UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

EFECTO DEL CONTENIDO DE Mg EN LA DUREZA Y ABRILLANTADO DE PIEZAS DE ALUMINIO COLADAS EN MOLDE DE ARENA EN VERDE.

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO

P R E S E N T A:

ÁNGEL JULIO RAMOS PLAZA

MÉXICO, D.F. 2014

Universidad Nacional Autónoma de México
UNAM
Biblioteca Central
Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: Prof. Eusebio Cándido Atlatenco Tlapanco

VOCAL: Prof. José Alejandro García Hinojosa

SECRETARIO: Prof. Arturo Alejandro Sánchez Santiago

1er. SUPLENTE: Prof. Agustín Gerardo Ruíz Tamayo

2do. SUPLENTE: Prof. Luis Darío Escobar Mejía

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

- FACULTAD DE QUÍMICA, UNAM.

Circuito de los institutos s/n, Cd. Universitaria, Coyoacán, Distrito Federal, C.P.04510 Tels.: (55) 56-22-52-39 y 56-22-52-25

- METALURGICA ARTESANAL S.A. DE C.V.

Eje norte # 11, Cd. Ind. Xicohténcatl, Tetla de la Solidaridad, Tlaxcala, C.P. 90434 Tels.: (241) 41–27100, 41–27372 y 41–27393

ASESOR DEL TEMA:

_____

Dr. José Alejandro García Hinojosa

SUPERVISOR TÉCNICO:

_____

M. en I. Agustín Gerardo Ruíz Tamayo

SUSTENTANTE:

_____

Ángel Julio Ramos Plaza

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS. 1

ÍNDICE DE TABLAS. 2

ÍNDICE DE GRÁFICOS..... 3

I. RESUMEN 4

CAPITULO 1. 5

1. INTRODUCCIÓN..... 5

1.1. OBJETIVOS. 7

1.1.1. Objetivos particulares..... 7

1.2. HIPÓTESIS. 8

CAPITULO 2. 9

2. ANTECEDENTES..... 9

2.1. Aleaciones de Al para fundición. 9

2.1.1. Aleaciones Al-Si. 10

2.1.2. Aplicaciones de la aleación Al-Si. 11

2.1.3. Aleaciones Al-Mg. 11

2.1.4. Aleaciones Al-Mg-Si. 13

2.1.5. Aplicaciones de la aleación Al-Mg-Si. 15

2.2. Proceso de fundición. 15

2.2.1. Fundentes y su clasificación. 16

2.2.2. Tratamientos del metal líquido. 16

2.2.3. Técnicas de fusión. 16

2.3. Control de composición química..... 17

2.4. Fluidez del aluminio. 18

2.5. Tipos de hornos. 18

2.5.1. Hornos de crisol calentados por gas. 18
2.6. Material del molde. 19
2.6.1. Moldeo de arena en verde. 20
2.6.2. Arcillas..... 20
2.6.3. Bentonita. 20
2.7. Tipos de moldeo en verde. 22
2.8. Ventajas del moldeo de arena en verde. 22
2.9. Desventajas del moldeo de arena en verde. 22
CAPITULO 3. 23
3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL. 23
3.1. Equipos y materiales. 23
3.1.1. Equipos UNAM. 23
3.1.2. Materiales para pruebas en la UNAM. 25
3.1.3. Equipos METALART. 25
3.1.4. Materiales para pulido (METALART). 25
3.2. Metodología utilizada en la UNAM. 26
3.2.1. Fabricación de la aleación maestra Al-48 %Mg. 26
3.2.2. Fabricación de piezas y prueba de fluidez. 28
3.2.3. Método de evaluación aplicada en la UNAM. 29
3.3. Métodos de evaluación METALART. 33
1. Etapa de Pre-acabado. 33
2. Etapa de Pulido. 38
3. Etapa de Abrillantado. 42
4. Lavado y empaquetado. 46

CAPITULO 4. 47
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN. 47
4.1. Resultados obtenidos en la UNAM. 47
4.2. Datos obtenidos para el balance de carga. 48
4.3. Datos obtenidos de la prueba de Dureza Brinell. 49
4.4. Datos obtenidos de la prueba de fluidez en espiral. 51
4.5. Metalografías de las piezas obtenidas. 52
4.6. Resultados de pulibilidad (METALART). 56
CAPITULO 5. 63
5. CONCLUSIONES. 63
BIBLIOGRAFÍA. 64
ANEXOS. 67
Anexo 1. Ejemplo de Balance de Carga. 67
Anexo 2. Composición química obtenida por espectrometría de absorción atómica. 69
Anexo 3. Composiciones química obtenidas por espectrometría de emisión atómica en la UNAM. 71
Anexo 4. Composiciones química obtenidas por espectrometría de emisión atómica en la empresa METALART. 78

ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 2. 1. Diagrama de fases al equilibrio de las aleaciones Al-Si [2]. 10
Figura 2. 2. Diagrama de equilibrio Al-Mg [2]. 12
Figura 2. 3. Diagrama de fases ternario Al-Si-Mg. 14
Figura 2. 4. Espectrómetro de emisión atómica. 17
Figura 2. 5. Ensayo de fluidez en espiral [8]..... 18
Figura 2. 6. Tipos de hornos de crisol. 19

Figura 3. 1. Muestra de un lingote de la aleación maestra Al-48%Mg. 28
Figura 3. 2. Durómetro marca Shimadzu tipo H8 con penetrador de 10mm. 31
Figura 3. 3. Ocular marca Shimadzu No. 8006 con objetivo graduado. 31
Figura 3. 4. Corte de sistemas de coladas y alimentadores a las piezas fabricadas. 34
Figura 3. 5. Lijado de imperfecciones derivadas de fundición. 35
Figura 3. 6. Lijado exterior e interior de la pieza. 36
Figura 3. 7. Asentamiento de la pieza. 37
Figura 3. 8. Pulido mecánico en tina de lavado. 38
Figura 3. 9. Esmerilado de la pieza con malla 150 de Al_2O_3. 39
Figura 3. 10. Esmerilado de la pieza con malla 220 de Al_2O_3. 39
Figura 3. 11. Proceso y colocación de la lija en la rueda de mezclilla. 40
Figura 3. 12. Proceso de lijado y muestra de la pieza pulida. 41
Figura 3. 13. Proceso de lijado y muestra de la pieza terminada. 42
Figura 3. 14. Rueda de Sisal y pulido de la pieza. 43
Figura 3. 15. Rueda de Manta paso final del proceso de brillo. 44
Figura 3. 16. Piezas lustradas, con su brillo final. 44
Figura 3. 17. Pastas de estearina marca JACKSONLEA. 45
Figura 3. 18. Técnica de aplicación de las estearinas para lubricar las piezas. 46

Figura 4. 1. Placa modelo y pieza moldeada..... 48
Figura 4. 2. Pruebas de fluidez..... 52

Figura 4. 3. Aleación con 0.2%Mg, 100x. 53
Figura 4. 4. Aleación con 0.2%Mg, 200x. 53
Figura 4. 5. Aleación con 0.4%Mg, 100x. 53
Figura 4. 6. Aleación con 0.4%Mg, 200x. 53
Figura 4. 7. Aleación con 0.6%Mg, 100x. 54
Figura 4. 8. Aleación con 0.6%Mg, 200x. 54
Figura 4. 9. Aleación con 0.8%Mg, 100x. 54
Figura 4. 10. Aleación con 0.8%Mg, 200x. 54
Figura 4. 11. Aleación con 1.0%Mg, 100x. 55
Figura 4. 12. Aleación con 1.0%Mg, 200x. 55
Figura 4. 13. Piezas terminadas vista frontal. 61
Figura 4. 14. Piezas terminadas vista posterior. 61

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 2. 1. Aleaciones de Al para fundición. 9

Tabla 3. 1. Composición química de la aleación utilizada por la empresa METALART. 26

Tabla 4. 1. Valores obtenidos para el balance de cada una de las aleaciones a fabricar. 48
Tabla 4. 2. Diámetros promedios de las huellas obtenidas de las piezas fabricadas (P=500 Kg, D=10 mm, t= 15 s). 49
Tabla 4. 3. Datos obtenidos de Dureza Brinell. 49
Tabla 4. 4. Datos de fluidez. 51
Tabla 4. 5. Datos obtenidos por el departamento de pulido y acabado, en las etapas de pulido de las piezas. 56
Tabla 4. 6. Datos obtenidos de la evaluación en cada paso del proceso de pulido. 59
Tabla 4. 7.Resultados de la evaluación obtenidos de las piezas. 60

ÍNDICE DE GRÁFICOS.

Gráfica 4. 1. Se muestra la dureza en relación con el porcentaje de Mg. 50
Gráfica 4. 2. Se muestra la fluidez con relación a la composición química. 51
Gráfica 4. 3. Resultados obtenidos de las piezas evaluadas. 62

I. RESUMEN

Desde hace 28 años, en Metalúrgica Artesanal S.A. de C.V. se han dedicado a fabricar piezas de aluminio fundido y pulido, para satisfacer las necesidades del mercado de la decoración y regalos en México, Canadá y Estados Unidos de América.

