ocurrir por dos causas: que el modificador se evapore por alta presión o alta temperatura o que forme óxidos por su gran afinidad con el oxígeno. El mecanismo de disminución de estroncio puede no ser por evaporación ya que su presión de vapor es de 10^{-3} atm a 730°C , por lo que la pérdida de estroncio se debe principalmente a la oxidación, ya que su óxido es más estable que el del aluminio o silicio.

1.5.5 Propiedades de las aleaciones modificadas

Las propiedades de las aleaciones Al-Si están determinadas por la microestructura; esto es microconstituyentes interdendríticos, segundas fases, intermetálicos, inclusiones y porosidad. El silicio eutéctico sin modificar ya sea químicamente o térmicamente, presenta estructuras gruesas y poliédricas que consecuentemente poseen unas pobres propiedades mecánicas. En consecuencia, las aplicaciones comerciales de las aleaciones Al-Si dependen principalmente de la morfología del silicio eutéctico obtenido por una modificación en el metal durante la producción de la fusión y por modificación térmica en el estado sólido.

Pero las propiedades tensiles no solamente dependen de la morfología del Si, también se ven afectadas por:

- Velocidad de solidificación
- Tratamiento térmico
- Contenido de magnesio

El efecto que tiene el proceso de modificación sobre la microestructura influye directamente en las propiedades mecánicas. Las placas gruesas de silicio de una estructura acicular no modificada actúa como concentrador de esfuerzos internos, los cuales facilitan fractura.

Con la modificación del silicio eutéctico se contribuye a que el esfuerzo tensil se incremente al igual que la ductilidad (Tabla 1.4).

Tabla 1.4. Efectos del tratamiento de modificación en las propiedades tensiles en una aleación A356.

| Morfología Si | RT (MPa) | Elongación (%) |
|---------------|----------|----------------|
| Acicular | 180 | 7 |
| Laminar | 200 | 12-16 |
| Fibrosa | 200 | 16 |

Capítulo II. Aplicaciones y tendencias de aleaciones complejas base aluminio de fundición

A continuación se presenta el consumo de aluminio por sector, en la fig. 1.2 se aprecia que para las aleaciones complejas de aluminio coladas se tiene un gran rango de aplicación, que son los sectores automotrices y aeronáuticos.

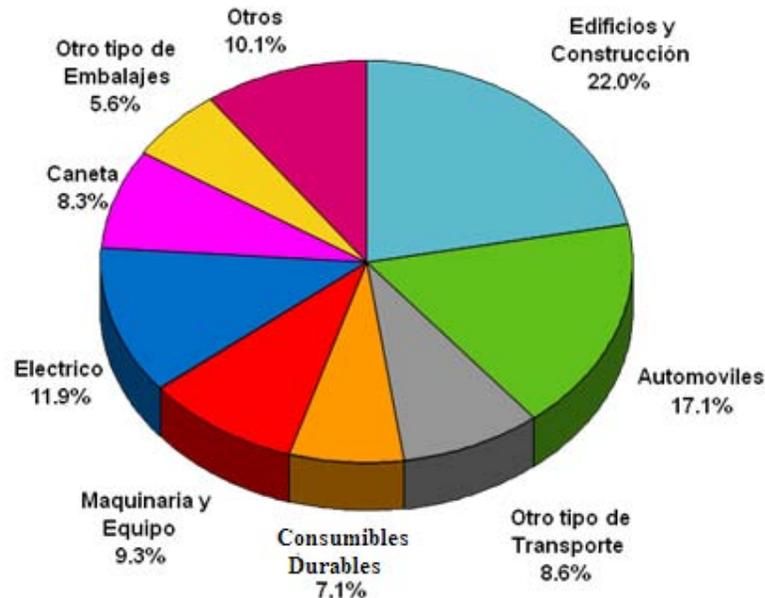


Figura 2.1. Consumo de Aluminio por sector, Total Aluminio. Consumo – 2008. Global: 50.8 Mt. Mundo Occ.: 32.4 Mt.

2.1. Tendencias de aleaciones complejas base aluminio de fundición

Durante los últimos años, la alternativa del auto híbrido ha sido considerada como una buena opción para disminuir los efectos que la industria automotriz genera en el medio ambiente.

Por ello, varios fabricantes como la Hyundai, BMW y muchos más, han adoptado como política dentro de la empresa, la implementación de este nuevo sistema que ha brindado buenas opciones a los usuarios pero que también comparte una responsabilidad por mejorar las condiciones de vida de los habitantes del planeta.

En corto plazo el sector automotriz será un mercado de aluminio en crecimiento puesto que los productores de autos híbridos buscan maneras de reducir el

peso de los autos. En la fig. 2.2 se muestra la tendencia de los últimos años a la sustitución de los componentes de aluminio en el sector automotriz.

Con la disminución de peso en los automóviles se mejora considerablemente el rendimiento en las curvas y bajo frenado y ganar potencia sobre la tracción.

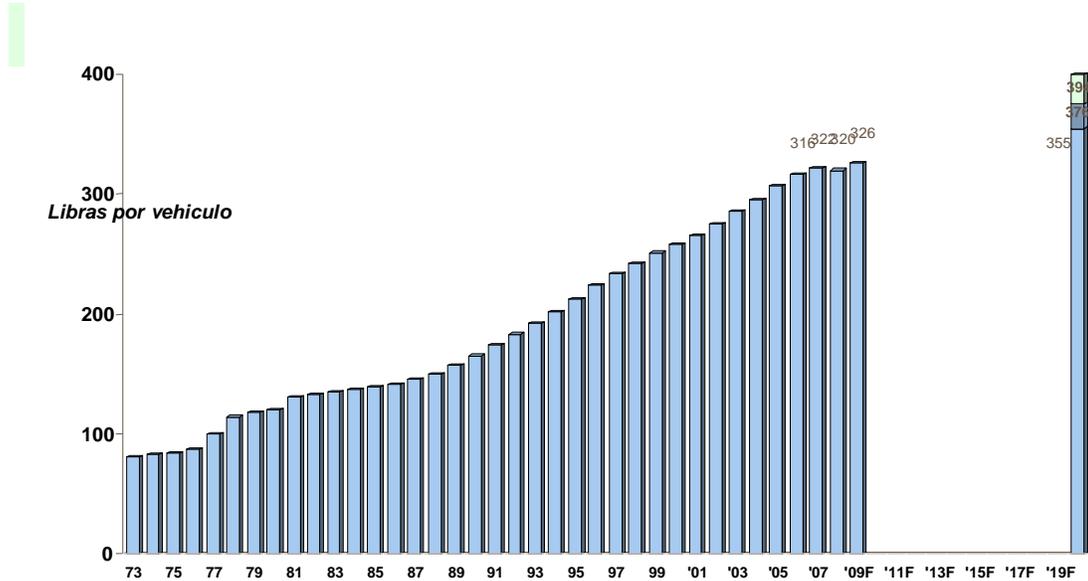


Figura 2.2. Tendencia de componentes sustituidos por aleaciones de aluminio en vehículos a través de los años.

Además, se espera que en los próximos años aumente a nivel mundial la producción de vehículos híbridos (Fig. 2.3), debido a las nuevas regulaciones con respecto a las emisiones de gas, las nuevas tecnologías necesitarán más componentes, con mejores propiedades, ofreciendo grandes potenciales a las aleaciones complejas base aluminio de fundición.

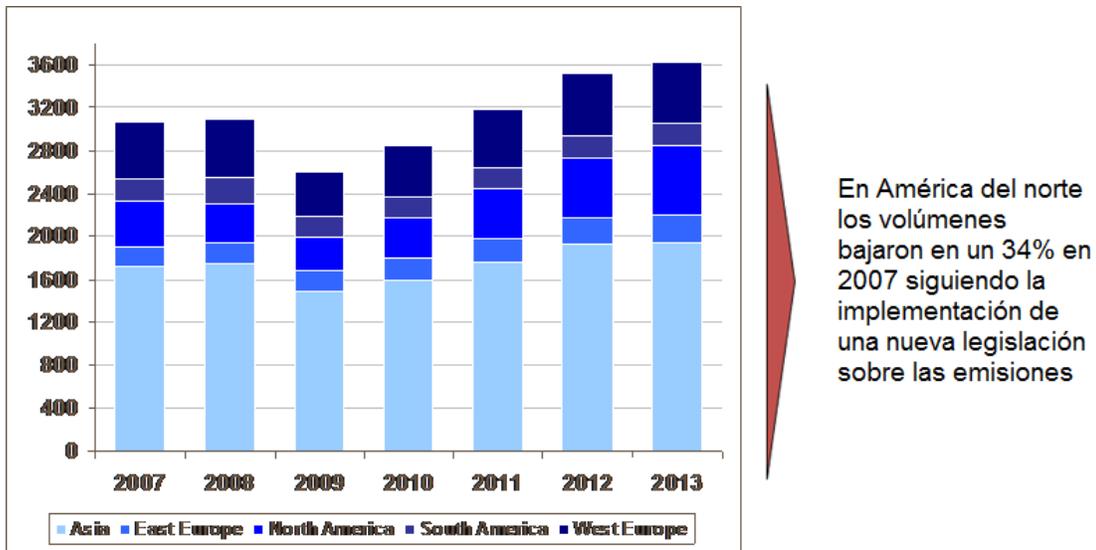


Figura 2.3. Tendencia de la producción de vehículos comerciales de propulsión (híbridos)

Para el caso particular de la aleación A356, que es la más comercial de las aleaciones de fundición.

La aleación 356.0 (7%Si, 0.3%Mg) tiene excelentes características de colada y resistencia a la corrosión. Esto justifica su uso en grandes cantidades para coladas en arena y molde permanente.

Los tratamientos térmicos se usan para obtener varias combinaciones de propiedades tensiles y físicas, lo que la hace atractiva para diversas aplicaciones. Esto incluye la industria automotriz y aeronáutica, la aleación 356.0 acompañada por bajos contenidos de hierro, proporciona propiedades tensiles altas en la calidad premium para vaciado en arena y molde permanente.

2.2. Efecto del Mg y Sr en la formación de intermetálicos

Las aleaciones Al-Si son materiales que se han ido desarrollando y mejorando a través de los años debido al incremento en la demanda de la industria automotriz para componentes pequeños, de bajo peso y alto rendimiento. Una aleación importante es la 319, donde el silicio y el cobre son los principales aleantes y el magnesio se añade con frecuencia para elevar la resistencia. Las propiedades mecánicas también mejoran con la modificación del silicio eutéctico y por la reducción del intermetálico β -Al₅FeSi que tiene un efecto

nocivo en la aleación. El magnesio también puede refinar la estructura de silicio eutéctico.

La adición de magnesio en cantidades superiores a 0.5%, en las aleaciones 319 coladas conducen a la precipitación de la fase Mg_2Si (o una fase rica en Mg), que aparece en forma de partículas negras redondeadas alrededor de la fase de silicio eutéctico, por ejemplo en la modificación y la transformación de una porción larga de fase $\beta-Al_5FeSi$ en agujas o placas de tipo script chino con una composición cerrada de $Al_8Mg_3FeSi_6$. [1]

En cantidades mayores a 1% de Mg, precipita la fase Mg_2Si en forma de script chino de color negro. Una gran parte del magnesio es consumida por la precipitación de las fases Mg_2Si y $Al_8Mg_3FeSi_6$, su efecto modificador con respecto al silicio eutéctico es aparentemente perdido. A este nivel de magnesio las agujas de $\beta-Al_5FeSi$ rara vez se observan en la microestructura.

Además de la modificación del silicio eutéctico, la adición de estroncio en cantidades de 0.02 a 0.04% conducen a la disolución de más de dos tercios de la fase $\beta-Al_5FeSi$ en la matriz y la modificación de las partículas de Mg_2Si . Sin embargo, esto no causa la nucleación de la fase de estrella $Al_{15}(Fe,Mn,Cr)_3Si_2$ a través de agujas de $\beta-Al_5FeSi$.

La presencia de estroncio conduce a una severa segregación de intermetálicos de Fe y Cu (excepto para las agujas de $\beta-Al_5FeSi$) en áreas alejadas del silicio eutéctico modificado. En consecuencia, la concentración de cobre en la fase Al_2Cu puede llegar a 40%, en este caso el precipitado se encuentra en forma de bloque, que es difícil de disolver durante un tratamiento térmico de solución.

La adición de 1.2% de magnesio reduce la fracción en volumen de las agujas de $\beta-Al_5FeSi$, lo mismo sucede con cantidades de 0.5% de magnesio más 0.03% de estroncio. Todas las agujas de $\beta-Al_5FeSi$ son transformadas en $Al_8Mg_3FeSi_6$.

2.3. Efecto del Fe y Sr en la formación de intermetálicos de Cu

La excelente colabilidad y propiedades mecánicas de la aleación 319 la hacen popular entre las aleaciones de fundición para aplicaciones automotrices. Su baja gravedad específica es esencial para reducir el consumo de energía, y su excelente resistencia a la corrosión y su bajo costo de reciclado también la hacen notable desde el punto de vista ambiental. Basado en el sistema Al-Si, la aleación tiene como principales aleantes al magnesio y al cobre.

La adición de cobre en la aleación Al-Si eutéctica promueve un ligero aumento en la fluidez, y una disminución de temperatura de aproximadamente 1.8°C en el silicio eutéctico, con contenidos de cobre del 1% [2].

Además, algunas propiedades mecánicas son beneficiadas con la adición de cobre como elemento aleante, estas propiedades son principalmente la resistencia a la cedencia (YS) y la última resistencia a la tensión (UTS).

La adición de estroncio en sistemas Al-Si con contenidos de cobre y magnesio conduce a la segregación de una fase de cobre lejos del eutéctico Al-Si, esto causa:

- i. Un incremento en la cantidad de bloques de Al_2Cu en aleaciones coladas
- ii. Frena el rango de disolución de Al_2Cu en la segregación de la misma durante la solidificación

La adición de hierro dispersa la fase de Al_2Cu y por lo tanto acelera su disolución durante el tratamiento térmico. La precipitación de la fase $\beta-Al_5FeSi$ genera sitios de nucleación para la precipitación de la fase de cobre, que a su vez reduce la severa segregación de esta fase. En este caso, el bloque de Al_2Cu se transforma en pequeñas partículas, que puede beneficiar para la disolución de Al_2Cu durante el tratamiento térmico.

Las partículas de Al_2Cu son disueltas casi en su totalidad en la matriz al cabo de 100h de tratamiento térmico, excepto en el caso de la aleación 319 que contiene estroncio y fósforo, donde se reduce la disolución de Al_2Cu durante el tratamiento térmico. La presencia de estroncio provoca una severa segregación de Al_2Cu durante la solidificación, mientras que el fósforo tiene un efecto negativo doble a) se disuelve la fase Al_2Cu y b) se forman partículas de óxido $(Al,P)O_2$ que actúan como sitios de nucleación para la precipitación de Al_2Cu en

forma de bloque. La introducción de hierro a la aleación puede ayudar a neutralizar el efecto negativo del fósforo.

2.4. Aplicaciones para intermetálicos Al-Ni

Los aluminuros de níquel, hierro y titanio poseen un gran número de atributos que los hace atractivos para aplicaciones en alta temperatura y estructurales. Estos contienen suficientes cantidades de óxidos de aluminio que son compactos y protectores. Tienen bajas densidades, puntos de fusión relativamente altos y buenas propiedades a alta temperatura.

El intermetálico NiAl ha sido considerado como un candidato excelente para aplicaciones a alta temperatura, debido a su alto punto de fusión, baja densidad, excelente resistencia a la corrosión y alta conductividad térmica, sin embargo la falta de resistencia a la tensión, ductilidad y tenacidad son sus principales deficiencias.

Un alto rendimiento del intermetálico γ -Ni₃Al en la aleación IC6 [3], con una composición de Ni – 16 a 17.6% Al – 7.6 a 8.8% Mo – 0.015% a 0.75%B fue desarrollada satisfactoriamente en el instituto de Beijing para materiales aeronáuticos, se construyeron unas aspas de turbina que operan en un rango de temperatura de 950 a 1100°C. Con una resistencia a la ruptura de 100MPa a 1100°C/100h.

Se han realizado avances significativos en el desarrollo de materiales, utilizando intermetálicos para aplicaciones en altas temperaturas y estructurales. Sin embargo su baja resistencia a la fractura e impacto y la reducida ductilidad a temperatura ambiente seguirán siendo una preocupación cuando se considere el reemplazo de las dúctiles y tenaces superaleaciones base níquel.

Capítulo III. Métodos de caracterización metalográfica para aleaciones colada base aluminio

En el siguiente capítulo se describen los métodos más comunes para caracterizar las aleaciones base aluminio, en la presente tesis se utilizaron las técnicas de microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido para la observación microestructural de los microconstituyentes presentes en la aleación de estudio, así como también se utilizaron las técnicas de EDS y el uso de mascarar para la cuantificación cualitativa y cuantitativa de microconstituyentes respectivamente.

3.1 Microscopía Óptica

La microscopía óptica es la herramienta más importante en el estudio de la microestructura, despreciando la evolución de sofisticados instrumentos metalográficos electrónicos. En la fig. 3.1 se muestra el microscopio óptico metalúrgico de platina invertida usada en esta técnica, es diferente debido a la forma en que la luz es reflejada en las piezas (Fig. 3.2).

La microscopía electrónica de barrido MEB, y la microscopía eléctrica de transmisión MET son métodos invaluable; sin embargo, estos deberán ser usados en conjunto con la microscopía óptica, en vez de sustituirla.

Todo examen microestructural debe iniciarse con microscopía óptica, comenzando con los bajos aumentos, por ejemplo 100X, seguido de un incremento progresivo de estos, para valorar las características básicas de la microestructura de una manera eficiente.

Muchas microestructuras pueden ser observadas e identificadas con la microscopía óptica basándose en sus características. La identificación de microconstituyentes indefinidos o desconocidos pueden ser caracterizados con la medición de la dureza relativa de la matriz, por la observación de su color natural, su respuesta a un polarizador o a un ataque selectivo. Estas observaciones se comparan con detalles conocidos acerca de la metalurgia física del material en cuestión.

Si aún existiesen dudas sobre la microestructura observada, existen técnicas más sofisticadas que podrían complementar la observación.

La microscopía óptica puede ser usada para examinar piezas pulidas o atacadas fácilmente. Ciertos constituyentes son observados en materiales que sólo fueron pulidos, debido a que no se oscurecen al ser atacados. Inclusiones, nitruros, ciertos carburos y fases intermetálicas son observados claramente sin ataque.



Figura 3.1 Microscopio óptico metalúrgico de platina invertida

Las muestras deberán ser preparadas adecuadamente para asegurar su correcta observación e interpretación. Las muestras que responden a la luz polarizada, como las partículas no metálicas, generalmente se examinan sin ataque.

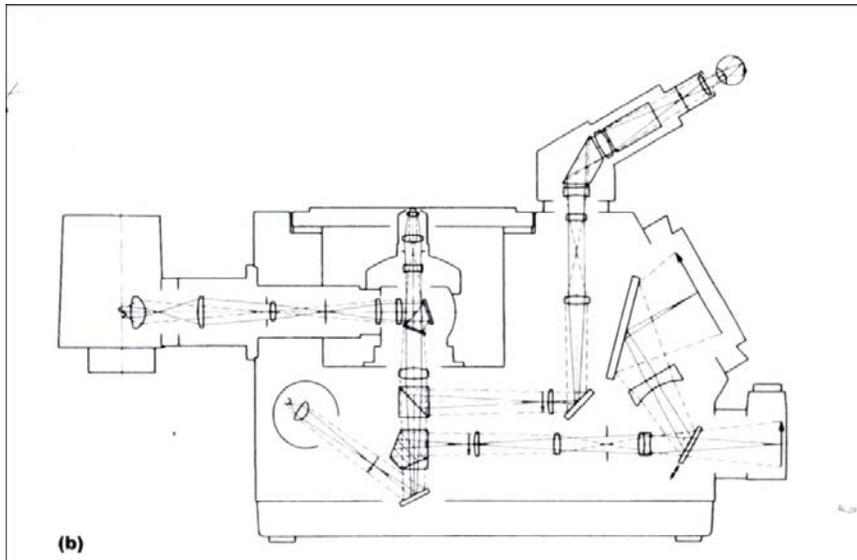


Figura. 3.2 Microscopio óptico metalúrgico

3.2 Microscopio Electrónico de Barrido (MEB)

En la Fig. 3.3 se muestran los componentes de la columna de un microscopio electrónico de barrido (MEB) que es descrito a continuación.