El propósito principal de éste trabajo es estudiar el efecto del magnesio en la pulibilidad, relacionándolo con la dureza y las inclusiones presentes sobre la aleación empleada por la empresa Metalúrgica Artesanal S.A. de C.V. (METALART) para producir piezas ornamentales de aluminio coladas mediante el proceso de moldeo en verde. Es decir a buscar un efecto en el brillo, relacionándolo con la dureza y las inclusiones presentes asociadas al contenido de Mg.

Las concentraciones de magnesio que se utilizaron fueron desde 0.2% hasta 1.0%, con incrementos de 0.2% para tratar de obtener diferencias marcadas en las condiciones de brillo en cada prueba y utilizando las mismas condiciones empleadas en la planta.

Para obtener las aleaciones con los diferentes niveles de Magnesio, se fabricó una aleación maestra de Al-48%Mg.

Las piezas fueron fabricadas en el Laboratorio de Fundición, edificio D, Facultad de Química, UNAM, empleando una placa modelo junto con su caja de moldeo proporcionadas por la misma empresa. Una vez fabricadas las piezas, se procedió a evaluar su dureza y microestructura. Posteriormente, en la planta se trabajó y evaluó el brillo mediante los criterios de sus expertos en pulido y también por el departamento de calidad.

Con los resultados recabados, tanto en la Facultad de Química como en la planta, se seleccionó la pieza con mejor brillo relacionándola con su dureza ya que son los parámetros con los que cuenta la planta para su caracterización.

CAPITULO 1.

1. INTRODUCCIÓN.

La industria manufacturera artesanal ha observado como el mercado de piezas metálicas ha adquirido una gran importancia en la actualidad, por lo que se han dedicado a fabricar piezas de aluminio fundido y pulido por el proceso de moldeo en verde, ya que representa un bajo costo en el producto final y puedan competir en el mercado tanto nacional como internacional.

La importancia del pulido y abrillantado en este tipo de piezas es fundamental para obtener un producto de calidad, por lo que se ha llegado a que se realicen investigaciones y se desarrollen mejores métodos de fabricación y selección de composiciones químicas que proporcionen piezas fundidas libres de cualquier tipo de defecto y que aseguren la calidad del abrillantado en el producto final.

Una de las grandes preocupaciones de la industria de la fundición artesanal en la fabricación y obtención de piezas ornamentales es obtener una semejanza de los acabados en aleaciones de aluminio modificadas con ciertos elementos aleantes para obtener características superficiales muy parecidas a la plata, un elemento que podría darle una de esas propiedades es el Magnesio, ya que al aumentar su contenido puede ocasionar el opacamiento de las piezas debido a la formación de inclusiones de óxido de magnesio que afectaran el brillo en la etapa final, por lo que está tesis se enfoca a determinar la cantidad adecuada de Magnesio en la aleación que nos de las propiedades adecuadas tanto en la fluidez para el llenado de los moldes, la dureza que afectara en las operaciones de pulido y en el abrillantado.

En general para las aleaciones de aluminio, la bibliografía reporta el efecto de ciertos elementos aleantes sobre algunas propiedades de fundición en especial las

mecánicas y microestructurales. Para el caso de las propiedades de acabado (abrillantado superficial), la información es incipiente, por lo que se parte de algunos características tecnológicas de fundición y del efecto de aleantes sobre la dureza de las aleaciones base aluminio en condición de colada.

1.1. OBJETIVOS.

- Determinar el efecto de la cantidad de Mg superior al 0.1% sobre la calidad del abrillantado superficial en la aleación 443MA[1] para la fabricación de piezas artesanales coladas en molde de arena en verde.

1.1.1. Objetivos particulares.

- Establecer la relación del contenido de Mg, con la dureza y abrillantado.
- Determinar el efecto de abrillantado y dureza en los niveles de 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 y 1.0% Mg en la aleación 443MA sobre las piezas artesanales coladas en molde de arena en verde.

[1] Nota: La 443MA es una aleación 443 modificada por la empresa METALART en su composición química.

1.2. HIPÓTESIS.

- Niveles altos de Mg pueden ocasionar opacamiento de las piezas debido a la formación de inclusiones de óxidos de magnesio, que afectaran el brillo en la etapa de pulido final, asociados al proceso de fusión.

CAPITULO 2.

2. ANTECEDENTES.

La clasificación del aluminio y sus aleaciones se dividen en dos grandes grupos bien diferenciados que son: metalmecánicas y fundición. Esto se debe a los diferentes procesos que pueden sufrir el aluminio y sus aleaciones. Para nuestro estudio nos centraremos en el grupo de fundición donde su clasificación se muestra en la tabla 2.1.

Tabla 2. 1. Aleaciones de Al para fundición.

Aleante	Designación
Al >=99.00%	1xx.x
Cobre	2xx.x
Silicio con adición de Cu y/o Mg	3xx.x
Silicio	4xx.x
Magnesio	5xx.x
Sin Emplear	6xx.x
Cinc	7xx.x
Estaño	8xx.x
Otros Elementos	9xx.x

2.1. Aleaciones de Al para fundición.

Las aleaciones de aluminio para fundición en molde de arena en verde y en especial para la fabricación de piezas artesanales deben tener características tales como: buena fluidez del metal líquido dentro del molde, no presentar fracturas en

caliente durante la solidificación, excesivos rechupes especialmente superficiales y evitar la absorción excesiva de hidrógeno que cause porosidad, entre otras [1].

Las aleación de aluminio utilizada en esta tesis fue de la serie 4xx.x utilizada por la empresa METALART.

2.1.1. Aleaciones Al-Si.

En la figura 2.1. se muestra el diagrama de fases del sistema Al-Si, donde podemos ver un punto eutéctico que corresponde a la composición 12.6% de Si y cuya temperatura es 577ºC y una solución sólida β, que algunos autores la consideran como silicio elemental.

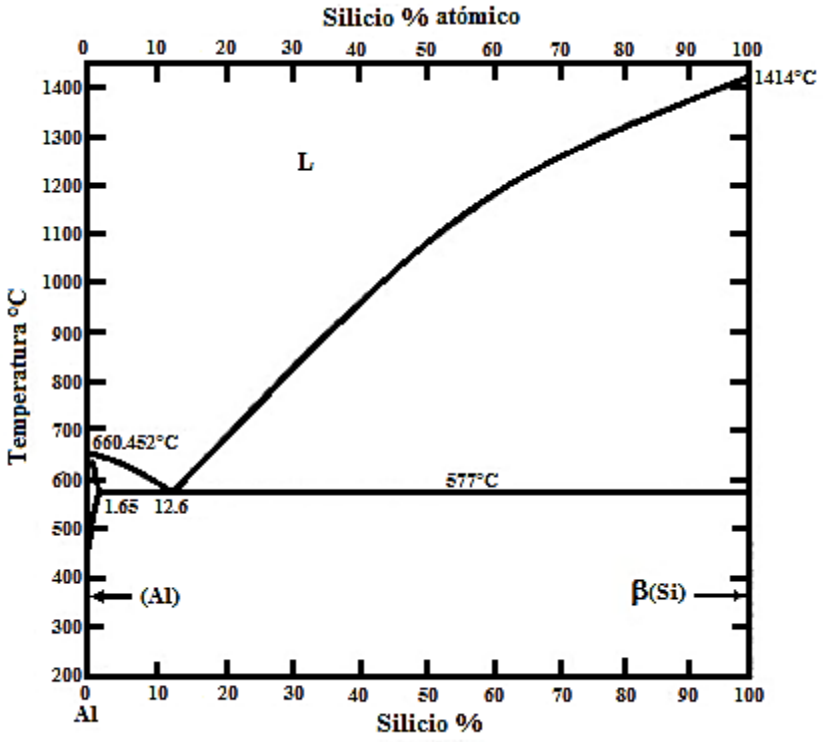


Figura 2. 1. Diagrama de fases al equilibrio de las aleaciones Al-Si [2].

Habitualmente en las aleaciones Al-Si los contenidos de silicio están en el rango de 5 a 20%. La estructura de estás aleaciones fundidas consiste comúnmente en

un punto eutéctico, que determina las propiedades mecánicas de la aleación y está condicionada fuertemente por la forma de solidificación [3].

El silicio endurece al aluminio y, sobre todo, aumenta la fluidez en la colada, así como la resistencia a la corrosión, pero son difíciles de maquinar por la naturaleza abrasiva del silicio.

Dependiendo de la carga del horno, las aleaciones Al-Si contienen un nivel variable de impurezas (Fe, Mn, Zn, etc.). Otros elementos, por ejemplo cobre y magnesio, frecuentemente se agregan para incrementar la dureza y resistencia a la corrosión de la aleación en las piezas fundidas. Todas estas impurezas y elementos de aleación pueden permanecer parcialmente en la solución sólida en la matriz o formar compuestos intermetálicos durante la solidificación.

Algunos otros elementos de baja solubilidad, como: Fe, Ni, Ti, Mn y Cr forman compuestos secundarios entre ellos o con el silicio. Como es conocido estos compuestos tienden a inducir un aumento en la resistencia a las temperaturas elevadas y dureza de la aleación.

2.1.2. Aplicaciones de la aleación Al-Si.

La principal aplicación de estas aleaciones es la fundición de piezas con geometría compleja esto por sus buenas cualidades de fluidez y para la fabricación de piezas para uso marítimo por su resistencia a la corrosión, pero no se emplea para piezas artesanales porque se ennegrecen con el tiempo.