El microscopio electrónico de barrido (MEB) es un instrumento cuyo funcionamiento se basa en el barrido de la superficie de un espécimen, por medio de un haz de electrones cuyo diámetro es disminuido, entre 4 nm y 200 nm, por lentes electromagnéticas formadas por el paso de corriente a través de solenoides (bobinas). Después de que el haz de electrones interacciona con la muestra, se generan varios tipos de señales (Fig. 3.4), las cuales son reunidas por un colector detector específico para cada una de ellas. Finalmente, se produce una imagen en el monitor de TV que puede ser almacenada en una placa fotográfica o digitalmente.

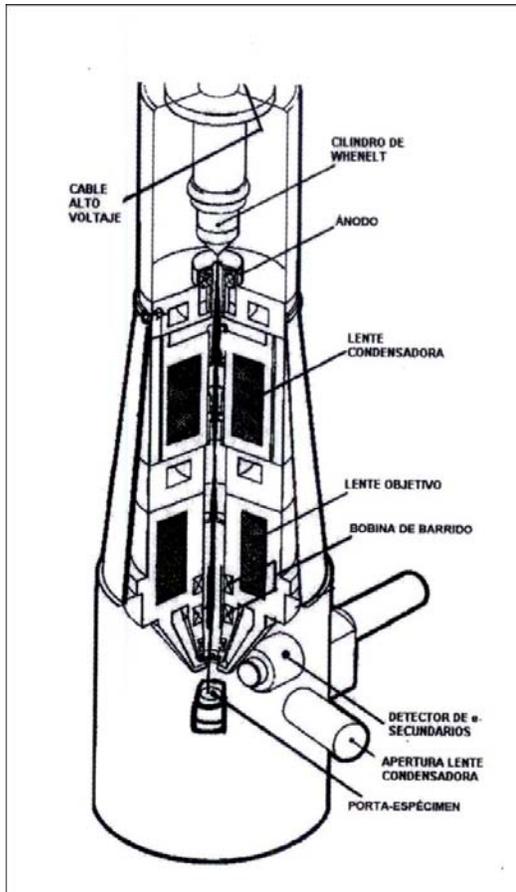


Fig. 3.3 Componentes de la columna electrón-óptica del MEB convencional

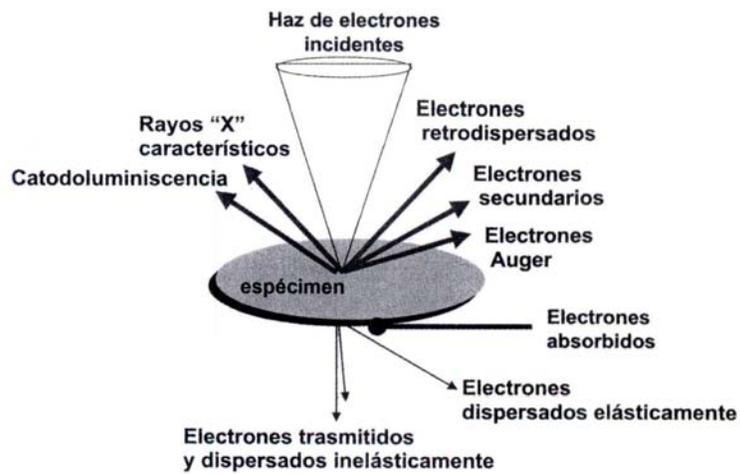


Figura 3.4. En la interacción de los electrones del haz primario con el espécimen, unos generan varios tipos de señales (electrones secundarios,

retrodispersados, Auger, rayos X, catodoluminiscencia, etc); mientras que otros electrones son absorbidos, transmitidos y difractados (estos últimos se usan en el MET).

3.3 Microanálisis Químico por EDS

La técnica de espectrometría por dispersión de energía de rayos X (EDS) se aplica en:

- El estudio de la composición química de inclusiones o pequeñas partículas de material desconocido
- En el análisis de la distribución de la concentración de elementos químicos en una muestra heterogénea, ya sea en un punto, a lo largo de una línea (line-scan) o en un área (mapeo)
- En la composición química de películas delgadas depositadas sobre un sustrato

3.3.1 Componentes del EDS

Los principales componentes de un espectrómetro de dispersión de energía de rayos X son (Fig. 3.5): detector, compuesto de un cristal de silicio-litio conectado a un tubo frío acoplado a un tanque de nitrógeno líquido, preamplificador (PAMP), procesador de pulsos (PP), convertidor de energía digital (ADS), multicanal analizador (MCA) y computadora (PC).

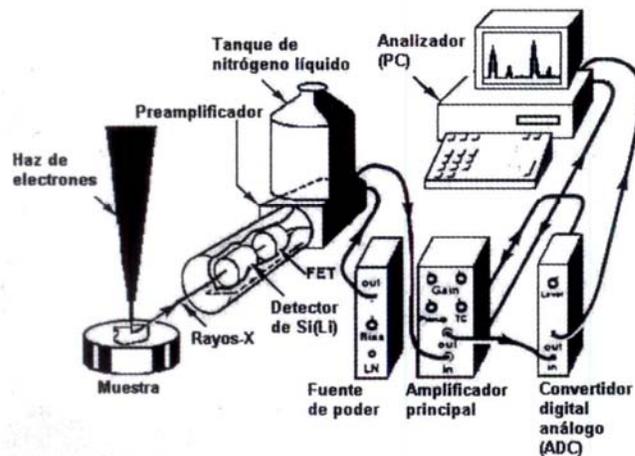


Figura 3.5. Representación esquemática de un espectrómetro EDS. Sus piezas consisten en: detector conectado a un tubo enfriado por nitrógeno líquido, componentes electrónicos y el multicana analizador adjunto a la PC.

3.3.2 Análisis cualitativo por EDS

El análisis cualitativo consiste en identificar los elementos presentes en la muestra. En resumen, este proceso se efectúa al determinar las energías de los picos presentes en el espectro y, al comparar éstas, con energías conocidas como emisión de rayos X descritas en tablas.

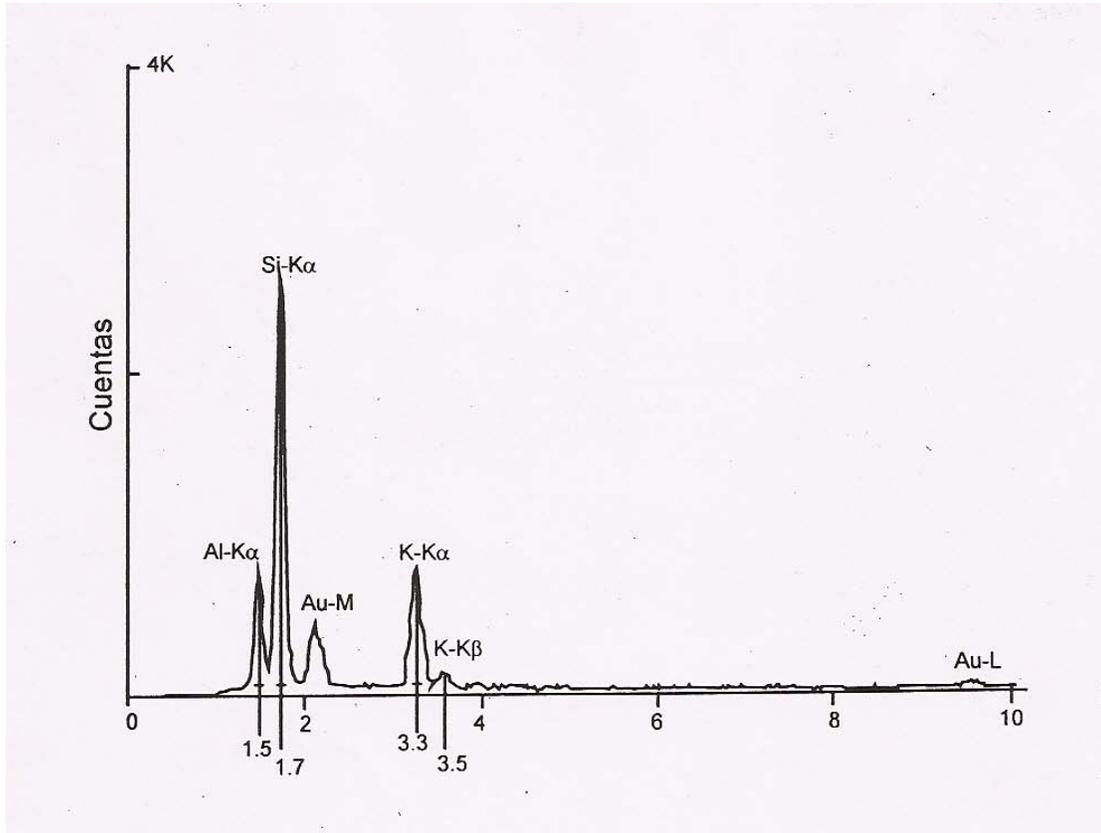


Figura 3.6 Espectro del mineral feldespato (KAlSi_3O_8). Comparar la altura de los picos con la fórmula química y observar la relación atómica $\text{Al:Si} = 1:3$ y $\text{Al:K} = 1:1$. Los picos de Au corresponden al material que se usó para recubrir el espécimen.

La identificación de cada pico en el espectro se realiza haciendo coincidir el indicador de la escala de energía con la parte del pico central (Fig. 3.6); el dato de la escala de energía (keV) en la base del gráfico se compara con la energía de rayos X en tablas. La identificación puede realizarse también utilizando un cursor con etiquetas o el modo de identificación automática del software de microanálisis.

Durante el análisis cualitativo se debe tener presente que un elemento químico puede tener más de un pico en el espectro de rayos X porque, la desexcitación del átomo se da por una serie de transiciones que involucran los

niveles orbitales K, L, M y N. Asimismo, la altura de los picos en ocasiones es influenciada por la concentración del elemento.

En la figura 3.6 puede verse una correlación entre la altura de los picos de Si, Al y K con la fórmula química del mineral analizado, en donde, en este caso, las alturas de los picos con proporcionales a su concentración. Sin embargo, esto no siempre se cumple pues la altura de los picos depende también del tipo de línea de energía de rayos X que se excitó. Es decir, debido a que la transición de un electrón desde un orbital de mayor energía (ej. orbital M) a uno de menor (ej. orbital K), libera más energía que la transición de un M a un L, la línea de K es la de mayor intensidad y menor altura.

Generalmente la línea K es la que se va a buscar para identificar los picos de los elementos con número atómico (Z) hasta 30, y para elementos con $Z > 30$, se usan las líneas L y M ya que en éstos últimos será más difícil excitar el nivel K. Finalmente, después de que todos los picos del espectro son determinados, las concentraciones relativas de cada uno de los elementos son mostradas.

3.3.3 Análisis cuantitativo por EDS

El análisis cuantitativo busca no sólo identificar los elementos presentes en el espécimen, sino también conocer sus concentraciones, para lo cual las intensidades de las líneas de rayos X emitidas del espécimen son comparadas con las producidas por los estándares de composición conocida. Sin embargo la relación entre la intensidad (I) de una línea de rayos X y la concentración del elemento correspondiente depende de la composición de la muestra.

3.4 Descripción cualitativa de microestructuras e identificación de microconstituyentes en aleaciones de aluminio para fundición

La observación microscópica de la metalografía revela los constituyentes microestructurales de la aleación. El método clásico en la identificación de fases es la comparación usando un atlas de micrografías a partir de aleaciones con composición química y estructura similares. El primer paso para la identificación del precipitado es la morfología y color (Apéndice II), a partir de una sección pulida (sin ataque). En algunas ocasiones la observación de la pieza pulida es suficiente para identificar los microconstituyentes. El siguiente paso puede ser la observación microscópica con polarizadores sin ataque. Si

quedara duda en la identificación del microconstituyente se recurre a un ataque selectivo (Apéndice II), esto usualmente consume mucho tiempo, pero en la mayoría de los casos se logra la completa identificación de los microconstituyentes.

3.5. Métodos de cuantificación en microscopía óptica

Algunos de los métodos digitales para la evaluación cuantitativa de las fases de aleaciones metálicas es el uso de máscaras, el cual se describe a continuación. Para facilitar la comprensión de este método de cuantificación, se muestran una serie de imágenes que explican paso por paso dicho método.

Paso 1. Se selecciona una muestra preparada metalográficamente, este caso se necesito colorear algunas fases por medio de photoshop, debido a que el contraste entre microconstituyentes no fue tan fuerte y no se alcanzaba a diferenciar algunos de estos microconstituyentes. Como se observa fueron coloreados de verde, azul y lila (Fig. 3.7).

Construcción de la máscara:

Se debe calibrar cada imagen y posteriormente se selecciona un área de trabajo.

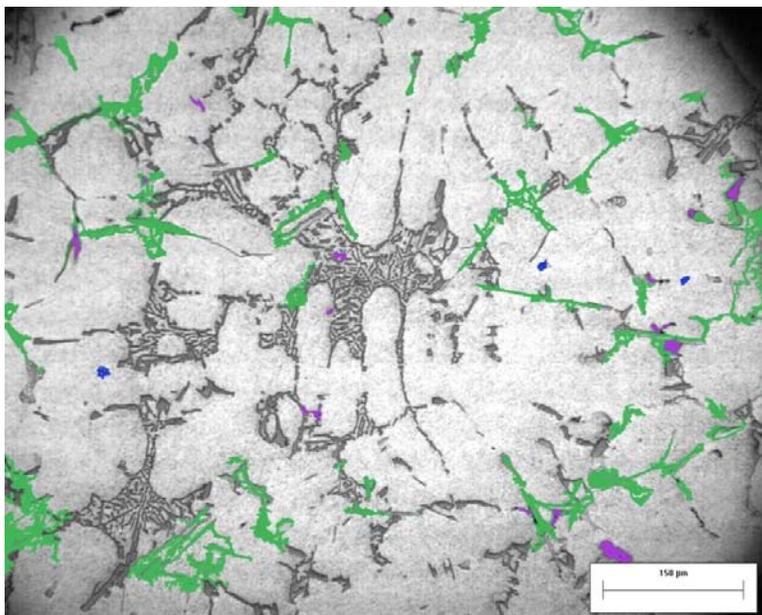


Figura 3.7. Muestra seleccionada para la cuantificación de microconstituyentes.

Paso 2. Seleccionar cada una de las fases, el programa Image Pro Plus selecciona las fases por colores o tonalidades, a continuación se muestra cada una de los microconstituyentes seleccionados.

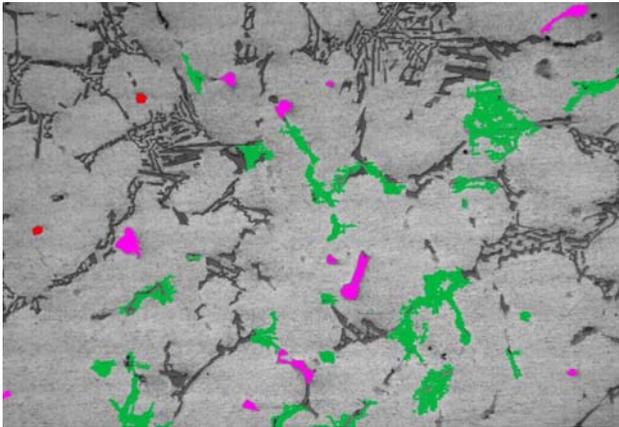


Figura 3.8. Microconstituyente no. 1 coloreado de rojo.

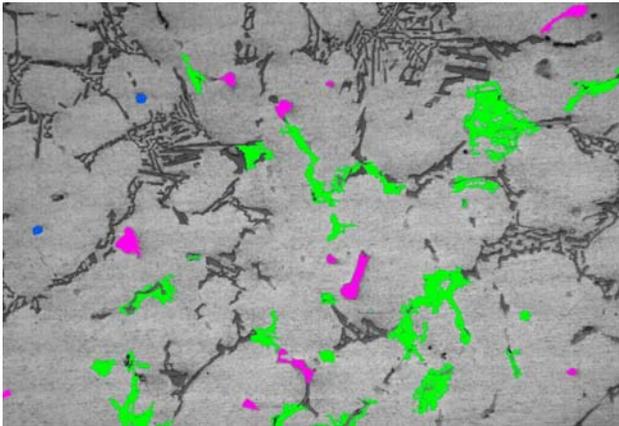


Figura 3.9. Microconstituyente no. 2 coloreado de verde.

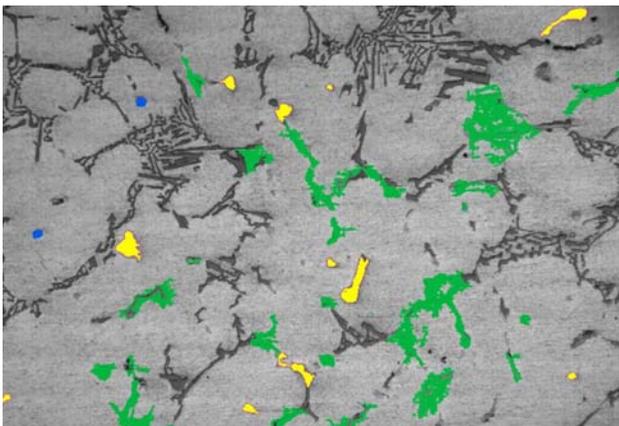


Figura 3.10. Microconstituyente no. 3 coloreado de amarillo

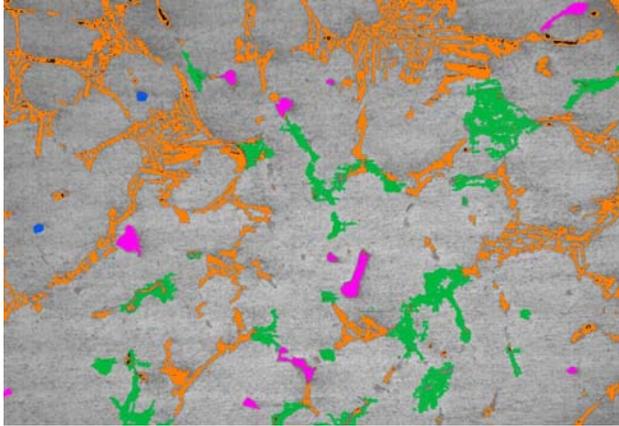


Figura 3.11. Microconstituyente no. 4 coloreado de naranja.

Una vez seleccionados todos los microconstituyentes, se procede a seleccionar o colorear la matriz, debido a que esta también debe ser cuantificada.

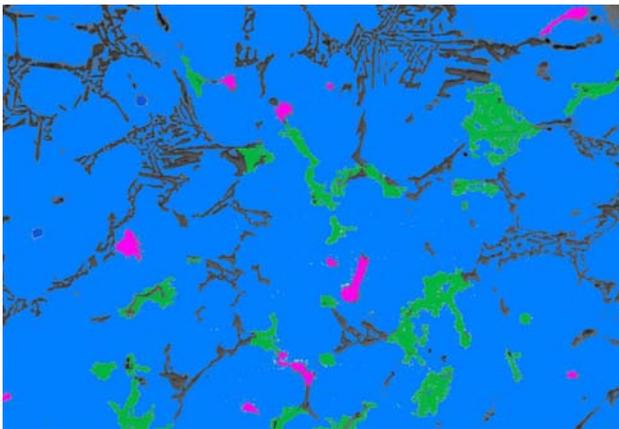


Figura 3. 12. Matriz coloreada de azul.