2.1.3. Aleaciones Al-Mg.

En la figura 2.2. se muestra el diagrama Al-Mg en el que están presentes las fases Al+β que es una solución sólida de magnesio en aluminio y la fase β que es el Al_3Mg_2.

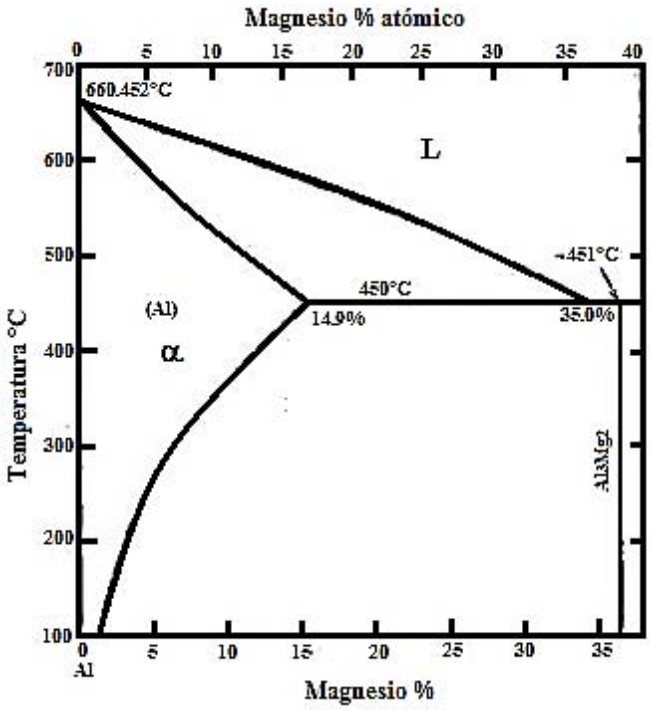


Figura 2. 2. Diagrama de equilibrio Al-Mg [2].

La composición eutéctica es de 35% de Mg y la temperatura es 450ºC.

La solubilidad sólida del magnesio en aluminio varia del 4.4% a 250ºC hasta 17.4% a 450ºC, por eso las aleaciones Al-Mg admiten el envejecimiento por precipitación.

Estas aleaciones tienden a ser maquinadas con facilidad y una buena resistencia a la corrosión. En comparación con aleaciones Al-Si, las aleaciones Al-Mg requieren un cuidado mayor en la colada. La baja colabilidad de estas aleaciones y la tendencia del magnesio a oxidarse incrementan las dificultades en el manejo, y por ello el costo.

2.1.4. Aleaciones Al-Mg-Si.

El conocimiento de las aleaciones Al-Si y Al-Mg se puede ver el efecto conjunto del silicio y magnesio que es el sistema de estudio.

Es bien conocida la disminución de la solubilidad del Mg en el Aluminio con la disminución de la temperatura. En el caso de las aleaciones Al-Si hipoeutécticas, con contenidos por encima del 0,2% de Si, el Mg forma precipitados de Mg_2Si a temperaturas de 540ºC. En la última etapa de la solidificación, con pequeñas cantidades de líquido remanente y temperaturas alrededor de los 500ºC, es posible la aparición de fases complejas de bajo punto de fusión en las cuales se combinan el Si, el Mg y el Fe.

Las fases Al-Si-Fe no se afectan por la adición de Mg. Sin embargo, el Mg puede combinarse con fases insolubles de Al-Fe ocasionando una pérdida del efecto endurecedor.

Las aleaciones más importantes son la 443 (5.3%Si), la 413 (12%Si), y la A356 (7%Si), aunque esta última es la más representativa del grupo Al-Si-Mg, por su gran uso en la industria manufacturera, presenta un contenido efectivo de Mg_2Si de entre 0,5 y 0,6 %. Esta combinación ofrece las mejores propiedades en lo que respecta a la fundición de moldeo en verde. Por otro lado, desarrolla altas propiedades después del tratamiento térmico y presenta buena resistencia a la corrosión. Se reporta en la literatura [4], dentro del diagrama ternario Al-Si- Mg (figura 2.3.), la presencia de las siguientes fases:

- α (Al); β (Mg_2Al_3); ε ($Mg_{23}Al_{30}$); ξ ($Mg_{48}Al_{52}$); γ ($Mg_{17}Al_{12}$); Mg_2Si la más común.

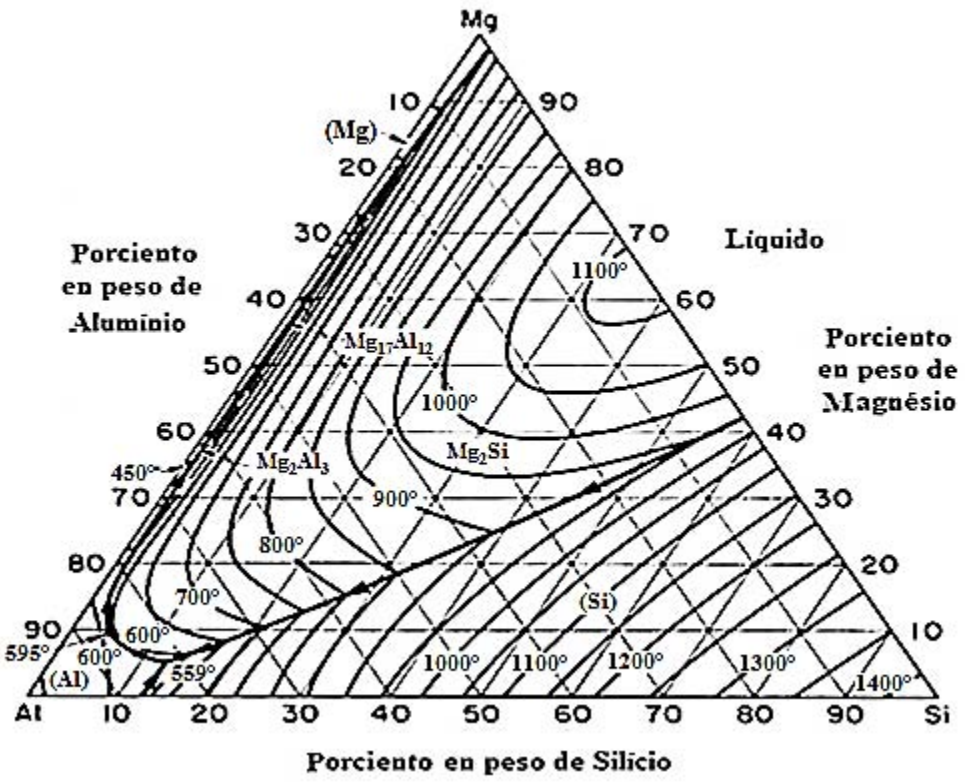


Figura 2. 3. Diagrama de fases ternario Al-Si-Mg.

No obstante la interacción entre más de tres de los elementos aleantes presentes no ha sido estudiada con profundidad debido a la complejidad relativa a la predicción de las fases presentes a partir de los diagramas o los cálculos termodinámicos. La adición de pequeñas cantidades de estroncio a la aleación transforma la estructura laminar del Si en una estructura fibrosa provocando el aumento de la resistencia a la tensión, la ductilidad, la dureza y la maquinabilidad.

Una modificación efectiva puede ser alcanzada con adiciones muy pequeñas (0.008% - 0.04%) de estroncio, pero usualmente se recomienda el uso de **0.02%Sr**. Por otro lado, las propiedades mecánicas de este tipo de aleaciones dependen principalmente de varios factores como el tratamiento del metal líquido (modificación, refinamiento del grano y desgasificación), velocidad de enfriamiento en el molde y los elementos de aleación [5].

2.1.5. Aplicaciones de la aleación Al-Mg-Si.

Los elementos de adición de esta familia son el magnesio y el silicio. Estas aleaciones pueden ser usadas para espesores que van desde los 4 mm hasta los 12 mm, ideal para elementos estructurales sujetos a vibraciones como los bloques de cilindros de los motores de combustión interna, también es apta para la fabricación de rines automotrices con espesores de 3.5 mm en su parte más crítica, es una aleación muy usada en la industria automotriz desde la década de los cincuentas [6].

2.2. Proceso de fundición.

Las características físicas y químicas de las aleaciones de aluminio fundido son:

- Se combina fácilmente con el oxígeno presente en la humedad del ambiente, del molde, hogar del horno y materiales oxidantes, formando escoria.
- Absorbe hidrógeno fácilmente por presencia de la humedad, formando sopladuras durante la solidificación.
- Disuelve aleaciones tales como el acero al carbono, hierro fundido y elementos no ferrosos en su gran mayoría.

La formación de escoria aumenta con la presencia de magnesio en las aleaciones Al-Mg, la turbulencia desmedida de la colada y la temperatura de los gases en contacto con la superficie.

2.2.1. Fundentes y su clasificación.

Para la fusión hay varios tipos de fundentes de los cuales unos son para la absorción de gases (cobertura), los que purifican el aluminio (descorificante) y los que eliminan los gases disueltos (desgasificante).

Los fundentes están basados en mezclas de sales de tipo cloruro de sodio-criolita (Na_3AlF_6, Hexafluoraluminato de Sodio), cloruro de sodio (NaCl), cloruro de potasio (KCl), cloruro de zinc (ZnCl), etc., y se emplean cuando el metal esta fundido. Para eliminar los gases se utilizan diferentes técnicas asociadas, una es el uso de gases inertes para el Al líquido como el nitrógeno, Argón o mezcla N-Ar en especial para aleaciones con contenido de magnesio.

2.2.2. Tratamientos del metal líquido.

Cuando en la fusión se requiere de adicionar elementos de alto punto de fusión como cobre, níquel, manganeso, silicio, titanio, se hace normalmente con aleaciones maestras y los de bajo punto de fusión se agregan directamente como el zinc y el magnesio, aunque el magnesio es altamente oxidable por lo que hay que tener cuidado al agregarlo.

2.2.3. Técnicas de fusión.

Las técnicas de fusión se asocian con los métodos bajo los cuales se obtiene el metal líquido de buena calidad metalúrgica para la operación de vaciado. Por lo que es necesario considerar los siguientes aspectos:

- Tipos de horno. (solo se analizará al horno de crisol).
- Materia prima primaria, secundaria y auxiliar.
- Fluidez del metal.
- Tratamientos al metal líquido.
- Material del molde.

- Sistema de colada y alimentación.
- Propiedades mecánicas, físicas y químicas.

Además es necesario considerar el control químico que está regido por el tipo de materias primas (Lingotes de aluminio puro y aleado, chatarras, retornos, etc.) que se utilicen para su fabricación.

2.3. Control de composición química.

Para determinar la composición química existen diferentes tipos de métodos como:

Espectroscopia de absorción atómica y Espectroscopia de emisión atómica, este último es el más utilizado (figura 2.4.), que consiste en someter una probeta a un paso de corriente eléctrica, la cual proporciona la energía necesaria para gasificar (atomizar) los elementos presentes, el espectro producido por estos gases es medido y comparado con una curva patrón permitiendo la estimación precisa de la composición del material [7].

Figura 2. 4. Espectrómetro de emisión atómica.

2.4. Fluidez del aluminio.

La fluidez da la capacidad al aluminio de recorrer los canales de alimentación y llenar los moldes huecos hasta que se enfrié este flujo a causa de la solidificación, la influencia de la temperatura es fundamental ya que a mayor temperatura mayor fluidez. Un alto contenido de escoria en el metal disminuye la fluidez, esto se determina a través de una espiral en la cual se mide el recorrido que alcanza el metal [8].

El ensayo de fluidez se muestra en la figura 2.5.

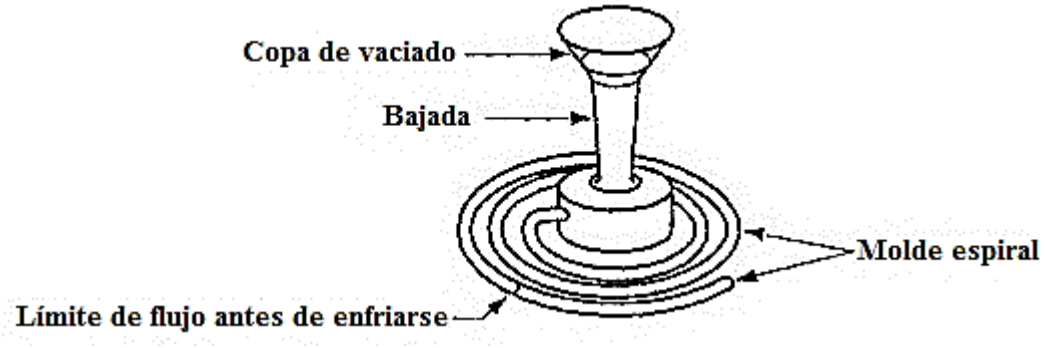


Figura 2. 5. Ensayo de fluidez en espiral [8].

2.5. Tipos de hornos.

Hay diferentes tipos de hornos para la fundición de aluminio, pero para fines prácticos y del desarrollo de éste trabajo solo se hablara del horno de crisol ya que es el que se usó en la parte experimental y es el que usa la empresa METALART.

2.5.1. Hornos de crisol calentados por gas.

En estos hornos se funde el metal, sin entrar en contacto directo con los gases de combustión. Por esta razón se llaman algunas veces hornos calentados

indirectamente. Hay tres tipos de hornos de crisol que se usan en las plantas de fundición: como se muestra en la figura 2.6.

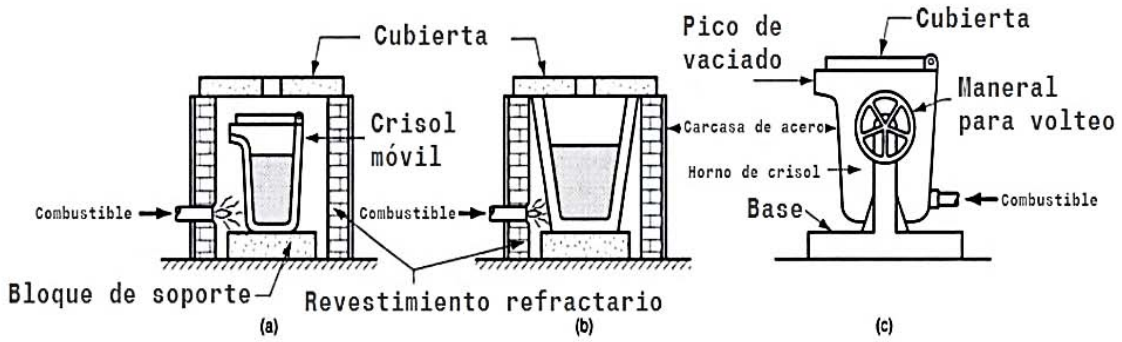


Figura 2. 6. Tipos de hornos de crisol: (a) crisol móvil, (b) crisol estacionario, (c) crisol basculante.

Generalmente los hornos de crisol utilizan crisoles de SiC. En el horno de crisol móvil, el crisol se coloca en un horno que usa diésel o gas para fundir la carga metálica. Cuando el metal se funde, el crisol se levanta del horno y se usa para el vaciado a molde. Los otros dos tipos llamados hornos de crisol de piso con quemador integrado tienen un horno de calentamiento y un recipiente integrados. En el horno de crisol estacionario con quemador integrado, el horno es estacionario y el metal fundido se extrae fuera del recipiente por medio de ollas de colada. En el horno de crisol basculante con quemador integrado, el dispositivo entero se puede inclinar para vaciar la carga [9].

2.6. Material del molde.

Para la fabricación de piezas fundidas de aluminio se debe tener en cuenta las formas, dimensiones y masa de la pieza. Por otro lado viene el diseño, las solicitaciones mecánicas, costos y selección del proceso de colada del cual van a

ser objeto de la pieza a fabricar, el proceso más común es el de moldeo en arena en verde.

2.6.1. Moldeo de arena en verde.

El moldeo de arena en verde es el más sencillo y versátil de los procesos de fundición del aluminio. Normalmente este proceso es elegido para la producción de cantidades altas a pequeñas de piezas fundidas idénticas, para piezas fundidas complejas con núcleos complicados, para grandes piezas fundidas y para piezas fundidas para la construcción.

Este proceso consiste en la elaboración de moldes con arena, generalmente elaborados de una mezcla de arena sílica, bentonita, agua. Es excelente para trabajar con todo tipo de aleaciones y, para piezas de tamaño pequeño y medio.

2.6.2. Arcillas.

Las arcillas son principalmente silicatos alumínicos con materia coloidal y trozos de fragmentos de rocas, que generalmente se hacen plásticas cuando están húmedas y pétreas por la acción del fuego; estas propiedades dan a las arcillas su utilidad, puesto que se les puede moldear en casi todas las formas, las cuales conserva después de ser sometida a altas temperaturas.

2.6.3. Bentonita.

La bentonita es un silicato de aluminio hidratado perteneciente al grupo de las arcillas esmécticas[2]. Su estructura laminar, su capacidad de intercambio catiónico,

[2]**Esmectitas:** filosilicatos trilaminares (T: O :T), de fórmula compleja. Se pueden dividir en esmectitas dioctaédricas y trioctaédricas. Las esmectitas dioctaédricas tienen aluminio como catión mayoritario

su poder de hinchamiento, su estabilidad térmica, entre otras propiedades, le confiere algunas ventajas las cuales son aprovechadas en un amplio campo de aplicación.

La bentonita se utiliza en la fabricación de moldes de fundición, y son llamadas "arcillas activadas" debido a su afinidad en ciertas reacciones químicas causadas por su excesiva carga negativa, además proporciona cohesión y plasticidad a la mezcla, facilitando su moldeo y dándole resistencia suficiente para conservar la forma adquirida después de retirar el modelo mientras se vierte el material fundido.

Tipos de Bentonitas.

Estas se dividen en sódicas y cálcicas:

- Sódica: es una Montmorillonita[3] que se encuentra en forma natural y que contiene un alto nivel de iones sodio. Se hincha al mezclarse con agua. También se conoce como "Wyoming Bentonita" o "Westem Bentonita".
- Cálcica: es una Montmorillonita[2] en la que el catión intercambiable predominante es el calcio. No exhibe la capacidad de hinchamiento de la bentonita sódica, pero tiene capacidades absorbentes. También es llamada "Southern", Texas o Mississippi Bentonite.