Por último se muestra la llamada máscara con todos los microconstituyentes seleccionados.

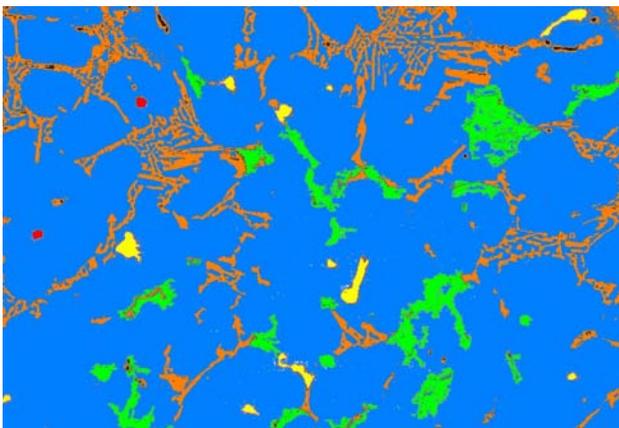


Figura 3.13. Mascara resultante.

Una vez seleccionados todos los microconstituyentes y la matriz (Fig. 3.13) se ejecuta el comando de cuantificar del programa de análisis de imágenes, de tal manera que cuenta los microconstituyentes seleccionados. Todos los resultados mostrados por el programa son exportados a una hoja de cálculo (Excel) en donde se realizan las operaciones necesarias para obtener el porcentaje presente de cada microconstituyente.

Capítulo IV. Desarrollo experimental

Las aleaciones utilizadas en el presente trabajo fueron fabricadas en trabajos anteriores a este.

El desarrollo experimental se llevo a cabo con el objetivo de caracterizar metalográficamente dichas aleaciones, así como el efecto de la modificación y la refinación de las fases microestructurales.

A continuación se presenta la composición química experimental de las aleaciones utilizadas en la presente tesis:

Tabla 4.1. Composición nominal y experimental de las aleaciones A356 complejas.

| Tipo | Aleación | % Si | % Cu | % Mg | % Ni | % Sr | % Fe | % Mn |
|----------|----------|------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| Nominal | 1 | 7 | 1 | 1 | .25 | --- | --- | --- |
| Obtenida | 1 | 6.85 | 1.093 | .939 | .2878 | .009 | .3904 | .1346 |
| Nominal | 1(a) | 7 | 1 | 1 | .25 | .03 | --- | --- |
| Obtenida | 1(a) | 6.71 | 1.037 | 0.949 | .2483 | .043 | .4141 | .1456 |
| Nominal | 2 | 7 | 1 | 1 | .50 | --- | --- | --- |
| Obtenida | 2 | 7.31 | 1.218 | 1.11 | .4971 | .0002 | .4180 | 0.1499 |
| Nominal | 2(a) | 7 | 1 | 1 | .50 | .03 | --- | --- |
| Obtenida | 2(a) | 6.43 | .999 | .977 | .561 | .025 | .4202 | .1514 |
| Nominal | 3 | 7 | 1 | 1.5 | .25 | --- | --- | --- |
| Obtenida | 3 | 7.62 | 1.169 | 1.717 | .2741 | .0002 | .4426 | .1588 |
| Nominal | 3(a) | 7 | 1 | 1.5 | .25 | .03 | --- | --- |
| Obtenida | 3(a) | 7.12 | 1.022 | 1.336 | .2273 | .036 | .4454 | .1477 |
| Nominal | 4 | 7 | 1 | 1.5 | .50 | --- | --- | --- |
| Obtenida | 4 | 6.83 | 1.119 | 1.614 | .618 | .0001 | .4264 | .1598 |
| Nominal | 4(a) | 7 | 1 | 1.5 | .50 | .03 | --- | --- |
| Obtenida | 4(a) | 6.56 | 1.133 | 1.567 | .590 | .04 | .4229 | .1477 |
| Nominal | 5 | 7 | 1 | 2 | .25 | --- | --- | --- |
| Obtenida | 5 | 7.45 | 1.165 | 2.305 | .2705 | .0002 | .4069 | .1591 |
| Nominal | 5(a) | 7 | 1 | 2 | .25 | .03 | --- | --- |
| Obtenida | 5(a) | 6.72 | 1.263 | 2.015 | .2869 | .03 | .4297 | .1438 |
| Nominal | 6 | 7 | 1 | 2 | .50 | --- | --- | --- |
| Obtenida | 6 | 6.78 | 1.144 | 2.093 | .656 | .0002 | .4313 | .1673 |
| Nominal | 6(a) | 7 | 1 | 2 | .50 | .03 | --- | --- |
| Obtenida | 6(a) | 6.89 | 1.158 | 1.988 | .491 | .038 | .4026 | .1519 |

a) Aleaciones modificadas con estroncio

4.1. Preparación metalográfica

4.1.1 Secuencia de corte y desbaste

La preparación metalográfica se llevo a cabo de la siguiente manera:

1. Se realizo la secuencia de corte y desbaste con cada una de las probetas.

El corte se realizó con un disco de carburo de silicio. Las probetas cilíndricas se cortaron con alturas de 2 cm aproximadamente.

Se efectuó el desbaste grueso en lija de banda, grano 80.

A continuación se realizo el desbaste fino, pasando por las lijas de agua 240, 320, 400 y 600, en este orden.

2. Se realizó la secuencia de pulido.

Se hizo el pulido grueso, con un paño tipo canvas y con alúmina de 1 micras.

Después se llevo a pulido fino con un paño de pelo corto y sintético y con alúmina de 0.3 micras.

4.1.2 Formulación de reactivos de ataque

Se utilizaron tres reactivos de ataque, preparados de la siguiente manera:

Picral

Se tomaron 4g de ácido pícrico y 100mL de etanol

Ácido pícrico

Se tomaron 1.064g de ácido pícrico y 100mL de agua destilada

Sargent

Se tomaron 84mL de agua destilada, 15.5mL de HNO₃ concentrado, 0.5mL de HF concentrado y 3g de CrO₃.

4.1.3 Secuencias de ataque químico

El ataque se realizó de la siguiente manera, a modo de obtener el mejor contraste de fases:

Ataque con picral:

La probeta se limpió con agua y se secó con aire caliente.

Se agregó el reactivo en una caja petri y se sumergió la probeta de 20 a 30 segundos.

Se limpió la superficie durante 1minuto con ultrasonido y se seco con aire caliente.

Ataque con ácido pícrico:

La probeta se limpió con agua y se secó con aire caliente.

Se agregó el reactivo en una caja petri y se sumergió la probeta de 10 a 20 minutos (recomendado), por intervalos de 2 minutos, observando en cada intervalo, hasta obtener el contraste deseado.

Se limpió la superficie durante 1 minuto con ultrasonido y se secó con aire caliente.

Ataque con Sargent:

La probeta se limpió con agua y se secó con aire caliente.

Se agregó el reactivo en una caja petri y se sumergió la probeta durante 2 minutos, con intervalos de 20 segundos, observando en cada intervalo, hasta obtener el contraste deseado.

Se limpió la superficie durante 1 minuto con ultrasonido y se secó con aire caliente.

4.1.4 Selección del reactivo de ataque adecuado

Se probaron todos los reactivos, para asegurar el contraste deseado en las probetas.

Contraste con picral:

Este reactivo resultó muy agresivo, aunque el tiempo de ataque fuera muy corto, este manchaba las piezas. El contraste era bueno, pero al manchar las piezas no daba un buen contraste en la cuantificación de fases.

En la imagen 4.1 se muestra el resultado del ataque.

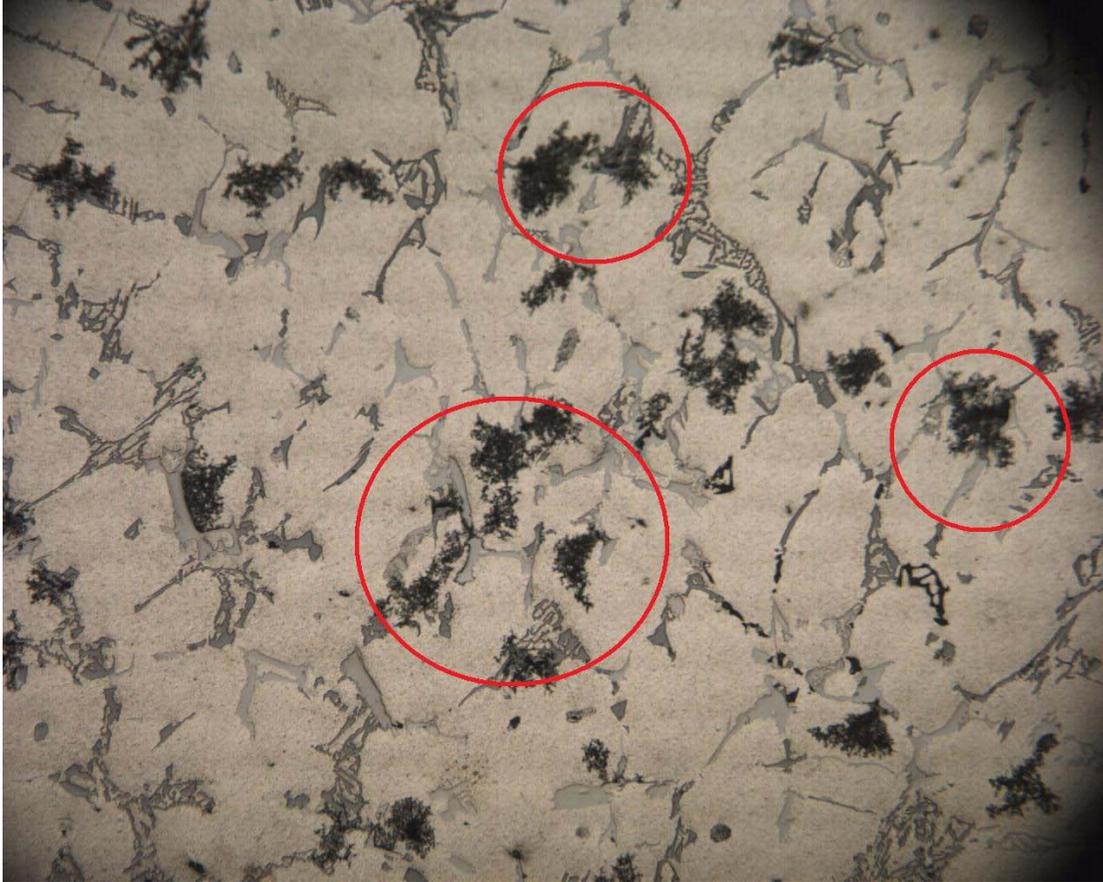


Figura 4.1. Muestra 2, en la imagen se muestran las manchas provocadas por el reactivo. Reactivo de ataque: Picral.

Contraste con ácido pícrico:

Este resultó ser el reactivo adecuado, se sumergieron las probetas de 10 a 20 minutos, el tiempo promedio de ataque fue de 4 minutos por probeta.

En la imagen 4.2 se muestra el contraste obtenido con este ataque.

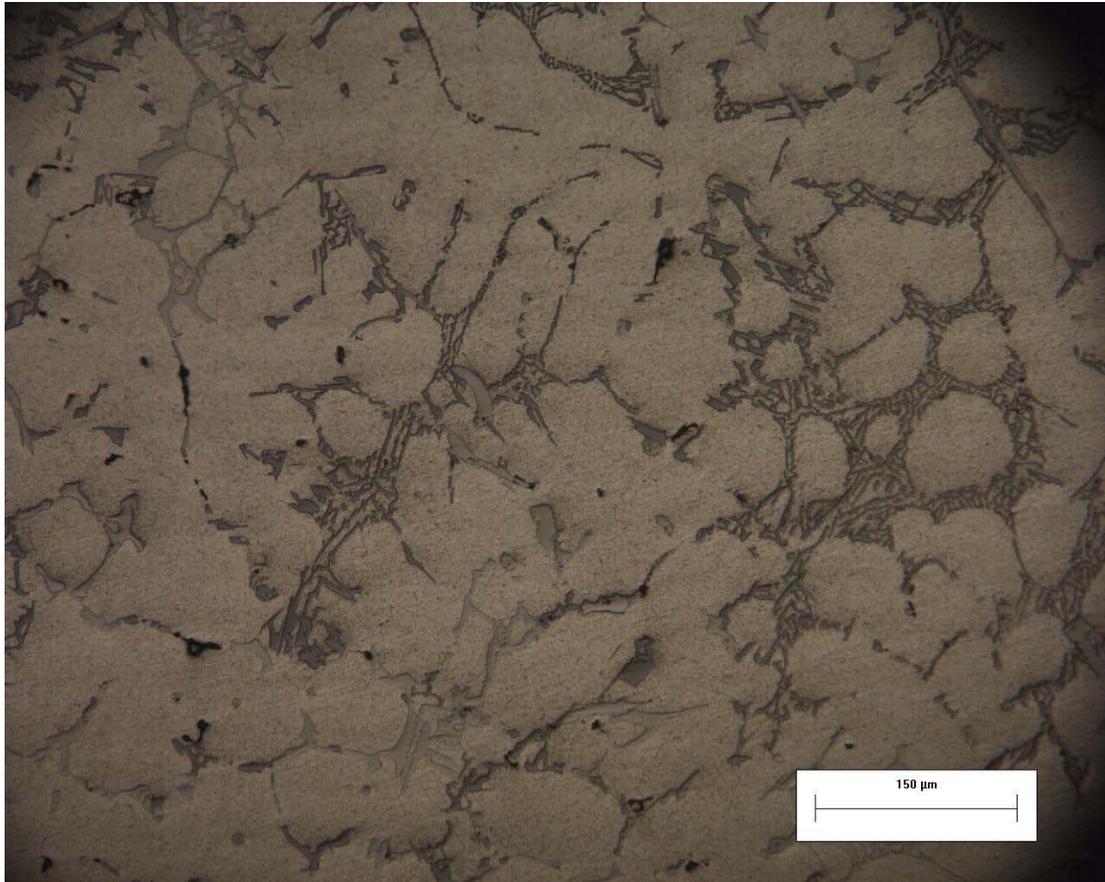


Figura 4.2. Muestra no. 1. Reactivo de ataque: ácido pícrico.

Contraste con Sargent:

Este reactivo también resultó muy agresivo para las probetas, se probaron tiempos de ataque de 20 segundos, el primer intervalo en el que se probó el reactivo fue de 2 segundos.

A pesar de los tiempos de ataque tan pequeños, la pieza se manchó y el reactivo disolver alguna fase por lo que de igual manera se rechazó este reactivo, debido a que no se podía llevar a cabo la cuantificación de manera efectiva.

En la imagen 4.3 se muestra el resultado del contraste con este reactivo.



Figura 4.3. Muestra 5, en la imagen se muestra el ataque, en los círculos rojos se muestran las fases que se llevo el reactivo y en el círculo azul podemos apreciar las manchas que ocasiono el mismo. Reactivo de ataque: Sargent.

4.2. Observación microscópica y cuantificación de fases

Una vez atacadas todas las probetas fueron observadas con el microscopio metalúrgico Olympus PMG 3.

Se observaron y fotografiaron con los objetivos de 5x, 10x y 20x. No se utilizaron aumentos mayores debido a que el área observada es cada vez de menor tamaño y no es representativa de la aleación, para la cuantificación de fases.

Además se agregaron las escalas a cada una de las imágenes.



Figura 4.4. Microscopio metalúrgico de platina invertida.

Con las imágenes capturadas anteriormente, se llevó a cabo la cuantificación de fases esto se realizó con ayuda del programa Image Pro Plus versión 2007. Se utilizó el método de cuantificación en microscopía óptica por medio de la máscara descrito en el capítulo III. Se realizó la cuantificación sobre seis campos para cada una de las doce muestras.

4.3. Análisis cualitativo de fases

Se seleccionaron dos muestras, en este caso la 2 y la 6 sin modificación, para el análisis de las fases.

Como las muestras son conductoras no se necesitó ninguna preparación adicional de estas. Se observaron con el microscopio electrónico de barrido (MEB) a 100, 250 y 600 aumentos.

Se numeraron las fases y se le realizó análisis químico mediante la técnica de espectrometría por dispersión de energía de rayos X (EDS).



Figura 4.5. Microscopio electrónico de barrido

Capítulo V. Resultados y Análisis

En este capítulo se presentan las imágenes de las microestructuras de las aleaciones experimentales estudiadas en esta tesis, tanto las obtenidas por microscopía óptica, así como las máscaras generadas mediante el sistema de análisis de imágenes para la cuantificación de cada fase. Adicionalmente se presentan las tablas con los resultados de la composición química experimental y la evaluación cuantitativa de cada fase. Para cada muestra se evaluaron 6 campos, los resultados en las tablas indican los valores promedio.

5.1. Aleaciones sin modificación

5.1.1. Aleación A356-1%Cu-1%Mg-0.25%Ni.

La figura 5.1a muestra la microestructura de la aleación A356-1%Cu-1%Mg-0.24%Ni y la 5.1b la máscara para la evaluación cuantitativa de cada microconstituyente. Las tabla 5.1a y 5.1b indican la composición química experimental y el promedio de la fracción presente de cada microconstituyente, respectivamente.

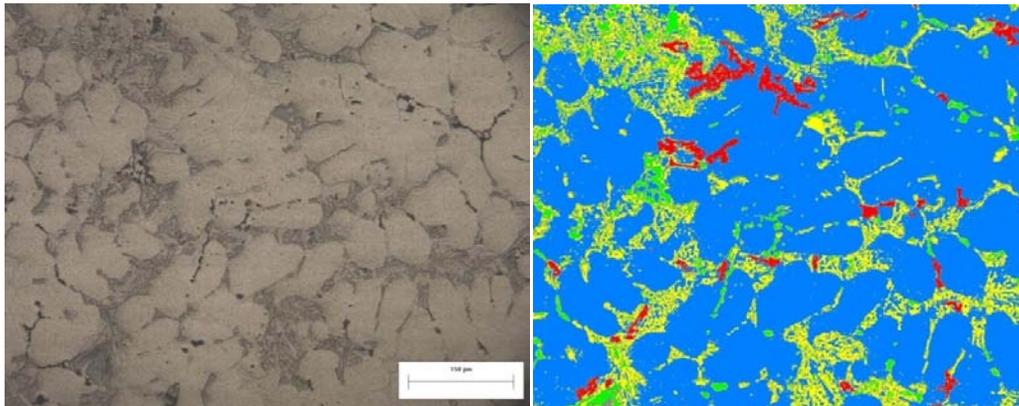


Figura 5.1. Microestructura para la aleación A356-1%Cu-1%Mg-0.25%Ni, (a) Obtenida por MO y (b) Máscara utilizada en la cuantificación de microconstituyentes.

Tabla 5.1a. Composición química experimental

| Aleación | %Si | %Cu | %Mg | %Ni | %Sr | %Fe | %Mn |
|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|

| | | | | | | | |
|---|------|-------|-------|--------|-------|--------|--------|
| 1 | 6.85 | 1.093 | 0.939 | 0.2878 | 0.009 | 0.3904 | 0.1346 |
|---|------|-------|-------|--------|-------|--------|--------|

Tabla 5.1b. Fracciones de los microconstituyentes presentes en la microestructura

| Fase | Porcentaje (%) | Color (marcado en la máscara) | Composición Química (EDS) |
|------|----------------|-------------------------------|--|
| 1 | 5.138 | Rojo | $\beta\text{Al}_8\text{Si}_2\text{Fe}$ |
| 2 | 11.766 | Amarillo | Si eutéctico |
| 3 | 0.568 | Verde | $\text{Al}_6\text{Cu}_3\text{Ni}$ |
| 4 | 0 | Naranja | $\text{Al}_7\text{Si}_6\text{Mg}_2\text{NiCu}$ |

5.1.2. Aleación A356-1%Cu-1%Mg-0.50%Ni.

En la figura 5.2a se muestra la metalografía obtenida por MO y la figura 5.2b muestra la máscara y utilizada en la cuantificación de microconstituyentes para la aleación A356-1%Cu-1%Mg-0.50%Ni. Las tablas 5.2a y 5.2b muestran la composición química experimental y la cuantificación promedio para cada microconstituyente respectivamente.