---

en posición octaédrica (*montmorillonita* y *beidellita*) o hierro (*nontronita*). Las esmectitas trioctaédricas tienen, mayoritariamente, Mg en posición octaédrica.

[3]**Montmorillonitas**: Arcillas esmécticas con una estructura de capas. El ion aluminio predomina en la estructura pero puede ser reemplazado por otro ion metálico formando una gran variedad de minerales.

2.7. Tipos de moldeo en verde.

Existen dos tipos de moldeo en verde:

- Moldeo manual: este moldeo se realiza de forma artesanal, por medio de apisonadores neumáticos y prensas con vibración.
- Moldeo en máquina: existen en la actualidad distintos tipos de máquinas para este fin; tanto en moldeo vertical como horizontal.

2.8. Ventajas del moldeo de arena en verde.

Las principales ventajas son:

- Posibilidad de obtención de piezas delgadas (no menor a 3 mm de espesor).
- Posibilidad de colar casi cualquier tipo de metales y aleaciones.
- Resistente a altas temperaturas.
- Es un proceso económico a comparación de los demás.
- El moldeo es simple de elaborar.
- El material del molde es reutilizable (aprox. 95% de la arena).

2.9. Desventajas del moldeo de arena en verde.

Las principales desventajas son:

- No se obtiene tolerancias reducidas.
- No es adecuado para piezas con geometría compleja.
- No se obtienen acabados superficiales muy lisos.

CAPITULO 3.

3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

En el procedimiento experimental se explicará cuáles fueron los equipos utilizados, la metodología de trabajo y los métodos de evaluación empleados tanto en los laboratorios de la Facultad de Química, Conjunto D, de la UNAM, así como los empleados en la planta de METALART.

3.1. Equipos y materiales.

Los materiales y equipos utilizados en la UNAM y METALART fueron los siguientes:

3.1.1. Equipos UNAM.

Los equipos utilizados para moldeo fueron:

- Placa modelo de cenicero con 2 piezas (donado por METALART) con sistema de colada; diseñado, fabricado y ensamblado en la Facultad de Química, conjunto D, UNAM.
- Caja de moldeo para la placa modelo; la cual fue proporcionada por la empresa METALART.
- Apisonador neumático.

Los equipos utilizados para la fusión fueron:

- Horno para crisol calentado por resistencia eléctrica.

- Crisol de SiC con capacidad máxima de 2 Kg aproximadamente, para el horno de resistencia eléctrica.
- Horno para crisol cilíndrico hecho de material refractario y recubierto por una placa de acero en el exterior con tapa calentado por gas LP por medio de un quemador.
- Crisol de SiC A30 con capacidad máxima de 10 Kg aproximadamente, para el horno a gas.
- Lanza para desgasificar.
- Termopar Tipo K para medir temperatura.
- Registrador de temperatura marca LEEDS & NORTHRUP.
- Balanza analítica marca SARTORIUS, modelo BP310P.
- Vaso de precipitados de 150 mL.
- Espectrómetro de emisión atómica marca SPECTRO.

Los equipos utilizados para durezas fueron:

- Durómetro marca Shimadzu tipo H8 con penetrador de 10 mm.
- Ocular marca Shimadzu No. 8006 con objetivo graduado para medir huella.

Los equipos utilizados para metalografías fueron:

- Microscopio metalográfico marca SPECTRO.
- Cámara digital para microscopio.
- Software ImagePro Plus para la adquisición de imágenes.

3.1.2. Materiales para pruebas en la UNAM.

Los materiales utilizados fueron:

- Aleación base 443MA y escorificante, proporcionados por la empresa METALART.
- Arena de moldeo utilizada para la fabricación de los moldes con composición de la mezcla son la siguiente:
    - Arena de Sílice (Arena roja de desierto).
    - Bentonita Sódica al 60% y Cálcica al 40%.
    - Agua.
- Reactivo Keller (HF 2 mL, HCl 3 mL, HNO_3 5 mL, H_2O 190 mL).

3.1.3. Equipos METALART.

Los equipos utilizados para el pulido fueron:

- Maquina lijadora de banda marca Burr-king.
- Maquina niveladora de lija circular de 12 pulgadas marca Burr-king.
- Cortadora de cinta marca Burr-king.
- Motor de lijado horizontal.
- Tina de vibrado marca Burr-king.
- Espectrómetro de emisión atómica marca SPECTRO modelo SPECTROMAXx.
- Tinas de lavado.

3.1.4. Materiales para pulido (METALART).

Los materiales utilizados fueron:

- Estearinas[4] de la marca JACKSONLEA.

[4] La estearina es un gliceril éster de ácido esteárico, derivado de la grasa animal y es posible encontrarla en ciertas plantas tropicales como la palma, que es soluble en alcohol caliente y en cloroformo, es poco soluble en alcohol frio como el éter y el éter de petróleo e insoluble en agua. Tiene aplicaciones como lubricante y de agente en acabados superficiales.

- Piedra cerámica y desengrasante de la marca OLMECA.
- Lijas de banda grano 40, 36, 100, 240, 400 de Al_2O_3.
- Esmeriles mallas 150, 220 de Al_2O_3.
- Rueda de Sisal (tela de mezclilla + zacate).
- Rueda de Manta (tela de algodón).

3.2. Metodología utilizada en la UNAM.

La composición química promedio de la aleación 443MA, la cual fue utilizada y se muestra en la tabla 3.1.

Tabla 3. 1. Composición química de la aleación utilizada por la empresa METALART.

%Si	%Fe	%Cu	%Mn	%Mg	%Zn	%Ni	%Cr	%Pb	%Ti	%Sr	%Al
5.78	0.298	0.429	0.044	0.087	0.027	0.013	0.007	0.005	0.144	0.0002	93.2

Para ajustar dicha aleación a los niveles de Mg requeridos se utilizó una aleación maestra de aproximadamente Al-48%Mg.

3.2.1. Fabricación de la aleación maestra Al-48 %Mg.

La fabricación de la aleación maestra se realizó para evitar las pérdidas y proporcionar seguridad al incorporar el Mg en el metal líquido. A continuación se puntualiza la metodología utilizada:

- Efectuar el balance de carga para la fabricación de aproximadamente 1 kg de la aleación maestra Al-Mg con 48% de Mg.
- Pesar la carga: 1000 g de Aluminio puro y 480 g de Mg puro en trozos pequeños.

- Envolver el Mg en papel aluminio (al ser demasiado volumen del Mg se dividirá en 2 cargas), para evitar pérdidas al agregarlo al metal líquido.
- Recubrir el herramental y el crisol de capacidad de 2 Kg con pintura de Zr base agua.
- Colocar la carga del material base dentro del crisol y a su vez dentro del horno.
- Encender el horno de resistencia eléctrica y seleccionar la temperatura de ≈760ºC.
- Cuando el metal este líquido, agregar con una campana el Mg envuelto en papel aluminio para aumentar su eficiencia, hasta su completa disolución, así para las 2 cargas.
- Precalentar el escorificante, a una temperatura de entre 100-200ºC.
- Agitar para homogenizar el metal líquido durante 5 minutos.
- Escorificar.
- Medir la temperatura y colar a 600-650ºC en lingoteras metálicas.
- Se pesó después de llegar a la temperatura ambiente lo que nos dio un valor de 980.957 g.

La composición química fue obtenida por medio de la espectrometría de absorción atómica con un valor de 47.76% de Mg.

En la figura 3.1. se muestra un lingote de la aleación maestra.

Figura 3. 1. Muestra de un lingote de la aleación maestra Al-48%Mg.

3.2.2. Fabricación de piezas y prueba de fluidez.

Para todos los casos se debe considerar las siguientes etapas previas:

1. Preparación del herramental: que consiste en limpiar el crisol, la lanza para desgasificar, el molde para probetas de análisis químico y las demás herramientas a utilizar y recubrirlas con pintura refractaria de ZrO_2.
2. Preparación de la mezcla para moldeo en verde: consiste en colocar 50 Kg de arena sílice con 10% de bentonitas y de 3.0-3.5% de humedad dentro del molino chileno.
3. Preparación de los moldes: consiste en elaborar los moldes con la mezcla obtenida del paso anterior.
4. Preparación de Equipo: consiste en colocar el medidor de temperatura y el tanque de Ar con la lanza para desgasificar cerca del área de trabajo.
5. Preparación del horno: consiste en prender el piloto del quemador, calibrar la salida principal del gas y encender el soplador.

Después para fabricar piezas con cantidades de 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 y 1.0% de Mg y su prueba de fluidez para cada una se utilizó la misma carga.

Los pasos fueron los siguientes:

- Pesar la carga, que consistió en el peso total de la pieza con todo y su sistema de colada, así como para la prueba de fluidez aproximadamente 4.0 Kg.
- Realizar la fusión del metal base.
- Medir la temperatura de trabajo (780-800ºC) del metal líquido.
- Precalentar el escorificante, aproximadamente a una temperatura de 100-200ºC.
- Sumergir con una campana la carga de aleación maestra Al-Mg envuelta en papel aluminio, para aumentar la eficiencia.
- Agitar con movimientos ascendentes durante 5 minutos, para homogenizar el metal líquido.
- Escorificar.
- Desgasificar con Ar durante 5 minutos agitando con movimientos circulares.
- Medir la temperatura de colada (750-760ºC) y vaciar directo a los moldes.
- Se obtiene la muestra para composición química final (moneda) y se realiza el análisis químico con un espectrómetro de emisión atómica.

3.2.3. Método de evaluación aplicada en la UNAM.

Los métodos de evaluación que se utilizaron en la Facultad de Química, de la UNAM fueron:

- *Dureza Brinell*: tomada a cada una de las piezas con las concentraciones de Mg ya descritas anteriormente. Para esta prueba se utilizó el criterio de $F=5D^2$ que se utiliza para materiales con dureza Brinell comprendida entre 35 HBN y 80 HBN que nos dice la carga a usar, la cual fue de 500 Kg, un penetrador de 10 mm y 15 s de aplicación de la carga, la forma en que se calcula la dureza fue la siguiente:

- Fórmula para medir la huella:

$$d_{prom} = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

Dónde:

d_1: diámetro de la huella horizontal [mm].

d_2: diámetro de la huella vertical [mm].

d_{prom}: diámetro promedio [mm].

- Fórmula para el cálculo de dureza:

$$HBN = \frac{2P}{\pi D\left(D - \sqrt{D^2 - d^2}\right)}$$

Dónde:

HBN: Dureza Brinell.

P: Carga aplicada [Kg].

D: diámetro penetrador [mm].

d: diámetro promedio de la huella [mm].

En las figuras 3.2. y 3.3. se muestra el equipo que se utilizó para esta prueba.

Figura 3. 2. Durómetro marca Shimadzu tipo H8 con penetrador de 10mm.

Figura 3. 3. Ocular marca Shimadzu No. 8006 con objetivo graduado.

- *Metalografías*: se cortó a la mitad una de las 2 piezas fabricadas para cada caso y se preparó para la metalografía de acuerdo al siguiente procedimiento:

    - Se pasa por lijas de grano 240, 320, 400 y 600, lijando hasta obtener un rayado homogéneo, se gira 90º cada vez que se cambia de lija.
    - Se pasa por el paño grueso y después por el fino hasta obtener una superficie a espejo.
    - Se hace un ataque químico con reactivo Keller por aproximadamente 10 s.
    - Se observa en el microscopio metalográfico a 100x (figura 3.4).
    - Se toma la foto por medio de una cámara digital la escala correspondiente.

- *Balances de Carga*: se determina para cada una de las composiciones químicas de las piezas a fabricar, utilizando las siguientes fórmulas:

    - Fórmulas utilizadas:

$$g\ de\ Mg\ requeridos = Peso\ carga\ [g]\left(\frac{\%Mg}{100\%}\right)/eficiencia$$

$$g\ de\ Aleación\ Maestra = g\ Requeridos\ de\ Mg - g\ de\ Mg\ contenidos\ en\ la\ aleación\ de\ METALART$$

3.3. Métodos de evaluación METALART.

Los métodos de evaluación efectuados en la empresa METALART fueron los siguientes:

- Determinación de la composición química por medio de un espectrómetro de emisión atómica.
- *Pulibilidad*: es la facilidad para realizar el pulido final y alcanzar la mayor calidad de brillo en las piezas, esto lo realiza el departamento de Pulido y acabado, para determinar la dureza, resistencia al pulido y el brillo de las piezas ornamentales fabricadas.
- Las etapas realizadas se mencionan a continuación:

1. Etapa de Pre-acabado.

   Es donde se quitan las imperfecciones procedentes de la fundición, la descripción de cada etapa es:

   - Corte de piezas: se utiliza una máquina de sierra cinta para eliminar los sistemas de coladas y alimentadores como se muestra en la figura 3.4.

Figura 3. 4. Corte de sistemas de coladas y alimentadores a las piezas fabricadas.

- Lijado en banda de grano 40 de Al_2O_3: se aplica para quitar los imperfectos derivados del corte y de fundición como se observa en la figura 3.5.

Figura 3. 5. Lijado de imperfecciones derivadas de fundición.

- Lijado con disco de corte de grano 36 de Al_2O_3: consiste en un lijado interno y externo, para perfeccionar la geometría de la pieza como se muestra en la figura 3.6.

Figura 3. 6. Lijado exterior e interior de la pieza.

- Lijado con disco de 12 pulgadas de grano 40 de Al_2O_3: se aplica para asentar las piezas, para poder colocarlas en bases planas, la figura 3.7. muestra la forma de hacerlo.

Figura 3. 7. Asentamiento de la pieza.

- Tina de vibrado con piedra cerámica y desengrasante: se utiliza para darle un pulido mecánico aproximadamente durante un tiempo de 30 minutos, en la figura 3.8. se muestra las piezas dentro de ella.

Figura 3. 8. Pulido mecánico en tina de lavado.

Al final de todo el proceso, la pieza queda libre de grasa, lisa, sin filos y con su geometría bien definida.

2. Etapa de Pulido.

Son las operaciones mecánicas que se realizan en la superficie de las piezas de aluminio para mejorar su aspecto visual y que se describen a continuación:

- Esmerilado con malla 150 de Al_2O_3: en este paso se difuminan las rayas gruesas obtenidas del proceso de pre-acabado como se muestra en la figura 3.9.

Figura 3. 9. Esmerilado de la pieza con malla 150 de Al_2O_3.

- Esmerilado con malla 220 de Al_2O_3: en esta etapa se eliminan las marcas hechas por el esmeril anterior, haciéndolas más finas, mostrando en la figura 3.10.

Figura 3. 10. Esmerilado de la pieza con malla 220 de Al_2O_3.

- Lijado 100 de Al_2O_3: las piezas son trabajadas por una lija de cinta montada sobre una rueda de mezclilla, para disminuir las rayas del proceso anterior, como se muestra en la figura 3.11.

Figura 3. 11. Proceso y colocación de la lija en la rueda de mezclilla.

- Lijado 240 de Al_2O_3: proceso similar al anterior y el efecto es la disminución de la profundidad de las rayas, a continuación se muestra en la figura 3.12.

Figura 3. 12. Proceso de lijado y muestra de la pieza pulida.

- Lijado 400 de Al_2O_3: el desbaste con esta lija es más fino que el lijado anterior mostrado en la figura 3.13. y el final del proceso de pulido.

Figura 3. 13. Proceso de lijado y muestra de la pieza terminada.

3. Etapa de Abrillantado.

Es el proceso donde se obtiene el lustre de las piezas de aluminio, dándole el acabado final.

- Abrillantado con Sisal (tela de mezclilla + zacate): el sisal es de diferentes tamaños dependiendo la geometría de la pieza, este paso es el comienzo de la obtención del acabado final de la pieza, mostrándose en la figura 3.14.

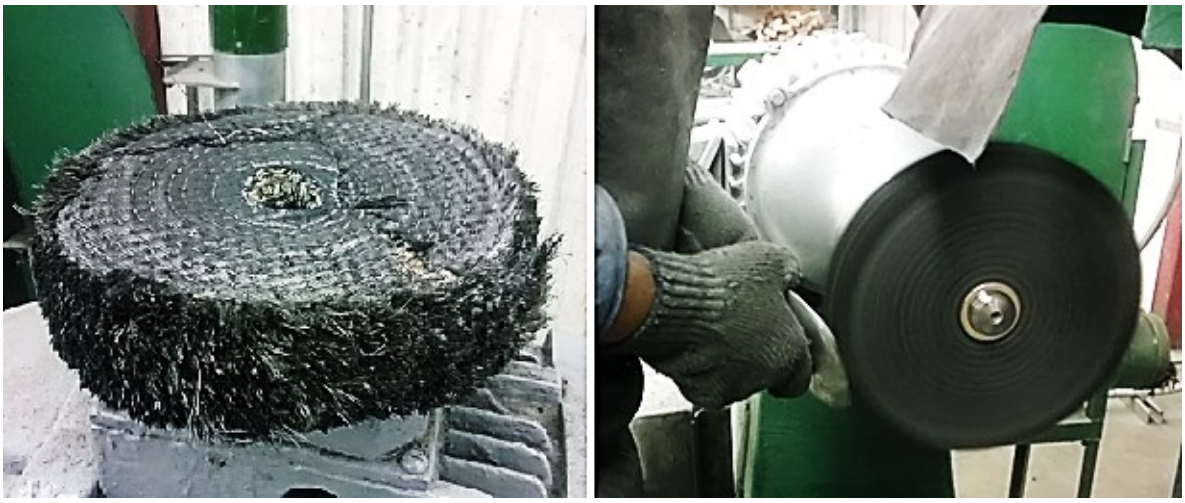


Figura 3. 14. Rueda de Sisal y pulido de la pieza.

- Abrillantado con Rueda de Manta (tela de algodón): este paso es el último del proceso de brillo, donde se obtiene el lustre adecuado en la pieza artesanal, como se muestra en las figuras 3.15. y 3.16.

Figura 3. 15. Rueda de Manta paso final del proceso de brillo.

Figura 3. 16. Piezas lustradas, con su brillo final.