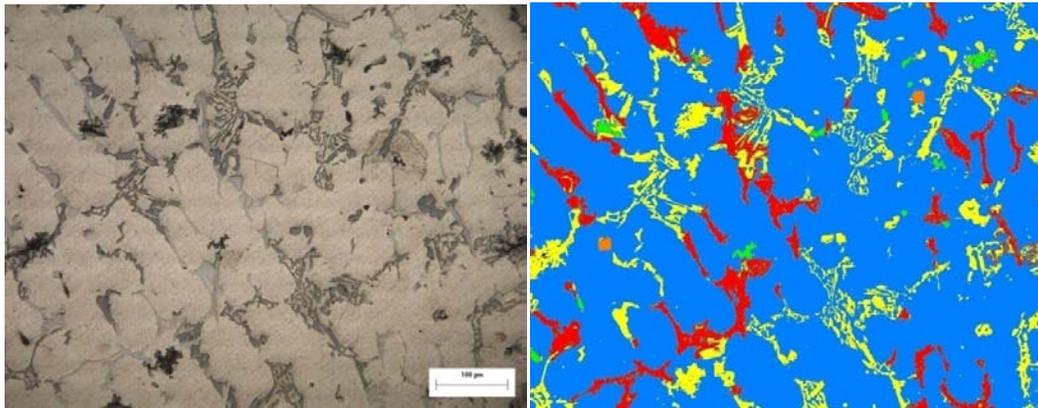


Figura 5.2. Microestructura para la aleación A356-1%Cu-1%Mg-0.50%Ni, (a) Obtenida por MO y (b) Máscara utilizada en la cuantificación de microconstituyentes

Tabla 5.2a. Composición química experimental

| Aleación | %Si | %Cu | %Mg | %Ni | %Sr | %Fe | %Mn |
|----------|------|-------|------|--------|--------|--------|--------|
| 2 | 7.31 | 1.218 | 1.11 | 0.4971 | 0.0002 | 0.4180 | 0.1499 |

Tabla 5.2b. Fracciones de los microconstituyentes presentes en la microestructura

| Fase | Porcentaje (%) | Color (marcado en la máscara) | Composición Química (EDS) |
|------|----------------|-------------------------------|--|
| 1 | 6.450 | Rojo | $\beta\text{Al}_8\text{Si}_2\text{Fe}$ |
| 2 | 12.143 | Amarillo | Si eutéctico |
| 3 | 0.888 | Verde | $\text{Al}_6\text{Cu}_3\text{Ni}$ |
| 4 | 0.011 | Naranja | $\text{Al}_7\text{Si}_6\text{Mg}_2\text{NiCu}$ |

5.1.3. Aleación A356-1%Cu-1.5%Mg-0.25%Ni.

Las figuras 5.3a y 5.3b muestran la microestructura obtenida por MO y la máscara utilizada para la cuantificación de microconstituyentes respectivamente. La tabla 5.3a muestra la composición química obtenida experimentalmente y la tabla 5.3b muestra la cuantificación promedio para cada microconstituyente en la aleación A356-1%Cu-1.5%Mg-0.25%Ni.

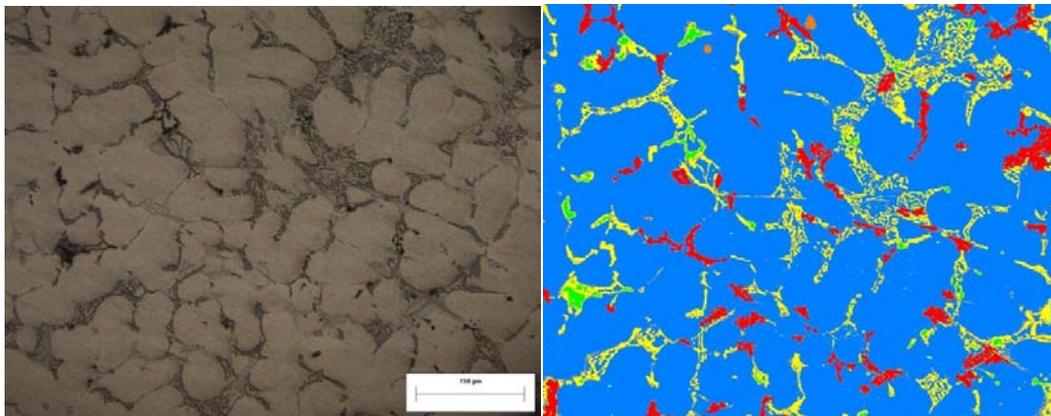


Figura 5.3 Microestructura para la aleación A356-1%Cu-1.5%Mg-0.25%Ni, (a) Obtenida por MO y (b) Máscara utilizada en la cuantificación de microconstituyentes

Tabla 5.3a. Composición química experimental

| Aleación | %Si | %Cu | %Mg | %Ni | %Sr | %Fe | %Mn |
|----------|------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| 3 | 7.62 | 1.169 | 1.717 | 0.2741 | 0.0002 | 0.4426 | 0.1588 |

Tabla 5.3b. Fracciones de los microconstituyentes presentes en la microestructura

| Fase | Porcentaje (%) | Color (marcado en la máscara) | Composición Química (EDS) |
|------|----------------|-------------------------------|--|
| 1 | 4.949 | Rojo | $\beta\text{Al}_8\text{Si}_2\text{Fe}$ |
| 2 | 11.150 | Amarillo | Si eutéctico |
| 3 | 1.174 | Verde | $\text{Al}_6\text{Cu}_3\text{Ni}$ |
| 4 | 0.038 | Naranja | $\text{Al}_7\text{Si}_6\text{Mg}_2\text{NiCu}$ |

5.1.4. Aleación A356-1%Cu-1.5%Mg-0.50%Ni.

Las figuras 5.4a y 5.4b muestran la metalografía obtenida por MO y la máscara para la cuantificación de microconstituyentes en la aleación A356-1%Cu-1.5%Mg-0.50%Ni. Las tablas 5.4a y 5.4b muestran la composición química experimental y la cuantificación de cada microconstituyente respectivamente.

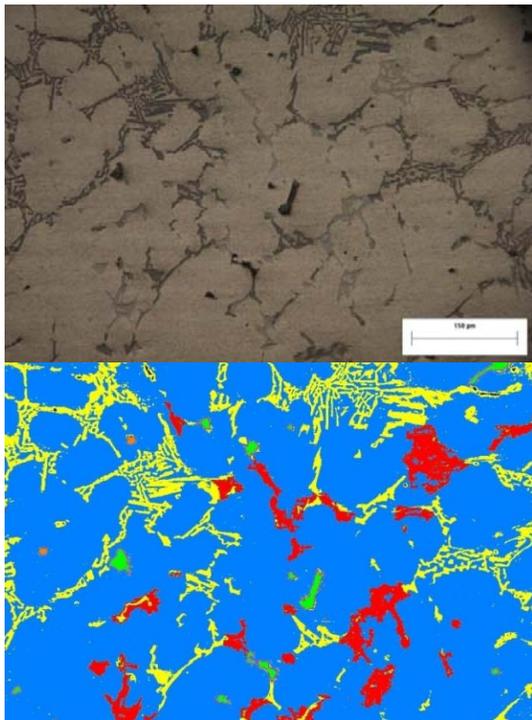


Figura 5.4. Microestructura para la aleación A356-1%Cu-1.5%Mg-0.50%Ni, (a) Obtenida por MO y (b) Máscara utilizada en la cuantificación de microconstituyentes

Tabla 5.4a. Composición química experimental

| Aleación | %Si | %Cu | %Mg | %Ni | %Sr | %Fe | %Mn |
|----------|------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| 4 | 6.83 | 1.119 | 1.614 | 0.618 | 0.0001 | 0.4264 | 0.1598 |

Tabla 5.4b. Fracciones de los microconstituyentes presentes en la microestructura

| Fase | Porcentaje (%) | Color (marcado en la máscara) | Composición Química (EDS) |
|------|----------------|-------------------------------|--|
| 1 | 3.383 | Rojo | $\beta\text{Al}_8\text{Si}_2\text{Fe}$ |
| 2 | 12.028 | Amarillo | Si eutéctico |
| 3 | 2.570 | Verde | $\text{Al}_6\text{Cu}_3\text{Ni}$ |
| 4 | 0.040 | Naranja | $\text{Al}_7\text{Si}_6\text{Mg}_2\text{NiCu}$ |

5.1.5. Aleación A356-1%Cu-2%Mg-0.25%Ni.

La figura 5.5a muestra la microestructura obtenida por MO y la figura 5.5b muestra la máscara utilizada en la cuantificación de microconstituyentes. Las tablas 5.5a y 5.5b muestran la composición química experimental y la cuantificación de los microconstituyentes presentes en la aleación A356-1%Cu-2%Mg-0.25%Ni.

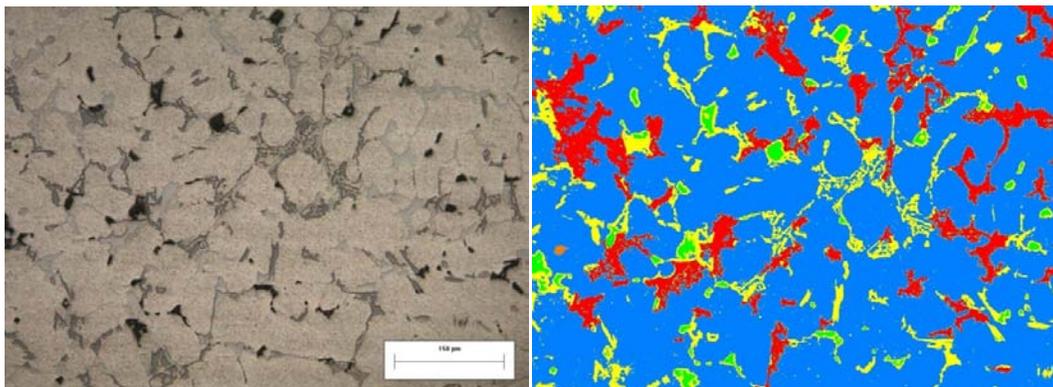


Fig. 5.5. Microestructura para la aleación A356-1%Cu-2%Mg-0.25%Ni, (a) Obtenida por MO y (b) Máscara utilizada en la cuantificación de microconstituyentes

Tabla 5.5a. Composición química experimental

| Aleación | %Si | %Cu | %Mg | %Ni | %Sr | %Fe | %Mn |
|----------|------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| 5 | 7.45 | 1.165 | 2.305 | 0.2705 | 0.0002 | 0.4069 | 0.1591 |

Tabla 5.5b. Fracciones de los microconstituyentes presentes en la microestructura

| Fase | Porcentaje (%) | Color (marcado en la máscara) | Composición Química (EDS) |
|------|----------------|-------------------------------|--|
| 1 | 8.928 | Rojo | $\beta\text{Al}_8\text{Si}_2\text{Fe}$ |
| 2 | 9.524 | Amarillo | Si eutéctico |
| 3 | 1.318 | Verde | $\text{Al}_6\text{Cu}_3\text{Ni}$ |
| 4 | 0.044 | Naranja | $\text{Al}_7\text{Si}_6\text{Mg}_2\text{NiCu}$ |

5.1.6. Aleación A356-1%Cu-2%Mg-0.50%Ni.

Las tablas 5.6a y 5.6b muestran las imágenes de la microestructura obtenida por MO y la máscara utilizada en la cuantificación de microconstituyentes respectivamente para la aleación A356-1%Cu-2%Mg-0.50%Ni. Las tablas 5.6a y 5.6b muestran la composición química experimental obtenida y la cuantificación de cada microconstituyente presente en la aleación.

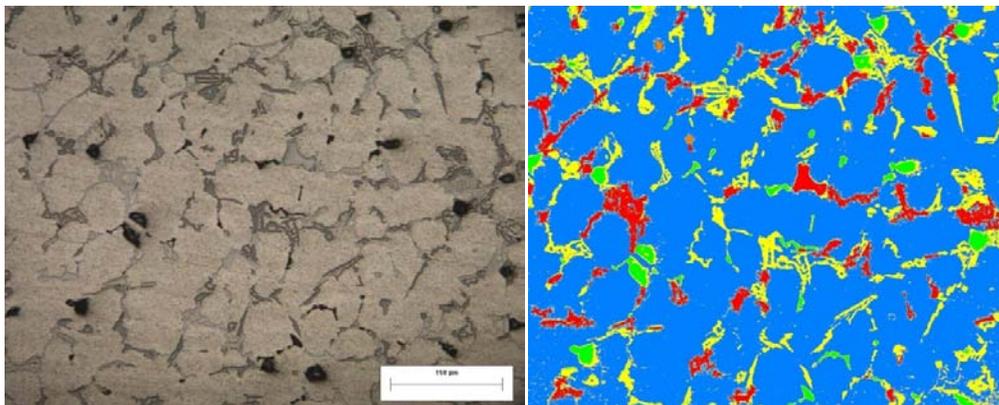


Figura 5.6. Microestructura para la aleación A356-1%Cu-2%Mg-0.50%Ni, (a) Obtenida por MO y (b) Máscara utilizada en la cuantificación de microconstituyentes

Tabla 5.6a. Composición química experimental

| Aleación | %Si | %Cu | %Mg | %Ni | %Sr | %Fe | %Mn |
|----------|------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| 6 | 6.78 | 1.144 | 2.093 | 0.656 | 0.0002 | 0.4313 | 0.1673 |

Tabla 5.6b. Fracciones de los microconstituyentes presentes en la microestructura

| Fase | Porcentaje (%) | Color (marcado en la máscara) | Composición Química (EDS) |
|------|----------------|-------------------------------|--|
| 1 | 6.234 | Rojo | $\beta\text{Al}_8\text{Si}_2\text{Fe}$ |
| 2 | 9.957 | Amarillo | Si eutéctico |
| 3 | 1.486 | Verde | $\text{Al}_6\text{Cu}_3\text{Ni}$ |
| 4 | 0.054 | Naranja | $\text{Al}_7\text{Si}_6\text{Mg}_2\text{NiCu}$ |

5.2. Aleaciones modificadas

5.2.1 Aleación A356-1%Cu-1%Mg-0.25%Ni.

En las imágenes 5.7a y 5.7b se muestra la metalografía obtenida por MO y la máscara utilizada para la cuantificación de los microconstituyentes presentes en la aleación A356-1%Cu-1%Mg-0.25%Ni. En la tabla 5.7a se muestra la composición química experimental y en la tabla 5.7b se muestra la cuantificación promedio de microconstituyentes.

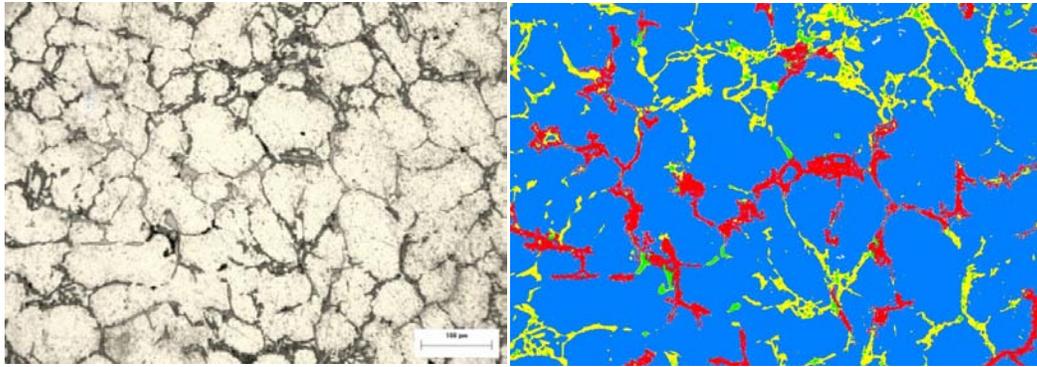


Figura 5.7. Microestructura para la aleación A356-1%Cu-1%Mg-0.25%Ni, (a) Obtenida por MO y (b) Máscara utilizada en la cuantificación de microconstituyentes

Tabla 5.7a. Composición química experimental

| Aleación | %Si | %Cu | %Mg | %Ni | %Sr | %Fe | %Mn |
|----------|------|-------|-------|--------|-------|--------|--------|
| 1 | 6.71 | 1.037 | 0.949 | 0.2483 | 0.043 | 0.4141 | 0.1456 |

Tabla 5.7b. Fracciones de los microconstituyentes presentes en la microestructura

| Fase | Porcentaje (%) | Color (marcado en la máscara) | Composición Química (EDS) |
|------|----------------|-------------------------------|--|
| 1 | 6.235 | Rojo | $\beta\text{Al}_8\text{Si}_2\text{Fe}$ |
| 2 | 9.516 | Amarillo | Si eutéctico |
| 3 | 0.394 | Verde | $\text{Al}_6\text{Cu}_3\text{Ni}$ |

5.2.2. Aleación A356-1%Cu-1%Mg-0.50%Ni.

La figura 5.8a muestra la metalografía obtenida por MO y la figura 5.8b muestra la máscara utilizada en la cuantificación de microconstituyentes presentes en la aleación A356-1%Cu-1%Mg-0.50%Ni. Las tablas 5.8a y 5.8b muestran la composición química obtenida experimentalmente y la cuantificación de los microconstituyentes presentes respectivamente.

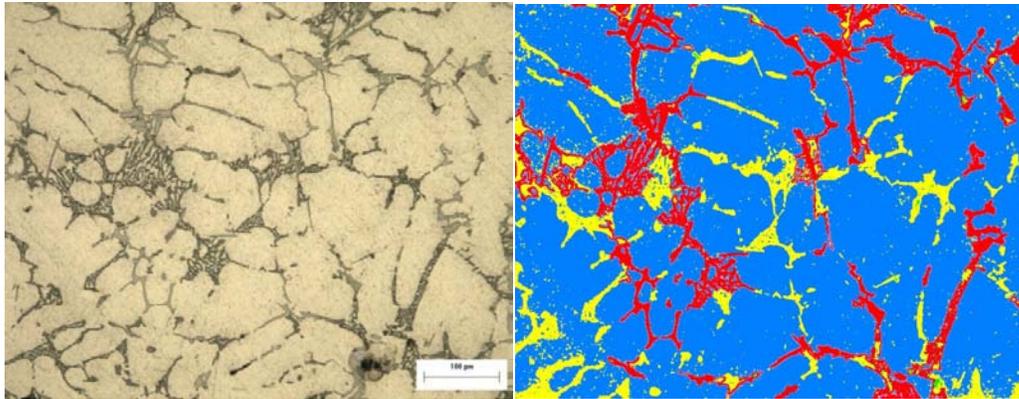


Figura 5.8. Microestructura para la aleación A356-1%Cu-1%Mg-0.50%Ni, (a) Obtenida por MO y (b) Máscara utilizada en la cuantificación de microconstituyentes

Tabla 5.8a. Composición química experimental

| Aleación | %Si | %Cu | %Mg | %Ni | %Sr | %Fe | %Mn |
|----------|------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| 2 | 6.43 | 0.999 | 0.977 | 0.561 | 0.025 | 0.4202 | 0.1514 |

Tabla 5.8b. Fracciones de los microconstituyentes presentes en la microestructura

| Fase | Porcentaje (%) | Color (marcado en la máscara) | Composición Química (EDS) |
|------|----------------|-------------------------------|--|
| 1 | 7.647 | Rojo | $\beta\text{Al}_8\text{Si}_2\text{Fe}$ |
| 2 | 9.720 | Amarillo | Si eutéctico |
| 3 | 1.628 | Verde | $\text{Al}_6\text{Cu}_3\text{Ni}$ |

5.2.3. Aleación A356-1%Cu-1.5%Mg-0.25%Ni.

En la figura 5.9a y 5.9b se muestra la microestructura observada por MO y la máscara utilizada en la cuantificación de microconstituyentes respectivamente. La tabla 5.9a muestra la composición química experimental y la tabla 5.9b muestra la cuantificación de los microconstituyentes presentes en la aleación A356-1%Cu-1.5%Mg-0.25%Ni.

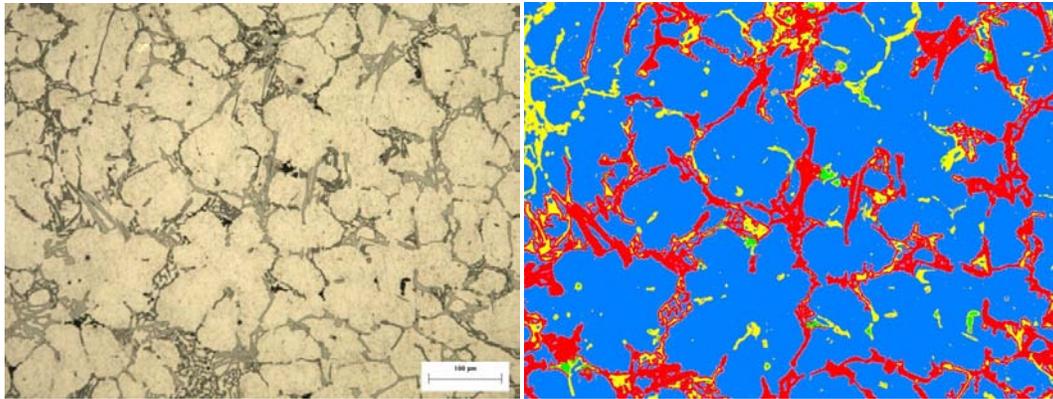


Figura 5.9. Microestructura para la aleación A356-1%Cu-1.5%Mg-0.25%Ni, (a) Obtenida por MO y (b) Máscara utilizada en la cuantificación de microconstituyentes

Tabla 5.9a. Composición química experimental

| Aleación | %Si | %Cu | %Mg | %Ni | %Sr | %Fe | %Mn |
|----------|------|-------|-------|--------|-------|--------|--------|
| 3 | 7.12 | 1.022 | 1.336 | 0.2273 | 0.036 | 0.4454 | 0.1477 |

Tabla 5.9b. Fracciones de los microconstituyentes presentes en la microestructura

| Fase | Porcentaje (%) | Color (marcado en la máscara) | Composición Química (EDS) |
|------|----------------|-------------------------------|--|
| 1 | 9.246 | Rojo | $\beta\text{Al}_8\text{Si}_2\text{Fe}$ |
| 2 | 8.557 | Amarillo | Si eutéctico |
| 3 | 0.707 | Verde | $\text{Al}_6\text{Cu}_3\text{Ni}$ |

5.2.4. Aleación A356-1%Cu-1.5%Mg-0.50%Ni.

En la figura 5.10a se muestra la microestructura obtenida por MO y en la figura 5.10b se muestra la máscara utilizada en la cuantificación de microconstituyentes presentes. En la tabla 5.10a se muestra la composición química obtenida experimentalmente y en la tabla 5.10b se muestra la cuantificación de microconstituyentes en la aleación A356-1%Cu-1.5%Mg-0.50%Ni.

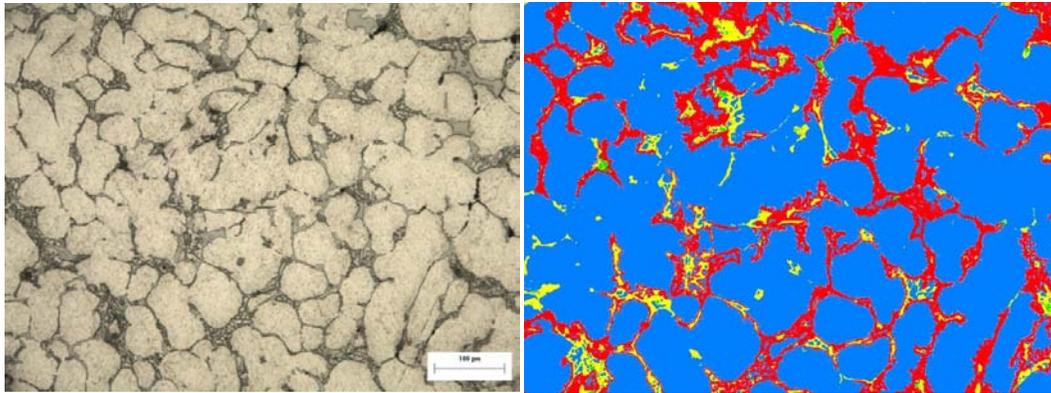


Figura 5.10. Microestructura para la aleación A356-1%Cu-1.5%Mg-0.50%Ni, (a) Obtenida por MO y (b) Máscara utilizada en la cuantificación de microconstituyentes

Tabla 5.10a. Composición química experimental

| Aleación | %Si | %Cu | %Mg | %Ni | %Sr | %Fe | %Mn |
|----------|------|-------|-------|-------|------|--------|--------|
| 4 | 6.56 | 1.133 | 1.567 | 0.590 | 0.04 | 0.4229 | 0.1477 |

Tabla 5.10b. Fracciones de los microconstituyentes presentes en la microestructura

| Fase | Porcentaje (%) | Color (marcado en la máscara) | Composición Química (EDS) |
|------|----------------|-------------------------------|--|
| 1 | 13.659 | Rojo | $\beta\text{Al}_8\text{Si}_2\text{Fe}$ |
| 2 | 10.299 | Amarillo | Si eutéctico |
| 3 | 0.707 | Verde | $\text{Al}_6\text{Cu}_3\text{Ni}$ |

5.2.5. Aleación A356-1%Cu-2%Mg-0.25%Ni.

En las figuras 5.11a y 5.11b se muestra la metalografía obtenida por MO y la máscara utilizada para la cuantificación de los microconstituyentes presentes en la aleación A356-1%Cu-2%Mg-0.25%Ni. En las tablas 5.11^a y 5.11b se muestra la composición química experimental y la cuantificación de microconstituyentes presentes respectivamente.

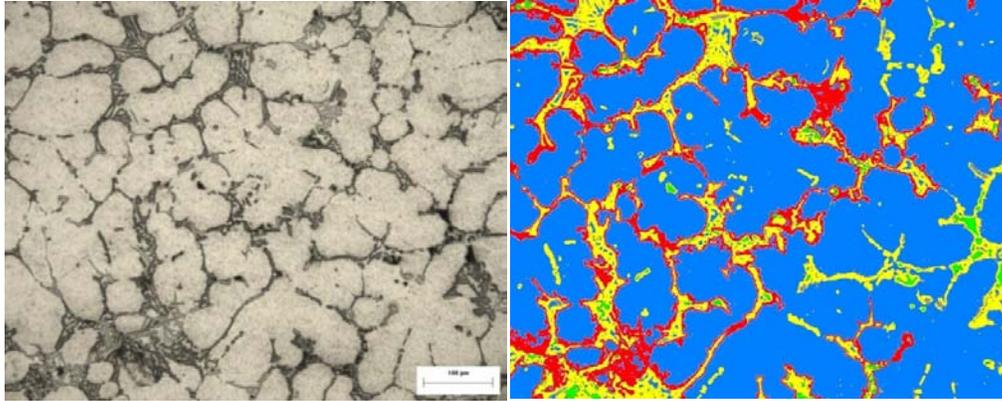


Figura 5.11. Microestructura para la aleación A356-1%Cu-2%Mg-0.25%Ni, (a) Obtenida por MO y (b) Máscara utilizada en la cuantificación de microconstituyentes

Tabla 5.11a. Composición química experimental

| Aleación | %Si | %Cu | %Mg | %Ni | %Sr | %Fe | %Mn |
|----------|------|-------|-------|--------|------|--------|--------|
| 5 | 6.72 | 1.263 | 2.015 | 0.2869 | 0.03 | 0.4297 | 0.1438 |

Tabla 5.11b. Fracciones de los microconstituyentes presentes en la microestructura

| Fase | Porcentaje (%) | Color (marcado en la máscara) | Composición Química (EDS) |
|------|----------------|-------------------------------|--|
| 1 | 11.498 | Rojo | $\beta\text{Al}_8\text{Si}_2\text{Fe}$ |
| 2 | 11.031 | Amarillo | Si eutéctico |
| 3 | 1.008 | Verde | $\text{Al}_6\text{Cu}_3\text{Ni}$ |

5.2.6. Aleación A356-1%Cu-2%Mg-0.50%Ni.

La figura 5.12a muestra la microestructura observada por MO y la figura 5.12b muestra la máscara utilizada para la cuantificación de los microconstituyentes. Las tablas 5.12a y 5.12b muestra la composición química experimental y la cuantificación de microconstituyentes presentes en la aleación A356-1%Cu-2%Mg-0.50%Ni.

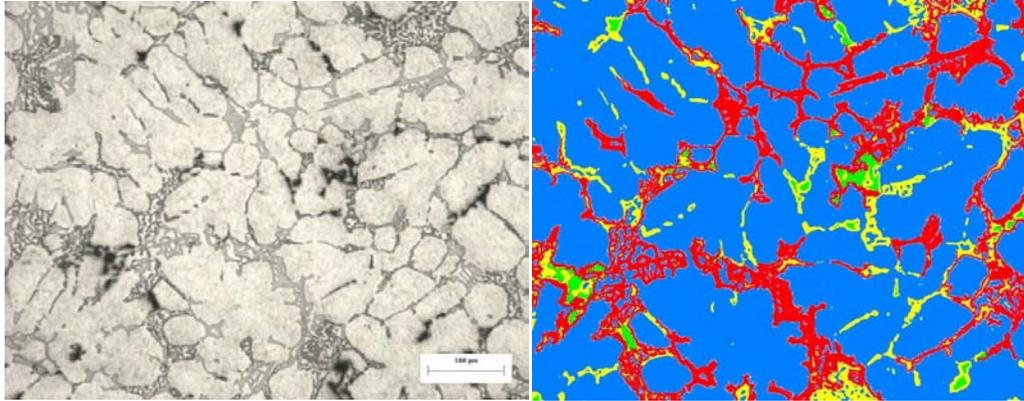


Fig. 5.12. Microestructura para la aleación A356-1%Cu-2%Mg-0.50%Ni, (a) Obtenida por MO y (b) Máscara utilizada en la cuantificación de microconstituyentes

Tabla 5.12a. Composición química experimental

| Aleación | %Si | %Cu | %Mg | %Ni | %Sr | %Fe | %Mn |
|----------|------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| 6 | 6.89 | 1.158 | 1.988 | 0.491 | 0.038 | 0.4026 | 0.1519 |

Tabla 5.12b. Fracciones de los microconstituyentes presentes en la microestructura

| Fase | Porcentaje (%) | Color (marcado en la máscara) | Composición Química (EDS) |
|------|----------------|-------------------------------|--|
| 1 | 9.965 | Rojo | $\beta\text{Al}_8\text{Si}_2\text{Fe}$ |
| 2 | 8.318 | Amarillo | Si eutéctico |
| 3 | 2.352 | Verde | $\text{Al}_6\text{Cu}_3\text{Ni}$ |

5.3 Microscopio electrónico de barrido (MEB)

La composición química de cada fase en las aleaciones complejas, como se mencionó, se obtuvo por MEB-EDS, dichas composiciones se presentan a continuación.

El microconstituyente 1 se aprecia con formas aciculares, su color fue gris claro, la composición química se presenta en la tabla 5.13, el espectro (Fig. 5.13) y la imagen de la microestructura (Fig. 5.14).

Tabla 5.13. Composición química por EDS del microconstituyente 1 (rojo) de la aleación A356-1%Cu-1%Mg-0.50%Ni.

| Elemento | Al | Si | Fe | Mn | Cr | Ni | Cu |
|-----------|-------|-------|-------|------|------|------|------|
| % Peso | 57.61 | 9.75 | 15.57 | 9.93 | 3.52 | 2.16 | 1.46 |
| % Atómico | 69.57 | 11.31 | 9.08 | 5.89 | 2.20 | 1.20 | 0.75 |

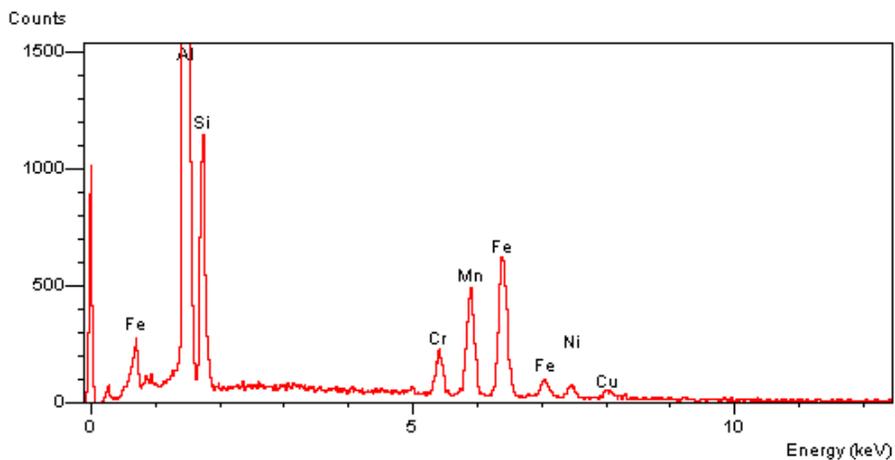


Figura 5. 13. Espectro del microconstituyente 1 (rojo) de la aleación A356-1%Cu-1%Mg-0.50%Ni.

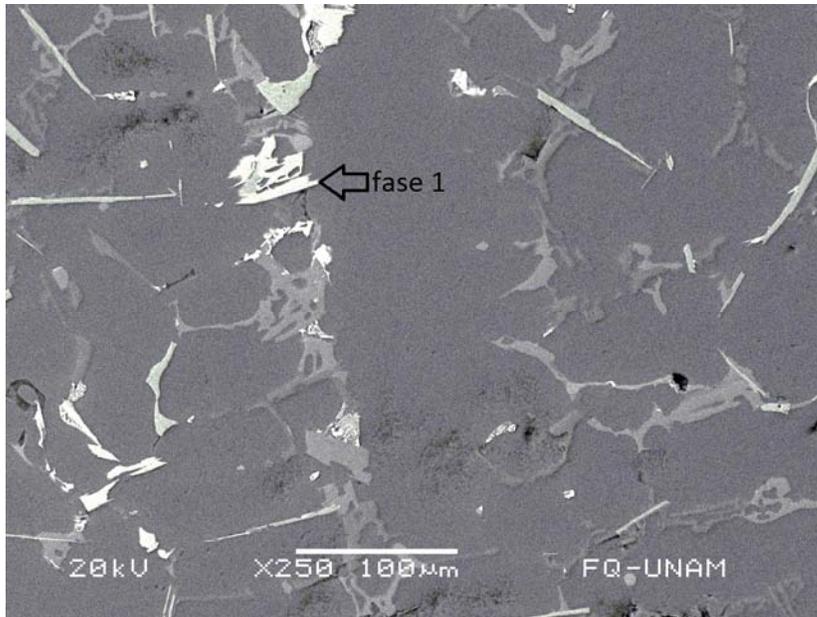


Figura 5.14. Análisis puntual del microconstituyente 1 (rojo) en la aleación A356-1%Cu-1%Mg-0.50%Ni.

Por lo anterior la estequiometría aproximada del microconstituyente es:

$\beta\text{Al}_8\text{Si}_2\text{Fe}$, de acuerdo a lo reportado en la literatura [4].

El microconstituyente 2 (amarillo) presenta formas aciculares con ángulos, su color fue gris oscuro, la composición química se presenta en la tabla 5.14 y en las figuras 5.15 y 5.16 se muestra el espectro y la microestructura respectivamente.

Tabla 5.14. Composición química por EDS del microconstituyente 2 (amarillo) de la aleación A356-1%Cu-1%Mg-0.50%Ni.

| Elemento | Al | Si |
|-----------|-------|-------|
| % Peso | 11.62 | 88.38 |
| % Atómico | 12.03 | 87.97 |

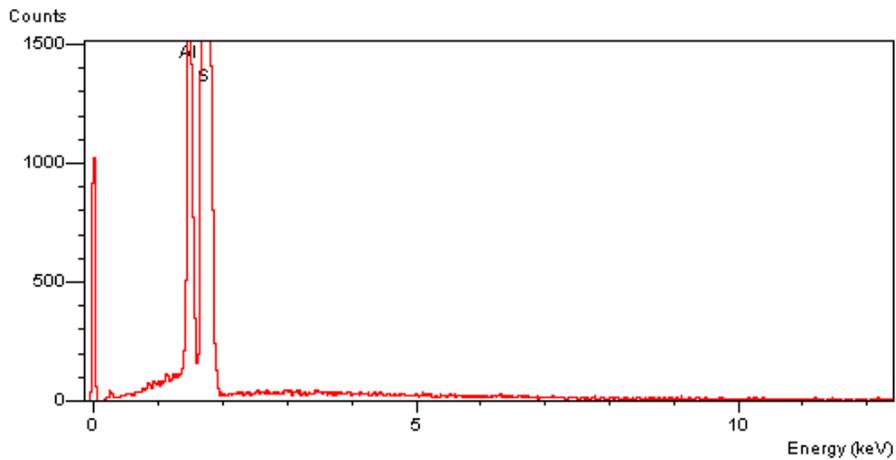


Figura 5. 15. Espectro del microconstituyente 2 (amarillo) de la aleación A356-1%Cu-1%Mg-0.50%Ni.

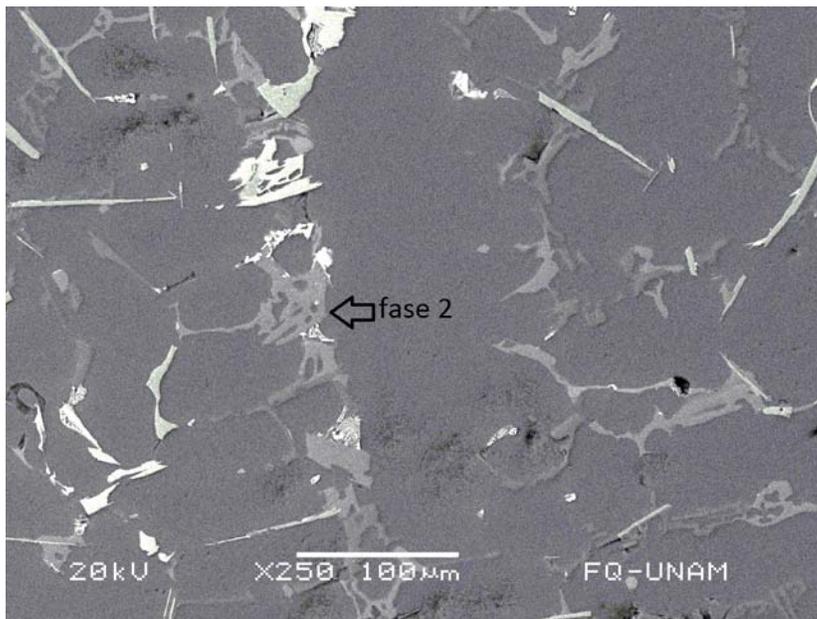


Figura 5.16. Análisis puntual del microconstituyente 2 (amarillo) en la aleación A356-1%Cu-1%Mg-0.50%Ni.