En todas las etapas del proceso de pulido y abrillantado se utilizó estearinas que se untan en la lija y esmeriles como lubricante, a continuación en la *figura 3.17.* se muestran los diferentes tipos de estearinas y en la *figura 3.18.* la técnica de aplicación.

Figura 3. 17. Pastas de estearina marca JACKSONLEA.

Figura 3. 18. Técnica de aplicación de las estearinas para lubricar las piezas.

4. Lavado y empaquetado.

   Las piezas al término del proceso de abrillantado, pasan a la zona de inspección visual y proceden a lavarlas en agua caliente con jabón en barra y desengrasante comercial, se secan con un paño, se guardan dentro de bolsas de plástico transparente y a su vez en cajas para ser distribuidas a los clientes.

CAPITULO 4.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

Los resultados obtenidos en éste trabajo constan de una serie de pruebas realizadas en los Laboratorios de la Facultad de Química, Conjunto D, UNAM y de la empresa Metalúrgica Artesanal S.A. de C.V. (METALART) para mejorar sus piezas artesanales, a continuación se describe los resultados obtenidos.

4.1. Resultados obtenidos en la UNAM.

Las piezas se fabricaron por el proceso de moldeo en verde. La placa modelo y la pieza ya moldeada se presenta en la figura 4.1. La mezcla de moldeo consistió en:

Arena sílice (AFS 90-100) + 10% de Bentonita (60% sódica y 40% cálcica) + Agua (3.5% de humedad).

Se utilizaron 50 Kg de mezcla total y 3.5% de humedad, es decir, 40.25 Kg de arena y 1.75 litros de agua.

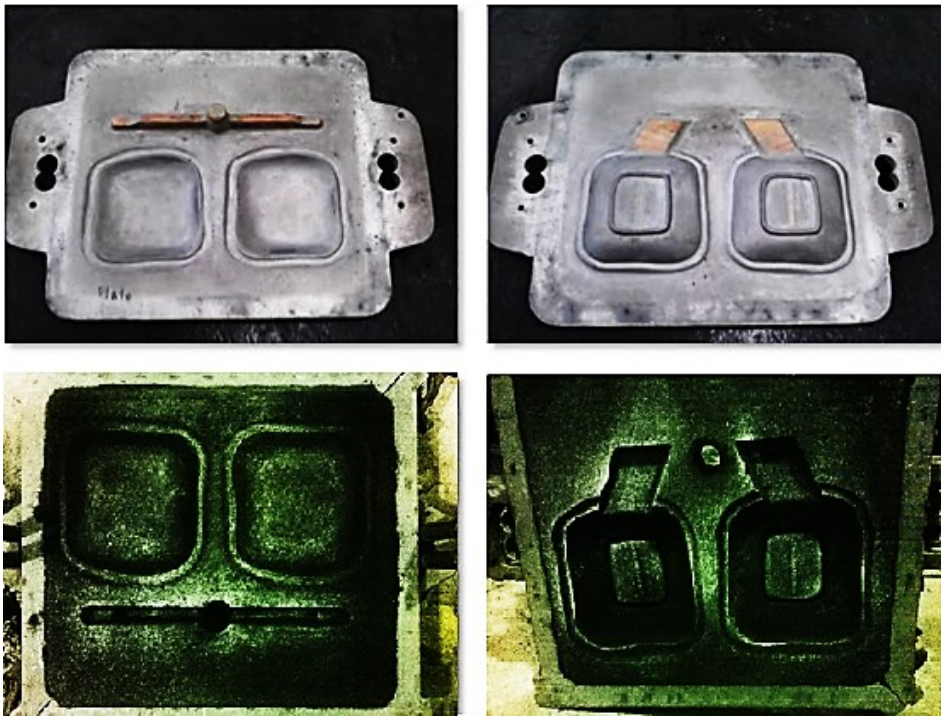


Figura 4. 1. Placa modelo y pieza moldeada.

4.2. Datos obtenidos para el balance de carga.

Los cálculos para el balance de carga para las diferentes aleaciones se muestran en la tabla 4.1. utilizando como base de cálculo 4.0 kg de la aleación 443MA con una eficiencia de Mg del 92%.

Tabla 4. 1. Valores obtenidos para el balance de cada una de las aleaciones a fabricar.

C. Q. Req. Teórica [%Mg]	Cantidad Liga Al-Mg [g]		Cantidad de aleación METALART [g]	C. Q. Real [%Mg]
	Calculada	Real		
Patrón	----	**-----**	2000	**0.087**
0.2	18.207	**18.207**	4000	**0.234**
0.4	36.415	**45.534**	4000	**0.394**
0.6	54.726	**54.851**	4000	**0.619**
0.8	72.832	**72.828**	4000	**0.746**
1.0	91.040	**109.241**	4000	**0.966**

4.3. Datos obtenidos de la prueba de Dureza Brinell.

Los resultados de la dureza Brinell obtenidos de cada una de las mediciones de las huellas y sus promedios que se muestran en la tabla 4.2.

Tabla 4. 2. Diámetros promedios de las huellas obtenidas de las piezas fabricadas (P=500 Kg, D=10 mm, t= 15 s).

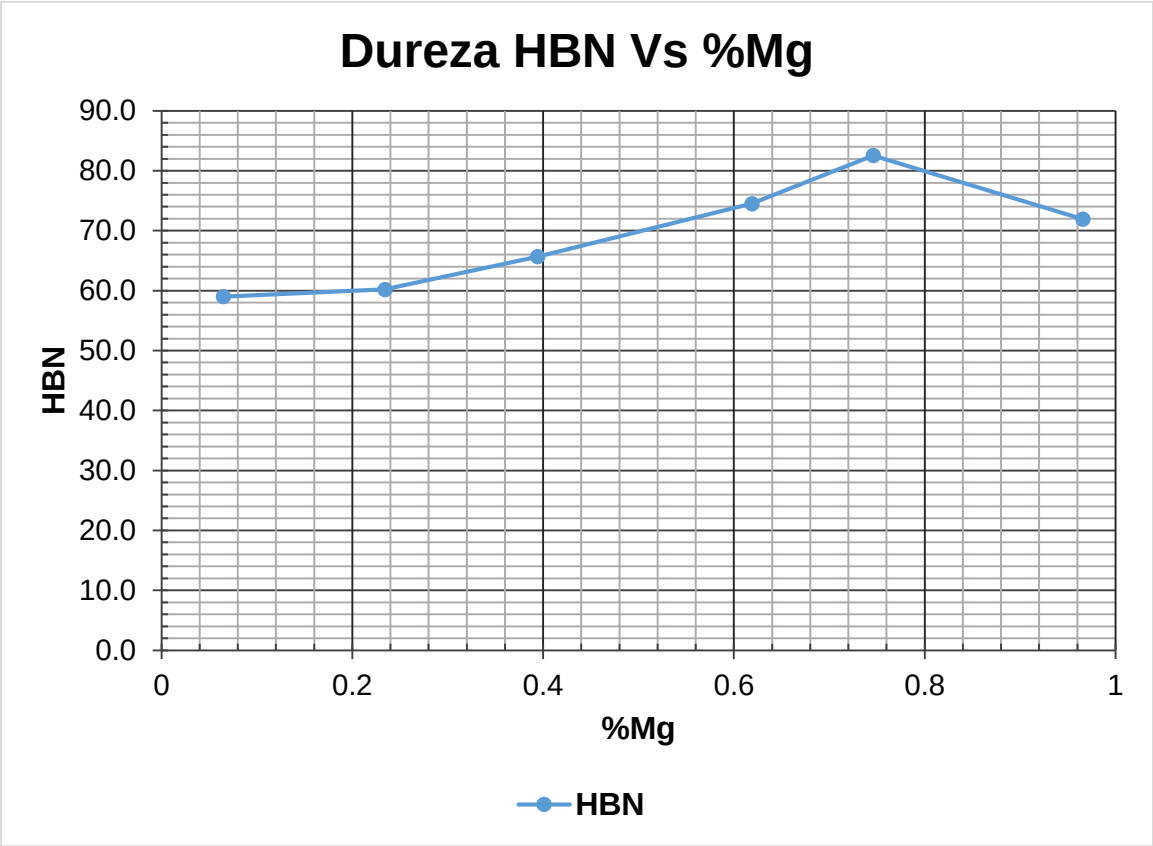
Diámetros Huella [mm]	%Mg				
	0.2	**0.4**	**0.6**	**0.8**	**1**
1	3.1	2.875	2.9	2.775	2.925
2	3.225	2.9	2.875	2.75	2.925
3	3.3	3.075	2.9	2.725	2.975
Promedio	**3.21**	**2.95**	**2.89**	**2.75**	**2.94**

Al obtener las huellas promedio (d_{prom}) de cada una de las composiciones fabricadas y aplicando la fórmula para dureza Brinell, ya antes mencionada se obtuvieron los valores que se muestran en la tabla 4.3. para cada composición de las piezas y se graficaron para observar el comportamiento en relación con el %Mg utilizado, como se observa en la gráfica 4.1.

Tabla 4. 3. Datos obtenidos de Dureza Brinell.