Este microconstituyente es **Silicio eutéctico**.

La fase 3 (verde) se observa de forma aislada y en menor proporción que las anteriores, presenta un color negro, la composición química experimental se muestra en la tabla 5.15. El espectro y la microestructura se observan en las figuras 5.17 y 5.18 respectivamente.

Tabla 5.15. Composición química por EDS del microconstituyente 3 (verde) de la aleación A356-1%Cu-2%Mg-0.50%Ni.

| Elemento | Al | Ni | Cu |
|-----------|-------|-------|-------|
| % Peso | 43.26 | 20.39 | 36.35 |
| % Atómico | 63.55 | 13.77 | 22.68 |

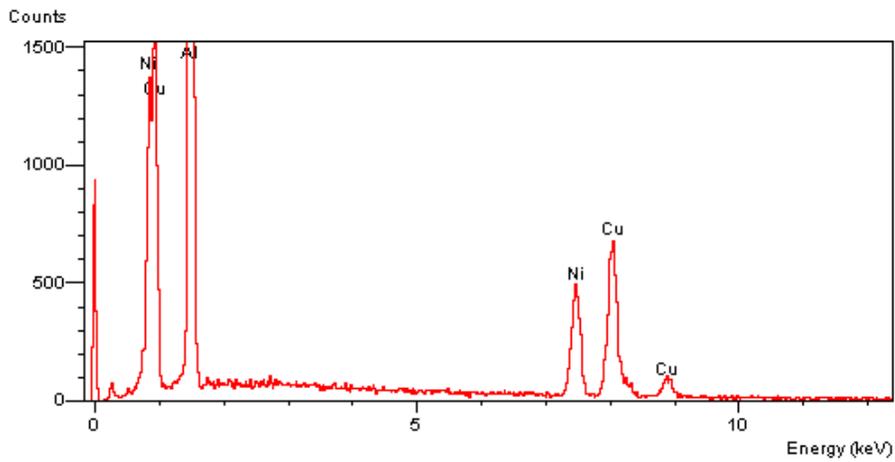


Figura 5.17. Espectro del microconstituyente 3 (verde) de la aleación A356-1%Cu-2%Mg-0.50%Ni.

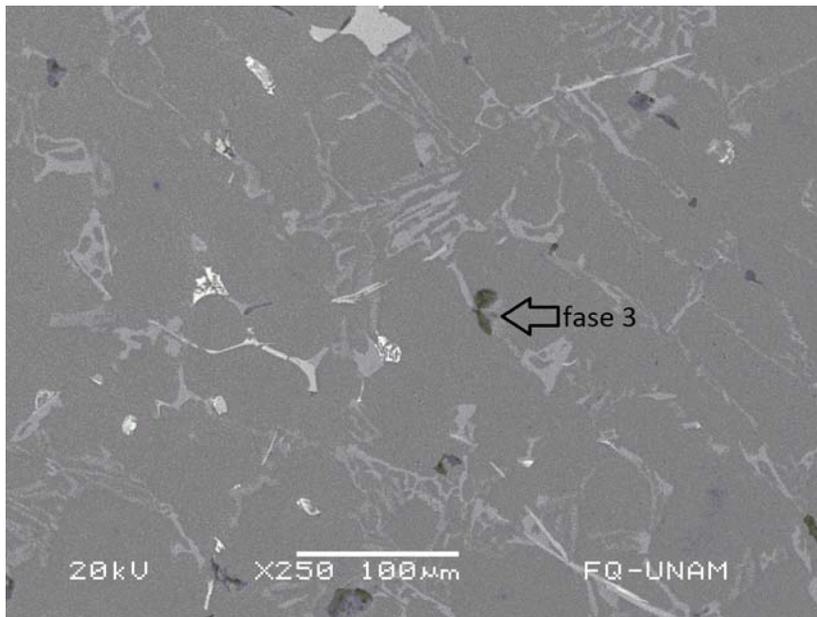


Figura 5.18. Análisis puntual del microconstituyente 3 (verde) en la aleación A356-1%Cu-2%Mg-0.50%Ni.

Por lo anterior la estequiometria aproximada del microconstituyente es:

Al₆Cu₃Ni, de acuerdo a lo reportado en la literatura [4].

El microconstituyente 4 (naranja) tiene una forma globular fina, que va desde 5 μm hasta los 20μm. su composición química (tabla 5.16), el espectro (Fig. 5.19) y microestructura (Fig. 5.20) se presentan a continuación:

Tabla 5.16. Composición química por EDS del microconstituyente 4 (naranja) de la aleación A356-1%Cu-1%Mg-0.50%Ni.

| Elemento | Al | Si | Cu | Ni | Mg | Cr |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| % Peso | 36.26 | 29.63 | 11.19 | 13.79 | 7.74 | 1.39 |
| % Atómico | 42.60 | 33.44 | 5.58 | 7.45 | 10.09 | 0.85 |

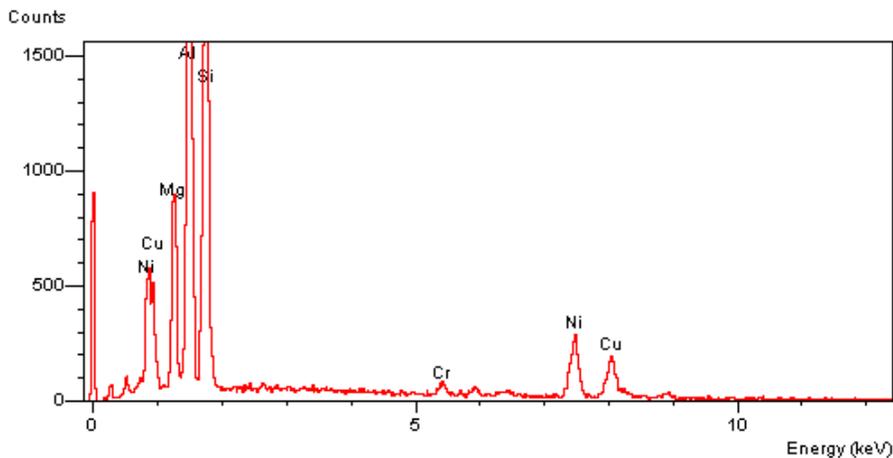


Figura 5.19. Espectro del microconstituyente 4 (naranja) de la aleación A356-1%Cu-1%Mg-0.50%Ni.

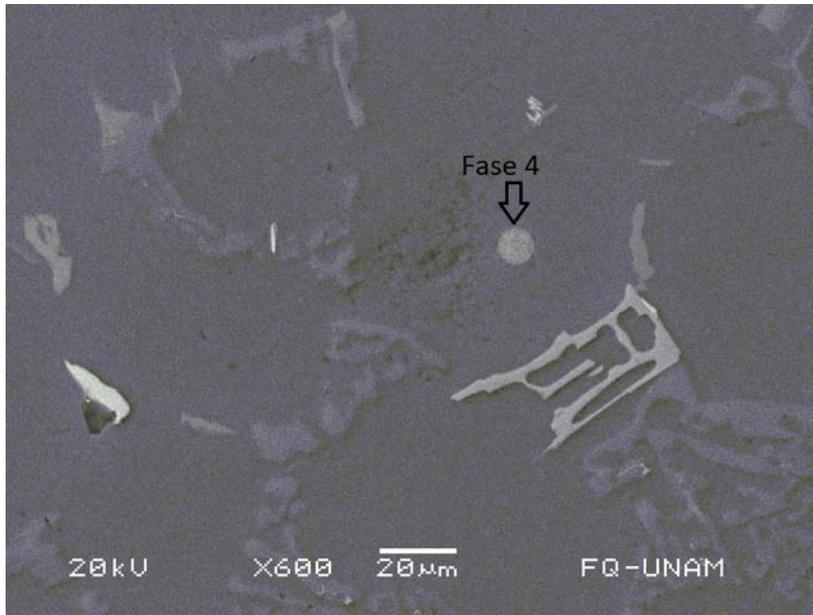


Figura. 5.20. Análisis puntual del microconstituyente 4 (naranja) en la aleación A356-1%Cu-1%Mg-0.50%Ni.

Por lo anterior la estequiometría aproximada del microconstituyente 4 (naranja) es: $\text{Al}_7\text{Si}_6\text{Mg}_2\text{NiCu}$.

5.4. Análisis de resultados

Este análisis de resultados está basado en la comparación de composiciones químicas y el porcentaje de cada microconstituyente presente en las aleaciones caracterizadas. En primer lugar se analizaron las aleaciones que no fueron modificadas, posteriormente se muestra el análisis de las aleaciones que se les realizó modificación y por último se muestra la comparación entre las aleaciones no modificadas y modificadas.

5.4.1 Aleaciones sin modificación

Al comparar las tablas 5.1 y 5.2 podemos notar que el contenido de níquel es el que varía entre estas dos aleaciones siendo mayor para la segunda aleación, por lo tanto si observamos los porcentajes presentes de microconstituyentes notamos que el microconstituyente $\text{Al}_6\text{Cu}_3\text{Ni}$ se encuentra en mayor proporción que para a la primera aleación y el microconstituyente $\text{Al}_7\text{Si}_6\text{Mg}_2\text{NiCu}$ ni

siquiera se presentó en la primera aleación. Esto era de esperarse debido a que estamos aumentando el contenido de níquel, por lo que hubo mayor cantidad de microconstituyentes de níquel en la segunda aleación.

El mismo comportamiento sucede con los siguientes pares de aleaciones (3 y 4, 5 y 6) ya que al aumentar el contenido de níquel de una aleación a otra, podremos observar que los microconstituyentes que contienen níquel en su estequiometría se encuentran en mayor proporción.

Si observamos los contenidos de los demás microconstituyentes en las tablas 5.1 y 5.2 podemos notar para el Si eutéctico la variación no es significativa puesto que tienen contenidos de silicio muy próximos, si observamos la composición química experimental notamos que el contenido de silicio es ligeramente menor en la primera aleación, de ahí que exista una menor cantidad de silicio eutéctico en esta.

Lo mismo sucede para el microconstituyente $\beta\text{Al}_8\text{Si}_2\text{Fe}$, debido a que hay una cantidad mayor de hierro y silicio en la segunda aleación.

Si comparamos las tablas 5.1 y 5.3, particularmente los contenidos de magnesio y el microconstituyente $\text{Al}_7\text{Si}_6\text{Mg}_2\text{NiCu}$, notamos que el contenido de magnesio es mayor para la aleación 3, por lo tanto la cantidad de este microconstituyente es mayor en esta aleación.

Ahora si observamos las tablas 5.3 y 5.4 notamos que los porcentajes del microconstituyente $\text{Al}_7\text{Si}_6\text{Mg}_2\text{NiCu}$ son casi idénticos, esto es debido a que los contenidos de magnesio son muy próximos. Ahora bien, si comparamos el microconstituyente $\text{Al}_6\text{Cu}_3\text{Ni}$, este se presentó en mayor proporción para la aleación 4 debido a que la cantidad de níquel es mayor para esta aleación.

Al comparar las tablas de 5.1 a 5.6 y en concreto el porcentaje del microconstituyente $\text{Al}_7\text{Si}_6\text{Mg}_2\text{NiCu}$ notamos que la cantidad de este aumenta con respecto a la aleación a la 6, debido a que el contenido de magnesio también fue en aumento. Y para el último par de aleaciones (5 y 6) el contenido de silicio eutéctico disminuyó significativamente, esto debido a que mientras el microconstituyente $\text{Al}_7\text{Si}_6\text{Mg}_2\text{NiCu}$ se estabiliza y está en mayor proporción necesita más silicio y lo está tomando del silicio eutéctico.

5.4.2 Aleaciones modificadas

Si comparamos las tablas 5.7 y 5.8 y el microconstituyente Al_6Cu_3Ni , notamos el mismo comportamiento que para las aleaciones no modificadas, al aumentar el contenido de níquel, este microconstituyente se encuentra en mayor proporción, lo mismo sucede con el par de aleaciones 5a y 6^a (reportadas en las tablas 5.11 y 5.12).

Pero si observamos las tablas 5.9 y 5.10 notamos que aquí el comportamiento del microconstituyente Al_6Cu_3Ni no se repite, los contenidos de este son idénticos a pesar de que para la segunda aleación (4a) tiene el doble de níquel que la anterior (3a). Esto se debe a que los microconstituyentes βAl_8Si_2Fe y Silicio eutéctico están en proporciones significativamente mayores, al precipitarse estas en grandes proporciones saturaron el espacio y el microconstituyente Al_6Cu_3Ni no puede terminar de nuclearse con todo el níquel disponible.

Para el silicio eutéctico no se aprecia ninguna tendencia en porcentaje precipitado, debido a que el contenido de silicio no es fijo y varía indistintamente de aleación a aleación, si observamos las tablas de la 5.7 a la 5.12, aunque el valor nominal está en 7% de silicio sabemos que experimentalmente es imposible tener los valores exactos en composición de elementos aleantes, además de que existe un rango de composiciones permitido, y las aleaciones obtenidas experimentalmente están en el rango permitido para la aleación A356.

Lo mismo ocurre con el microconstituyente βAl_8Si_2Fe , tampoco se aprecia una tendencia con el porcentaje de precipitados y el contenido de elementos aleantes si revisamos las tablas de la 5.7 a la 5.12 vemos que el contenido de hierro es muy similar para todas las aleaciones. De modo que esta falta de tendencia se explica de la misma forma que para el silicio eutéctico.

Si observamos las figuras 5.7a a 5.12a y comparamos el patrón de modificación del apéndice I podemos notar que las estructuras están ligeramente modificadas, por lo que la cantidad de estroncio añadida no fue la suficiente para lograr una modificación suficiente, todavía podemos observar algunas partículas aciculares de silicio eutéctico.

5.4.3 Comparación entre aleaciones no modificadas y modificadas

En primer lugar se notar es que el microconstituyente $\text{Al}_7\text{Si}_6\text{Mg}_2\text{NiCu}$ no se precipitó en las aleaciones modificadas, esto sucede debido a que el estroncio actúa como desestabilizador de este. Entonces al modificar al silicio eutéctico no es posible que este microconstituyente precipite.

Ahora si comparamos las tablas 5.1 con la 5.7 notamos que las composiciones químicas son muy próximas entre sí, pero si observamos los porcentajes de microconstituyentes podemos notar que no se parecen en absoluto, a pesar de tener composición química prácticamente igual. Esto se debe a que el estroncio al modificar al silicio eutéctico cambia completamente la cinética de nucleación y no se precipitan de la misma forma los microconstituyentes. También notamos que las cantidades precipitadas son menores en las aleaciones modificadas a las no modificadas.

Capítulo VI. Conclusiones

En este capítulo se presentan las conclusiones de la presente tesis:

- Al aumentar el contenido de níquel en las aleaciones, los microconstituyentes que contienen este elemento aumentan su fracción, tal es el caso $\text{Al}_6\text{Cu}_3\text{Ni}$ y $\text{Al}_7\text{Si}_6\text{Mg}_2\text{NiCu}$.
- Al aumentar el contenido de magnesio en las aleaciones aumentó el porcentaje de microconstituyente $\text{Al}_7\text{Si}_6\text{Mg}_2\text{NiCu}$.
- Una fracción elevada del microconstituyente $\text{Al}_7\text{Si}_6\text{Mg}_2\text{NiCu}$ consume el silicio que precipita en la mezcla eutéctica (Al-Si), provocando la formación de una menor cantidad de silicio eutéctico.
- El microconstituyente $\text{Al}_7\text{Si}_6\text{Mg}_2\text{NiCu}$ no se precipitó en las aleaciones modificadas. El estroncio actuó como inhibidor para la formación de este microconstituyente.
- Las microestructuras de todas las aleaciones modificadas están ligeramente modificadas, lo que indica que el contenido de estroncio para lograr una buena modificación fue insuficiente.
- La presencia de hierro como elemento indeseable en las aleaciones estudiadas promueve la formación del microconstituyente $\beta\text{Al}_8\text{Si}_2\text{Fe}$, al aumentar la concentración de hierro aumenta la fracción de este microconstituyente.
- En relación a la técnica de evaluación cuantitativa de los microconstituyentes esta no es tan efectiva, debido a las limitaciones de contraste del equipo.
- Para alcanzar resultados óptimos la técnica desarrollada se debe completar con procesamiento de imágenes vía Photoshop.

BIBLIOGRAFÍA

- ASM Specialty Handbook “Aluminium and Aluminium Alloys”, Edited by J.R. Davis, ASM International, 1994, pp 88-96, 530-535.
- ASM International “Aluminium, Properties and Physical Metallurgy”, Edited by John E. Hatch, 1990, pp 45-50.
- Metals Handbook Ninth Edition vol. 9, “Metallography and Microstructures”, pp 70-74.
- The American foundrymens society inc. “Aluminum casting technology” Des plaines, Illinois (1994).
- S.D. McDonald, A.K. Dahle, J.A. Taylor, D.H. StJohn, J.W. Zindel; “Microstructural Evolution of an Al-Si-Mg foundry Alloy During Solidification.”
- Z. Li, A. M. Samuel, F. H. Samuel, C. Ravindram, S. Valtierra, “Effect of alloying elements on the segregation and dissolution of CuAl_2 phase in Al-Si-Cu 319 alloys”, Journal Of Materials Science 38, 2003, pp 1203 – 1218.
- Heng Qiang Ye, “Recent developments in high temperature intermetallics research in China”, Intermetallics 8, 2000, pp 503-509.
- L. Liu, A. M. Samule, F. H. Samuel, H. W. Doty, S. Valtierra, “Characteristics of α -dendritic and eutectic structures in Sr-treated Al Si casting alloys”, Journal Of Materials Science 39, 2004, pp 215– 224.
- F.H. Samuel, P. Ouellet, A.M. Samuel, H.W. Doty, “Effect of Mg and Sr Additons on the Formation of Intermetallics in Al-6 Wt Pct Si-3.5 Wt Pct Cu-(0.45) to (0.8) Wt Pct Fe 319-Type Alloys”, Metallurgical and Materials Transactions, Dec. 1998, pp 2871-2884.
- N.C.W. Kuijpers, F.J. Vermolen, C. Vuik, P.T.G. Koenis, K.E. Nilsen, S. van der Zwaag, “The dependence of the β -AlFeSi to α -Al(FeMn)Si transformation kinetics in Al–Mg–Si alloys on the alloying elements”, Materials Science and Engineering A 394, 2005, pp 9–19.
- R. Das Gupta, C.G. Brown and S. Marek; “Analysis of Overmodified 356 Aluminum Alloy”, AFS Transactions, vol 38, 1988, pp 297-310.

- G. Chai and L. Bäckerud; “Factors Affecting Modification of Al-Si Alloys by Adding Sr-Containing Master Alloys”, AFS Transactions, vol 194, 1992, pp 847-854.
- G.K. Sigworth; “Theoretical and Practical Aspects of the Modification of Al-Si Alloys”, AFS Transactions, vol 66, 1983, pp 7-16.
- F. Paray and J.E. Gruzleski; “Factors to Consider in Modification”, AFS Transactions, vol 115, 1994, pp. 833-842.
- M.B Djurdjevic. W. Kasprzak, C.A. Kierkus, W.T. Kierkus and J.H. Sokolowski; “Quantification of Cu Enriched Phases in Synthetic 3XX Aluminum Alloys Using the Thermal Analysis Technique”, AFS Transactions 01-089, pp 1 – 12.
- Liao Hengcheng, Sun Guoxing; “Restraining effect of strontium on the Crystallization of Mg₂Si Phase During Solidification in Al-Si-Mg Casting Alloys and Mechanisms”, Materials Science and Engineering A358, 2003, pp 164-70.

REFERENCIAS

- [1] F.H. Samuel, P. Ouellet, A.M. Samuel, H.W. Doty, “Effect of Mg and Sr Additions on the Formation of Intermetallics in Al-6 Wt Pct Si-3.5 Wt Pct Cu-(0.45) to (0.8) Wt Pct Fe 319-Type Alloys”, Metallurgical and Materials Transactions, Dec. 1998, pp 2871-2884.
- [2] Z. Li, A. M. Samuel, F. H. Samuel, C. Ravindram, S. Valtierra, “Effect of alloying elements on the segregation and dissolution of CuAl₂ phase in Al-Si-Cu 319 alloys”, Journal Of Materials Science 38, 2003, pp 1203 – 1218.
- [3] Heng Qiang Ye, “Recent developments in high temperature intermetallics research in China”, Intermetallics 8, 2000, pp 503-509.
- [4] Metals Handbook Ninth Edition vol. 9, “Metallography and Microstructures”, pp 1691.

APENDICE I

Composición y designación de algunas aleaciones de colada para aleaciones base aluminio

| Alloy | Products(a) | Composition, %(b) | | | | | | | | | | Others | |
|--------|-------------|-------------------|--------|----------|-----------|-----------|-----------|----------|---------|------|--------------|---------|-------|
| | | Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Cr | Ni | Zn | Sn | Ti | Each | Total |
| 201.1 | S | 0.10 | 0.15 | 4.0-5.2 | 0.20-0.50 | 0.15-0.55 | ... | ... | ... | ... | 0.15-0.35 | 0.05(c) | 0.10 |
| A201.0 | S | 0.05 | 0.10 | 4.0-5.0 | 0.20-0.40 | 0.15-0.35 | ... | ... | ... | ... | 0.15-0.35 | 0.03(c) | 0.10 |
| B201.0 | S | 0.05 | 0.05 | 4.5-5.0 | 0.20-0.50 | 0.25-0.35 | ... | ... | ... | ... | 0.15-0.35 | 0.05(d) | 0.15 |
| 202.0 | S | 0.10 | 0.15 | 4.0-5.2 | 0.20-0.8 | 0.15-0.55 | 0.20-0.6 | ... | ... | ... | 0.15-0.35 | 0.05(c) | 0.10 |
| 203.0 | S | 0.30 | 0.50 | 4.5-5.5 | 0.20-0.30 | 0.10 | ... | 1.3-1.7 | ... | ... | 0.15-0.25(e) | 0.05(f) | 0.20 |
| 204.0 | S, P | 0.20 | 0.35 | 4.2-5.0 | 0.10 | 0.15-0.35 | ... | 0.05 | 0.10 | 0.05 | 0.15-0.30 | 0.05 | 0.15 |
| 206.0 | S, P | 0.10 | 0.15 | 4.2-5.0 | 0.20-0.50 | 0.15-0.35 | ... | 0.05 | 0.10 | 0.05 | 0.15-0.30 | 0.05 | 0.15 |
| A206.0 | S, P | 0.05 | 0.10 | 4.2-5.0 | 0.20-0.50 | 0.15-0.35 | ... | 0.05 | 0.10 | 0.05 | 0.15-0.30 | 0.05 | 0.15 |
| 208.0 | S, P | 2.5-3.5 | 1.2 | 3.5-4.5 | 0.50 | 0.10 | ... | 0.35 | 1.0 | ... | 0.25 | ... | 0.50 |
| 213.0 | S, P | 1.0-3.0 | 1.2 | 6.0-8.0 | 0.6 | 0.10 | ... | 0.35 | 2.5 | ... | 0.25 | ... | 0.50 |
| 222.0 | S, P | 2.0 | 1.5 | 9.2-10.7 | 0.50 | 0.15-0.35 | ... | 0.50 | 0.8 | ... | 0.25 | ... | 0.35 |
| 224.0 | S, P | 0.06 | 0.10 | 4.5-5.5 | 0.20-0.50 | ... | ... | ... | ... | ... | 0.35 | 0.03(g) | 0.10 |
| 238.0 | P | 3.5-4.5 | 1.5 | 9.0-11.0 | 0.6 | 0.15-0.35 | ... | 1.0 | 1.5 | ... | 0.25 | ... | 0.50 |
| 240.0 | S | 0.50 | 0.50 | 7.0-9.0 | 0.30-0.7 | 5.5-6.5 | ... | 0.30-0.7 | 0.10 | ... | 0.20 | 0.05 | 0.15 |
| 240.0 | S, P | 0.7 | 1.0 | 3.5-4.5 | 0.35 | 1.2-1.8 | 0.25 | 1.7-2.3 | 0.35 | ... | 0.25 | 0.05 | 0.15 |
| 240.0 | S | 0.6 | 0.8 | 3.7-4.5 | 0.10 | 1.2-1.7 | 0.15-0.25 | 1.8-2.3 | 0.10 | ... | 0.07-0.20 | 0.05 | 0.15 |
| 240.0 | S | 0.35 | 0.40 | 3.5-4.5 | 0.15-0.45 | 1.8-2.3 | 0.20-0.40 | 1.9-2.3 | 0.05 | ... | 0.06-0.20 | 0.05(h) | 0.15 |
| 249.0 | P | 0.05 | 0.10 | 3.8-4.6 | 0.25-0.50 | 0.25-0.50 | ... | ... | 2.5-3.5 | ... | 0.02-0.35 | 0.03 | 0.10 |
| 295.0 | S | 0.7-1.5 | 1.0 | 4.0-5.0 | 0.35 | 0.03 | ... | ... | 0.35 | ... | 0.25 | 0.05 | 0.15 |
| 296.0 | P | 2.0-3.0 | 1.2 | 4.0-5.0 | 0.35 | 0.05 | ... | 0.35 | 0.50 | ... | 0.25 | ... | 0.35 |
| 305.0 | S, P | 4.5-5.5 | 0.6 | 1.0-1.5 | 0.50 | 0.10 | 0.25 | ... | 0.35 | ... | 0.25 | 0.05 | 0.15 |
| A305.0 | S, P | 4.5-5.5 | 0.20 | 1.0-1.5 | 0.10 | 0.10 | ... | ... | 0.10 | ... | 0.20 | 0.05 | 0.15 |
| 308.0 | S, P | 5.0-6.0 | 1.0 | 4.0-5.0 | 0.50 | 0.10 | ... | ... | 1.0 | ... | 0.25 | ... | 0.50 |
| 319.0 | S, P | 5.5-6.5 | 1.0 | 3.0-4.0 | 0.50 | 0.10 | ... | 0.35 | 1.0 | ... | 0.25 | ... | 0.50 |
| A319.0 | S, P | 5.5-6.5 | 1.0 | 3.0-4.0 | 0.50 | 0.10 | ... | 0.35 | 3.0 | ... | 0.25 | ... | 0.50 |
| B319.0 | S, P | 5.5-6.5 | 1.2 | 3.0-4.0 | 0.8 | 0.10-0.50 | ... | 0.50 | 1.0 | ... | 0.25 | ... | 0.50 |
| 320.0 | S, P | 5.0-8.0 | 1.2 | 2.0-4.0 | 0.8 | 0.05-0.6 | ... | 0.35 | 3.0 | ... | 0.25 | ... | 0.50 |
| 324.0 | P | 7.0-8.0 | 1.2 | 0.40-0.6 | 0.50 | 0.40-0.7 | ... | 0.30 | 1.0 | ... | 0.20 | 0.15 | 0.20 |
| 328.0 | S | 7.5-8.5 | 1.0 | 1.0-2.0 | 0.20-0.6 | 0.20-0.6 | 0.35 | 0.25 | 1.5 | ... | 0.20-0.6 | ... | 0.50 |
| 332.0 | P | 8.5-10.5 | 1.2 | 2.0-4.0 | 0.50 | 0.50-1.5 | ... | 0.50 | 1.0 | ... | 0.25 | ... | 0.50 |
| 333.0 | P | 8.0-10.0 | 1.0 | 3.0-4.0 | 0.50 | 0.05-0.50 | ... | 0.50 | 1.0 | ... | 0.25 | ... | 0.50 |
| A333.0 | P | 8.0-10.0 | 1.0 | 3.0-4.0 | 0.50 | 0.05-0.50 | ... | 0.50 | 3.0 | ... | 0.25 | ... | 0.50 |
| 336.0 | P | 11.0-13.0 | 1.2 | 0.50-1.5 | 0.35 | 0.7-1.3 | ... | 2.0-3.0 | 0.35 | ... | 0.25 | 0.05 | ... |
| 339.0 | P | 11.0-13.0 | 1.2 | 1.5-3.0 | 0.50 | 0.50-1.5 | ... | 0.50-1.5 | 1.0 | ... | 0.25 | ... | 0.50 |
| 343.0 | D | 6.7-7.7 | 1.2 | 0.50-0.9 | 0.50 | 0.10 | 0.10 | ... | 1.2-2.0 | 0.50 | ... | 0.10 | 0.35 |
| 354.0 | P | 8.6-9.4 | 0.20 | 1.6-2.0 | 0.10 | 0.40-0.6 | ... | ... | 0.10 | ... | 0.20 | 0.05 | 0.15 |
| 355.0 | S, P | 4.5-5.5 | 0.6(i) | 1.0-1.5 | 0.50(i) | 0.40-0.6 | 0.25 | ... | 0.35 | ... | 0.25 | 0.05 | 0.15 |
| A355.0 | S, P | 4.5-5.5 | 0.09 | 1.0-1.5 | 0.05 | 0.45-0.6 | ... | ... | 0.05 | ... | 0.04-0.20 | 0.05 | 0.15 |
| C355.0 | S, P | 4.5-5.5 | 0.20 | 1.0-1.5 | 0.10 | 0.40-0.6 | ... | ... | 0.10 | ... | 0.20 | 0.05 | 0.15 |
| 356.0 | S, P | 6.5-7.5 | 0.6(i) | 0.25 | 0.35(i) | 0.20-0.45 | ... | ... | 0.35 | ... | 0.25 | 0.05 | 0.15 |
| A356.0 | S, P | 6.5-7.5 | 0.20 | 0.20 | 0.10 | 0.25-0.45 | ... | ... | 0.10 | ... | 0.20 | 0.05 | 0.15 |
| B356.0 | S, P | 6.5-7.5 | 0.09 | 0.05 | 0.05 | 0.25-0.45 | ... | ... | 0.05 | ... | 0.04-0.20 | 0.05 | 0.15 |
| C356.0 | S, P | 6.5-7.5 | 0.07 | 0.05 | 0.05 | 0.25-0.45 | ... | ... | 0.05 | ... | 0.04-0.20 | 0.05 | 0.15 |
| F356.0 | S, P | 6.5-7.5 | 0.20 | 0.20 | 0.10 | 0.17-0.25 | ... | ... | 0.10 | ... | 0.04-0.20 | 0.05 | 0.15 |
| 357.0 | S, P | 6.5-7.5 | 0.15 | 0.05 | 0.03 | 0.45-0.6 | ... | ... | 0.05 | ... | 0.20 | 0.05 | 0.15 |
| 357.0 | S, P | 6.5-7.5 | 0.20 | 0.20 | 0.10 | 0.40-0.7 | ... | ... | 0.10 | ... | 0.04-0.20 | 0.05(j) | 0.15 |
| 357.0 | S, P | 6.5-7.5 | 0.09 | 0.05 | 0.05 | 0.40-0.6 | ... | ... | 0.05 | ... | 0.04-0.20 | 0.05 | 0.15 |
| 357.0 | S, P | 6.5-7.5 | 0.09 | 0.05 | 0.05 | 0.45-0.7 | ... | ... | 0.05 | ... | 0.04-0.20 | 0.05(j) | 0.15 |
| D357.0 | S | 6.5-7.5 | 0.20 | ... | 0.10 | 0.55-0.6 | ... | ... | ... | ... | 0.10-0.20 | 0.05(j) | 0.15 |
| 358.0 | S, P | 7.6-8.6 | 0.30 | 0.20 | 0.20 | 0.40-0.6 | 0.20 | ... | 0.20 | ... | 0.10-0.20 | 0.05(k) | 0.15 |
| 359.0 | S, P | 8.5-9.5 | 0.20 | 0.20 | 0.10 | 0.50-0.7 | ... | ... | 0.10 | ... | 0.20 | 0.05 | 0.15 |
| 360.0 | D | 9.0-10.0 | 2.0 | 0.6 | 0.35 | 0.40-0.6 | ... | 0.50 | 0.50 | 0.15 | ... | ... | 0.25 |

(continued)

(a) D, die casting; P, permanent mold; S, sand. Other products may pertain to the composition but are not listed. (b) Weight percent; maximum unless range is given or otherwise indicated. All compositions contain balance of aluminum. (c) 0.40-1.0 Ag. (d) 0.50-1.0 Ag. (e) 0.50 max Ti + Zr. (f) 0.20-0.30 Sb, 0.20-0.30 Co, 0.10-0.30 Zr. (g) 0.05-0.15 V, 0.10-0.25 Zr. (h) 0.06-0.20 V. (i) If iron exceeds 0.45%, manganese content shall not be less than one-half of iron content. (j) 0.04-0.07 Be. (k) 0.10-0.30 Be. (l) 0.8 max Mn + Cr. (m) 0.25 max Pb. (n) 0.02-0.04 Be. (o) 0.08-0.15 V. (p) 0.10 max Pb. (q) 0.003-0.007 Be. 0.005 max B. Source: Ref 1

Table 1 (continued)

| Alloy | Products(a) | Composition, % (b) | | | | | | | | | | | Others | |
|--------|-------------|--------------------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------|---------|-----------|---------|--------|--|
| | | Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Cr | Ni | Zn | Sn | Ti | Each | Total | |
| A360.0 | D | 9.0-10.0 | 1.3 | 0.6 | 0.35 | 0.40-0.6 | --- | 0.50 | 0.50 | 0.15 | --- | --- | 0.25 | |
| 361.0 | D | 9.5-10.5 | 1.1 | 0.50 | 0.25 | 0.40-0.6 | 0.20-0.30 | 0.20-0.30 | 0.50 | 0.10 | 0.20 | 0.05 | 0.15 | |
| 363.0 | S, P | 4.5-6.0 | 1.1 | 2.5-3.5 | (l) | 0.15-0.40 | (l) | 0.25 | 3.0-4.5 | 0.25 | 0.20 | (m) | 0.30 | |
| 364.0 | D | 7.5-9.5 | 1.5 | 0.20 | 0.10 | 0.20-0.40 | 0.25-0.50 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | --- | 0.05(n) | 0.15 | |
| 369.0 | D | 11.0-12.0 | 1.3 | 0.50 | 0.35 | 0.25-0.45 | 0.30-0.40 | 0.05 | 1.0 | 0.10 | --- | 0.05 | 0.15 | |
| 380.0 | D | 7.5-9.5 | 2.0 | 3.0-4.0 | 0.50 | 0.10 | --- | 0.50 | 3.0 | 0.35 | --- | --- | 0.50 | |
| A380.0 | D | 7.5-9.5 | 1.3 | 3.0-4.0 | 0.50 | 0.10 | --- | 0.50 | 3.0 | 0.35 | --- | --- | 0.50 | |
| B380.0 | D | 7.5-9.5 | 1.3 | 3.0-4.0 | 0.50 | 0.10 | --- | 0.50 | 1.0 | 0.35 | --- | --- | 0.50 | |
| 383.0 | D | 9.5-11.5 | 1.3 | 2.0-3.0 | 0.50 | 0.10 | --- | 0.30 | 3.0 | 0.15 | --- | --- | 0.50 | |
| 384.0 | D | 10.5-12.0 | 1.3 | 3.0-4.5 | 0.50 | 0.10 | --- | 0.50 | 3.0 | 0.35 | --- | --- | 0.50 | |
| A384.0 | D | 10.5-12.0 | 1.3 | 3.0-4.5 | 0.50 | 0.10 | --- | 0.50 | 1.0 | 0.35 | --- | --- | 0.50 | |
| 385.0 | D | 11.0-13.0 | 2.0 | 2.0-4.0 | 0.50 | 0.30 | --- | 0.50 | 3.0 | 0.30 | --- | --- | 0.50 | |
| 390.0 | D | 16.0-18.0 | 1.3 | 4.0-5.0 | 0.10 | 0.45-0.65 | --- | --- | 0.10 | --- | 0.20 | 0.10 | 0.20 | |
| A390.0 | S, P | 16.0-18.0 | 0.50 | 4.0-5.0 | 0.10 | 0.45-0.65 | --- | --- | 0.10 | --- | 0.20 | 0.10 | 0.20 | |
| B390.0 | D | 16.0-18.0 | 1.3 | 4.0-5.0 | 0.50 | 0.45-0.65 | --- | 0.10 | 1.5 | --- | 0.20 | 0.10 | 0.20 | |
| 392.0 | D | 18.0-20.0 | 1.5 | 0.40-0.8 | 0.20-0.6 | 0.8-1.2 | --- | 0.50 | 0.50 | 0.30 | 0.20 | 0.15 | 0.50 | |
| 393.0 | S, P, D | 21.0-23.0 | 1.3 | 0.7-1.1 | 0.10 | 0.7-1.3 | --- | 2.0-2.5 | 0.10 | --- | 0.10-0.20 | 0.05(o) | 0.15 | |
| 413.0 | D | 11.0-13.0 | 2.0 | 1.0 | 0.35 | 0.10 | --- | 0.50 | 0.50 | 0.15 | --- | --- | 0.25 | |
| A413.0 | D | 11.0-13.0 | 1.3 | 1.0 | 0.35 | 0.10 | --- | 0.50 | 0.50 | 0.15 | --- | --- | 0.25 | |
| B413.0 | S, P | 11.0-13.0 | 0.50 | 0.10 | 0.35 | 0.05 | --- | 0.05 | 0.10 | --- | 0.25 | 0.05 | 0.20 | |
| 443.0 | S, P | 4.5-6.0 | 0.8 | 0.6 | 0.50 | 0.05 | 0.25 | --- | 0.50 | --- | 0.25 | --- | 0.35 | |
| A443.0 | S | 4.5-6.0 | 0.8 | 0.30 | 0.50 | 0.05 | 0.25 | --- | 0.50 | --- | 0.25 | --- | 0.35 | |
| B443.0 | S, P | 4.5-6.0 | 0.8 | 0.15 | 0.35 | 0.05 | --- | --- | 0.35 | --- | 0.25 | 0.05 | 0.15 | |
| C443.0 | D | 4.5-6.0 | 2.0 | 0.6 | 0.35 | 0.10 | --- | 0.50 | 0.50 | 0.15 | --- | --- | 0.25 | |
| 444.0 | S, P | 6.5-7.5 | 0.6 | 0.25 | 0.35 | 0.10 | --- | --- | 0.35 | --- | 0.25 | 0.05 | 0.15 | |
| A444.0 | P | 6.5-7.5 | 0.20 | 0.10 | 0.10 | 0.05 | --- | --- | 0.10 | --- | 0.20 | 0.05 | 0.15 | |
| 511.0 | S | 0.30-0.7 | 0.50 | 0.15 | 0.35 | 3.5-4.5 | --- | --- | 0.15 | --- | 0.25 | 0.05 | 0.15 | |
| 512.0 | S | 1.4-2.2 | 0.6 | 0.35 | 0.8 | 3.5-4.5 | 0.25 | --- | 0.35 | --- | 0.25 | 0.05 | 0.15 | |
| 513.0 | P | 0.30 | 0.40 | 0.10 | 0.30 | 3.5-4.5 | --- | --- | 1.4-2.2 | --- | 0.20 | 0.05 | 0.15 | |
| 514.0 | S | 0.35 | 0.50 | 0.15 | 0.35 | 3.5-4.5 | --- | --- | 0.15 | --- | 0.25 | 0.05 | 0.15 | |
| 515.0 | D | 0.50-1.0 | 1.3 | 0.20 | 0.40-0.6 | 2.5-4.0 | --- | --- | 0.10 | --- | --- | 0.05 | 0.15 | |
| 516.0 | D | 0.30-1.5 | 0.35-1.0 | 0.30 | 0.15-0.40 | 2.5-4.5 | --- | 0.25-0.04 | 0.20 | 0.10 | 0.10-0.20 | 0.05(p) | --- | |
| 518.0 | D | 0.35 | 1.8 | 0.25 | 0.35 | 7.5-8.5 | --- | 0.15 | 0.15 | 0.15 | --- | --- | 0.25 | |
| 520.0 | S | 0.25 | 0.30 | 0.25 | 0.15 | 9.5-10.6 | --- | --- | 0.15 | --- | 0.25 | 0.05 | 0.15 | |
| 535.0 | S | 0.15 | 0.15 | 0.05 | 0.10-0.25 | 6.2-7.5 | --- | --- | --- | --- | 0.10-0.25 | 0.05(q) | 0.15 | |
| A535.0 | S | 0.20 | 0.20 | 0.10 | 0.10-0.25 | 6.5-7.5 | --- | --- | --- | --- | 0.25 | 0.05 | 0.15 | |
| B535.0 | S | 0.15 | 0.15 | 0.10 | 0.05 | 6.5-7.5 | --- | --- | --- | --- | 0.10-0.25 | 0.05 | 0.15 | |
| 705.0 | S, P | 0.20 | 0.8 | 0.20 | 0.40-0.6 | 1.4-1.8 | 0.20-0.40 | --- | 2.7-3.3 | --- | 0.25 | 0.05 | 0.15 | |
| 707.0 | S, P | 0.20 | 0.8 | 0.20 | 0.40-0.6 | 1.8-2.4 | 0.20-0.40 | --- | 4.0-4.5 | --- | 0.25 | 0.05 | 0.15 | |
| 710.0 | S | 0.15 | 0.50 | 0.35-0.65 | 0.05 | 0.6-0.8 | --- | --- | 6.0-7.0 | --- | 0.25 | 0.05 | 0.15 | |
| 711.0 | P | 0.30 | 0.7-1.4 | 0.35-0.65 | 0.05 | 0.25-0.45 | --- | --- | 6.0-7.0 | --- | 0.20 | 0.05 | 0.15 | |
| 712.0 | S | 0.30 | 0.50 | 0.25 | 0.10 | 0.50-0.65 | 0.40-0.6 | --- | 5.0-6.5 | --- | 0.15-0.25 | 0.05 | 0.20 | |
| 713.0 | S, P | 0.25 | 1.1 | 0.40-1.0 | 0.6 | 0.20-0.50 | 0.35 | 0.15 | 7.0-8.0 | --- | 0.25 | 0.10 | 0.25 | |
| 771.0 | S | 0.15 | 0.15 | 0.10 | 0.10 | 0.8-1.0 | 0.06-0.20 | --- | 6.5-7.5 | --- | 0.10-0.20 | 0.05 | 0.15 | |
| 772.0 | S | 0.15 | 0.15 | 0.10 | 0.10 | 0.6-0.8 | 0.06-0.20 | --- | 6.0-7.0 | --- | 0.10-0.20 | 0.05 | 0.15 | |
| 850.0 | S, P | 0.7 | 0.7 | 0.7-1.3 | 0.10 | 0.10 | --- | 0.7-1.3 | --- | 5.5-7.0 | 0.20 | --- | 0.30 | |
| 851.0 | S, P | 2.0-3.0 | 0.7 | 0.7-1.3 | 0.10 | 0.10 | --- | 0.30-0.7 | --- | 5.5-7.0 | 0.20 | --- | 0.30 | |
| 852.0 | S, P | 0.40 | 0.7 | 1.7-2.3 | 0.10 | 0.6-0.9 | --- | 0.9-1.5 | --- | 5.5-7.0 | 0.20 | --- | 0.30 | |
| 853.0 | S, P | 5.5-6.5 | 0.7 | 3.0-4.0 | 0.50 | --- | --- | --- | --- | 5.5-7.0 | 0.20 | --- | 0.30 | |

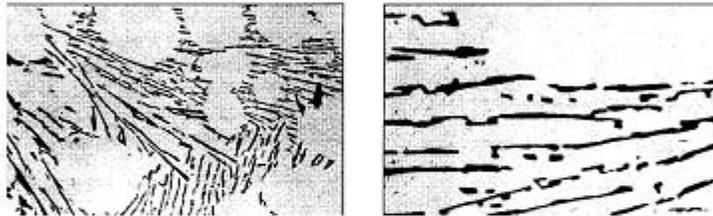
(a) D, die casting; P, permanent mold; S, sand. Other products may pertain to the composition but are not listed. (b) Weight percent, maximum unless range is given or otherwise indicated. All compositions contain balance of aluminum. (c) 0.40-1.0 Ag. (d) 0.50-1.0 Ag. (e) 0.50 max Ti + Zr. (f) 0.20-0.30 Sb. 0.20-0.30 Co. 0.10-0.30 Zr. (g) 0.05-0.15 V. 0.10-0.25 Zr. (h) 0.06-0.20 V. (i) If iron exceeds 0.45%, manganese content shall not be less than one-half of iron content. (j) 0.04-0.07 Be. (k) 0.10-0.30 Be. (l) 0.8 max Mn + Cr. (m) 0.25 max Pb. (n) 0.02-0.04 Be. (o) 0.08-0.15 V. (p) 0.10 max Pb. (q) 0.003-0.007 Be. 0.005 max B. Source: Ref 1

Patrón de modificación

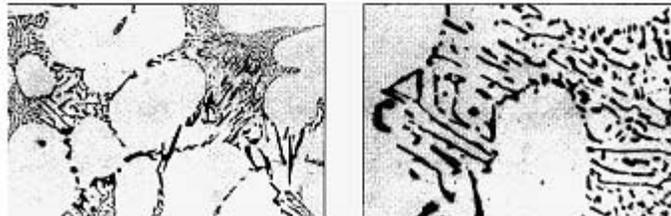
Diferentes clases o niveles de modificación asociados a diferentes morfologías del silicio eutéctico. Para el caso de aleaciones Al-Si hipoeutécticas, las microestructuras son mostradas en las imágenes siguientes.



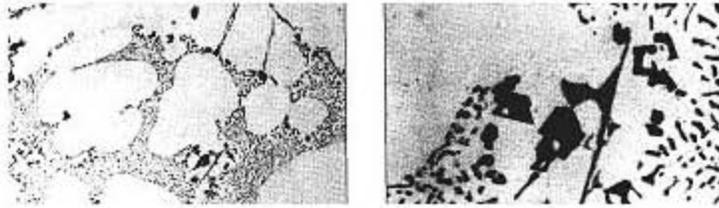
Clase 1: Estructura sin modificar. El silicio está presente como láminas largas, gruesas y de forma acicular.



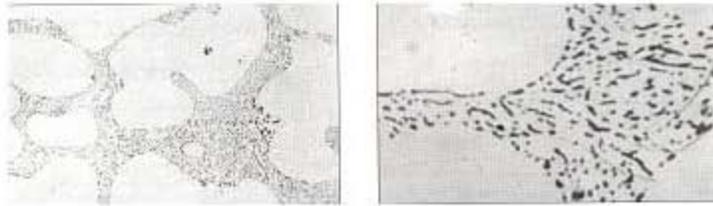
Clase 2: Estructura mal modificada. El silicio está presente en su mayoría en forma de láminas finas y también de forma acicular.



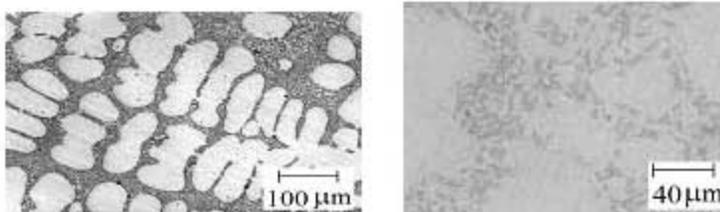
Clase 3: Estructura ligeramente modificada. La estructura laminar empieza a romperse en pequeñas partes, aunque todavía existen algunas estructuras aciculares.



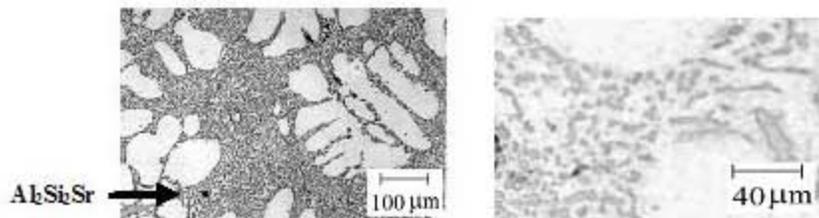
Clase 4: Estructura suficientemente modificada. La estructura laminar se ha fracturado completamente, pero pequeñas cantidades de fase acicular permanecen.



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



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



Clase 7: Estructura sobremodificada. El silicio está presente como una mezcla de partículas gruesas y finas y partículas de Al_2Si_2Sr .

APENDICE II

Ejemplos para la identificación de los microconstituyentes más comunes en aleaciones de aluminio comerciales

| Morfología | Fase | Color de precipitados bajo Microscopio óptico | Identificación | |
|-----------------|--|---|-------------------------------|----------------------------|
| | | | Birefringes | Otros métodos |
| Agujas | β -AlFeSi | Gris | Moderado, gris claro a oscuro | Ataque selectivo EDS |
| | Al_7Cu_2Fe | Gris claro, sin delinear | Moderado, gris claro a oscuro | Ataque selectivo EDS |
| | Al_3Fe | Gris | ... | Ataque selectivo EDS |
| Poliedros | Si | Azul-Gris | Ninguno | Ataque selectivo EDS |
| | Al_6Mn $Al_6(FeMn)$ | Gris | Fuerte, gris claro a oscuro | Ataque selectivo EDS |
| | Al_6CuMg_4 primario | Amarillo claro, blanco | ... | Ataque selectivo EDS, BSED |
| | α -Al(TM)Si ^{b)} primario | Gris claro | ... | Ataque selectivo EDS, BSED |
| Escritura china | Si | Azul-Gris | Ninguno | Ataque selectivo EDS |
| | Mg_2Si | Azul | Ninguno | Ataque selectivo EDS |
| | α -AlMnSi | Gris | ... | Ataque selectivo EDS, BSED |
| | $AlCuFeMn$ | Gris claro | ... | Ataque selectivo EDS, BSED |
| | α -AlFeSi | Gris claro | Ninguno | Ataque selectivo EDS, BSED |
| | α -Al(TM)Si ^{b)} | Gris-Café, dependiendo de los contenidos de Mn y Cr | Ninguno | Ataque selectivo EDS, BSED |
| | $Al_8FeMg_3Si_6$ | Azul-Gris, no delineado | Fuerte, desde amarillo a azul | Ataque selectivo EDS |
| | Al_3Ni | Gris claro, sin delinear | ... | Ataque selectivo EDS, BSED |
| | Al_7Cu_4Ni | Gris claro | ... | Ataque selectivo EDS, BSED |
| Placas | Si | Azul-Gris | Ninguno | Ataque selectivo EDS |
| | Al_9FeNi | Gris, sin delinear | ... | Ataque selectivo EDS, BSED |

| | | | | |
|-------------------------------------|---|---------------------------------------|--|----------------------------|
| | Al_4FeSi_2 | Gris, sin delinear | ... | Ataque selectivo EDS, BSED |
| | Al_3FeSi | Gris | ... | Ataque selectivo EDS, BSED |
| Redondeadas, partículas irregulares | Al_2Cu | Rosa-Amarillo, sin delinear | Fuerte, naranja-verdoso-azul | Ataque selectivo EDS |
| | Al_2CuMg | Más oscura que Al_2Cu | Muy fuerte, amarillento-rojo, verde-azul | Ataque selectivo EDS, BSED |
| | Al_3Mg_2 | Blanco, más brillante que la matriz | Ninguno | Ataque selectivo EDS |
| | AlCuMg-MgZn_2 | Claro, ligeramente delineado | Ligero cambio de gris claro a oscuro | Ataque selectivo EDS, BSED |
| | $\text{Al}_6\text{CuMg}_4\text{-Al}_2\text{Mg}_3\text{Zn}_3$ | Amarillo claro, blanco | Ninguno | Ataque selectivo EDS, BSED |
| | $\text{Al}_5\text{Cu}_6\text{Mg}_2\text{-Mg}_2\text{Zn}_{11}$ | Claro, ligeramente delineado | ... | ... |
| | $\text{Al}_5\text{Cu}_2\text{Mg}_8\text{Si}_6$ | Amarillo brillante, sin delinear | Fuerte, de naranja a azul | Ataque selectivo EDS, BSED |
| Rosetas | Al_3Fe | Gris | Ligeramente visible | EDS |

a) EDS, espectroscopia de energía dispersiva,; BSED, difracción de electrones retrodispersados.

b) TM, metal de transición.

Reactivos de ataque para microestructuras de aleaciones comerciales de aluminio

| No. | Composición Química | Condiciones de ataque | Propósito o Aplicación |
|------------|---|--|---|
| 1m | 25mL HNO ₃ (70%) 75mL H ₂ O destilada | 70°C, 40s | Identificación de fases, especialmente para aleaciones Al-Cu |
| 2m | 20mL H ₂ SO ₄ (98%) 80mL H ₂ O destilada | 70°C, 30s 30s – 3min | Identificación de fases de aleaciones de Al, Cu, Mn, Mg, Fe, Be, Ti |
| 3m | 1g NaOH 100mL H ₂ O destilada | 5°C, 5 – 15s Limpiar en 5% HNO ₃ , enjuagar con agua fría | Identificación de fases, para aleaciones de AlCuMgZn se necesita 2 – 3min de ataque |
| | 1g NaOH 100mL H ₂ O destilada | Aplicar con hisopo 5 -10s | |
| 4m | 10g NaOH 100mL H ₂ O destilada | 70°C, 5s Preparar reactivo fresco antes de usar | Identificación de fases |
| 5m | 0.5mL HF (40%) 100mL H ₂ O destilada ¡Tóxico! | A temperatura ambiente, 5 – 60s alternando los tiempos con pulido y ataque | Identificación de fases, revelar límites de grano, líneas de deslizamiento en Al puro |
| 6m | 5mL HF (40%) 15mL HCl (48%) 25mL HNO ₃ (70%) 955mL H ₂ O destilada | A temperatura ambiente, 5 – 60s | Identificación de fases |
| 7m | A) 2(4)mL HF (40%) 3(6)mL HCl (38%) 5(10)mL HNO ₃ (70%) 190mL H ₂ O destilada (conc. Variable) ¡Tóxico! | A temperatura ambiente, 10 – 30s Preparar reactivo fresco antes de usar | Al y aleaciones de Al, (aleaciones Al-Si de fundición) |
| | 20mL reactivo 7m + 80mL H ₂ O | 5 – 10s | ... |
| | B) 2mL HF (40%) 3mL HCl (38%) 20mL HNO ₃ (70%) 175mL H ₂ O destilada (7m modificado) | 10 – 60s Enjuagar en flujo de agua caliente | Formar una capa delgada de productos de corrosión en la superficie de la muestra |
| 8m | 0.5 – 2.5g NaOH 1g ZnCl ₂ 175mL H ₂ O destilada | Unos segundos – 1min | Al y aleaciones de Al |
| 10m | 1 gota HF (40%) 25(30)mL HCl (38%) 25(20)mL HNO ₃ (70%) | 20 – 25°C 10 – 60s ¡Tóxico! | Al puro, aleaciones Al-Mg y aleaciones Al-Mg-Si |

| | | | |
|------------|---|--|--|
| | 20(50)mL CH ₃ OH | | |
| 11m | 2mL HCl (38%) 8mL HNO ₃ (70%) 45mL H ₂ O 45mL CH ₃ OH | 10s | Toda clase de aleaciones de Al |
| 12m | 10g NaOH 5g K ₄ [Fe(CN) ₆] 100mL H ₂ O destilada | 2min | Revela límites de grano, aleaciones Al-Si y Al-Cu |
| 13m | 4g KMnO ₄ H ₂ O destilada Después de la disolución agregar 1g NaOH | A temperatura ambiente, 7 – 45s | Microsegregaciones en aleaciones de Al |
| 14m | 4g KMnO ₄ 2g Na ₂ CO ₃ 94mL H ₂ O destilada Agregar unas cuantas gotas de agente humectante | La superficie de la muestra debe ser pulida y limpiada con H ₃ PO ₄ (20%) a 95°C, enjuagar en agua fría e inmediatamente sumergir en el reactivo de ataque por 30s | Heterogeneidades químicas y microsegregaciones en aleaciones de Al |
| 15m | A) 5mL HF 95mL H ₂ O destilada A temperatura de ebullición agregar MoO ₃ hasta saturar | A temperatura ambiente unos cuantos segundos | A) Identificación de fases |
| | A) 10mL HF 90mL H ₂ O destilada A temperatura de ebullición agregar MoO ₃ hasta saturar | | B) Revelar límites de grano |
| 16m | 2 – 2.5g (NH ₄)MoO ₄ + 10mL HNO ₃ Después de disolver, agregar 190mL de alcohol etílico (agitación intensa) | 20°C 30 – 40s | Identificación de fases |
| 17m | 1g (NH ₄)MoO ₄ 200mL H ₂ O destilada Agregar 6g NH ₄ Cl | 20°C 3s – 3min | Identificación de fases en aleaciones Al-Si |
| 18m | 1 – 2g (NH ₄)HF ₂ 2 -3g Na ₂ MoO ₄ x 2H ₂ O 5mL HCl 100mL H ₂ O destilada | 20°C 30 – 60s | Identificación de fases |
| 19m | Solución Stock: | 20°C | Identificación de fases |

| | | | |
|------------|--|---|--------------------------------|
| | 3g (NH ₄)MoO ₄ 20mL HNO ₃ 20mL H ₂ O destilada Uso de reactivo: 1p. solución stock + 4p. alcohol etílico | 30 – 40s | |
| 20m | 1.44g (NH ₄)NO ₃ 9.4mL HNO ₃ 20mL H ₂ O destilada Agregar MoO ₃ en exceso | Antes de usar diluya con agua 1:1 15 – 30s | Identificación de fases |
| 21m | 5mL HCl 10mL H ₂ SO ₄ 85mL H ₂ O destilada | 30s | Toda clase de aleaciones de Al |
| 22m | 2g NaOH 5g NaF 93mL H ₂ O destilada | 2 – 3min | Toda clase de aleaciones de Al |
| 23m | 5mL CH ₃ COOH (glacial) 1mL HNO ₃ (70%) 94mL H ₂ O destilada | 20 – 30min | Toda clase de aleaciones de Al |
| 24m | 15.5mL HNO ₃ (70%) 0.5% HF (48%) 3g CrO ₃ 84mL H ₂ O destilada (reactivo Sargent- Graff) | A temperatura ambiente, sumergir 20 -60s agitación moderada | Toda clase de aleaciones de Al |
| 25m | 200g CrO ₃ 20g Na ₂ SO ₄ 17mL HCl (35%) 1000mL H ₂ O | Preataque: 4m, después HNO ₃ (50%) en agua, e inmediatamente sumergir en 25m | Toda clase de aleaciones de Al |
| 26m | 200g CrO ₃ 200g H ₂ SO ₄ 50g NH ₄ HF ₂ 1000mL H ₂ O | A temperatura ambiente 5 – 30s | Toda clase de aleaciones de Al |
| 27m | 1 – 2mL HNO ₃ 98 – 99% Alcohol Etílico | Unos cuantos segundos –1 5min | Aleaciones Al-Mg |