Pieza	Dureza HB	HBN Penetrador/Carga/tiempo*
Patrón	59.00	**59.00 HBN 10/500/15**
0.2%Mg	60.21	**60.21 HBN 10/500/15**
0.4%Mg	65.69	**65.69 HBN 10/500/15**
0.6%Mg	74.51	**74.51 HBN 10/500/15**
0.8%Mg	82.56	**82.56 HBN 10/500/15**
1.0%Mg	71.94	**71.94 HBN 10/500/15**

*Norma ASTM-E-10-1978. Brinell Hardness of Metallic Materials.



Gráfica 4. 1. Se muestra la dureza en relación con el porcentaje de Mg.

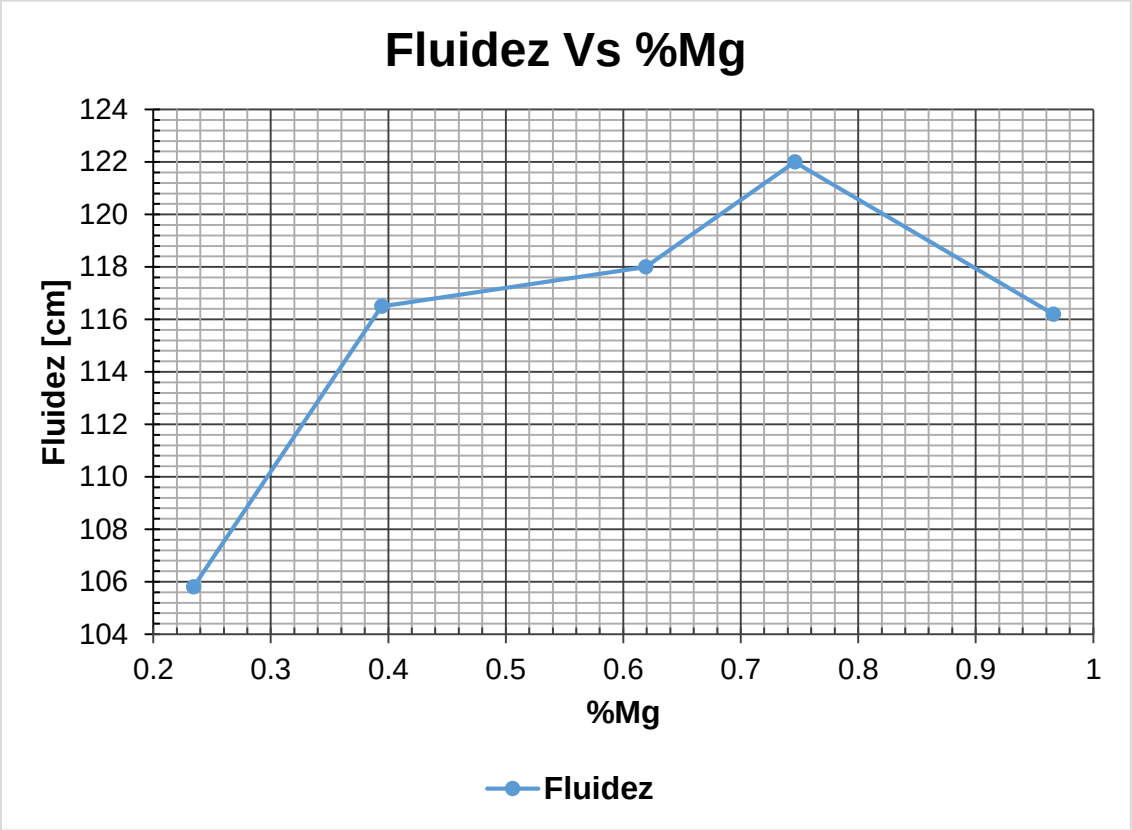
Al graficar la composición química contra dureza obtenida podemos observar que tiene una tendencia lineal, conforme aumentamos la concentración de magnesio la dureza también aumenta, aunque en la concentración de 1.0 %Mg tenemos el punto más abajo con valor de 71.94 HBN, lo que concuerda con la mayor porosidad encontrada a comparación de la pieza con 0.8%Mg, debido a un cambio en la técnica de fusión que provocó la disminución de la porosidad y arrastre de arena. Esta dureza deberá tener un efecto en las condiciones de pulido y abrillantado.

4.4. Datos obtenidos de la prueba de fluidez en espiral.

Al obtener la prueba de fluidez se midió con la ayuda de un cordón y una cinta métrica toda la zona de la espiral, obteniendo los siguientes datos mostrados en la tabla 4.4. y en la gráfica 4.2. en relación con las composiciones.

Tabla 4. 4. Datos de fluidez.

Pieza	Fluidez [cm]
0.2%Mg	105.8
0.4%Mg	116.5
0.6%Mg	118.0
0.8%Mg	122.0
1.0%Mg	116.2



Gráfica 4. 2. Se muestra la fluidez con relación a la composición química.

Esta prueba realizada es conocida como fluidez, se observa en la gráfica 4.2. que en la pieza con composición de 0.8%Mg se obtuvo el mayor índice de fluidez y que fue de 122 cm. La temperatura de colada fue en un rango de 760°C a 780°C, en la figura 4.2. se observan las espirales de fluidez obtenidas.

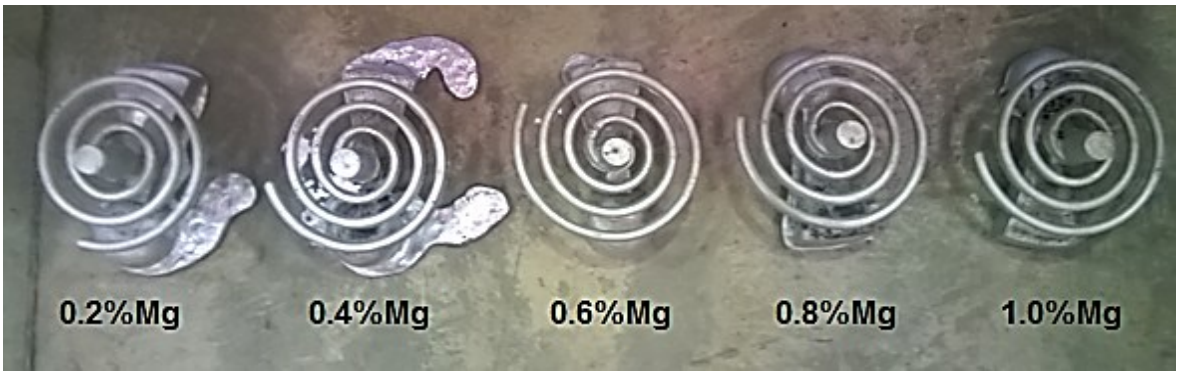


Figura 4. 2. Pruebas de fluidez.

4.5. Metalografías de las piezas obtenidas.

Se realizaron a cada una de las piezas metalografías y se tomaron imágenes a 100x y 200x, para observar su microestructura y detectar posibles inclusiones y/o formaciones de fases intermetálicas al agregar magnesio.

En las figuras 4.3. y 4.4. se muestra la microestructura para la pieza con 0.2%Mg.

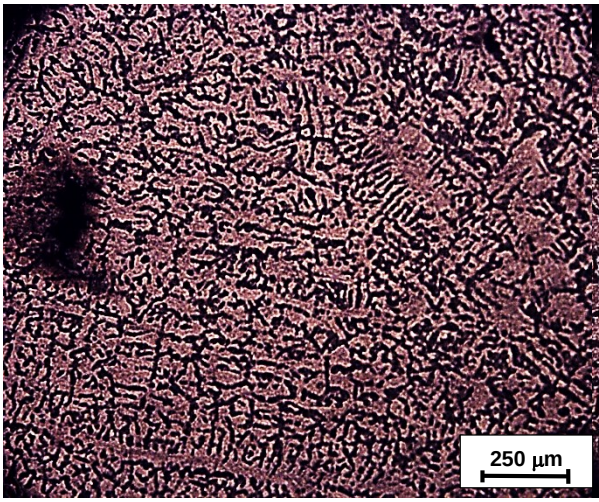


Figura 4. 3. Aleación con 0.2%Mg, 100x.

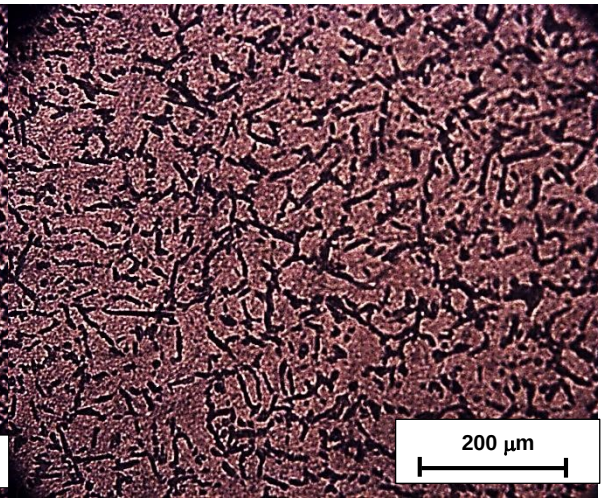


Figura 4. 4. Aleación con 0.2%Mg, 200x.

En las figuras 4.5. y 4.6. se muestra la microestructura para la pieza con 0.4%Mg.

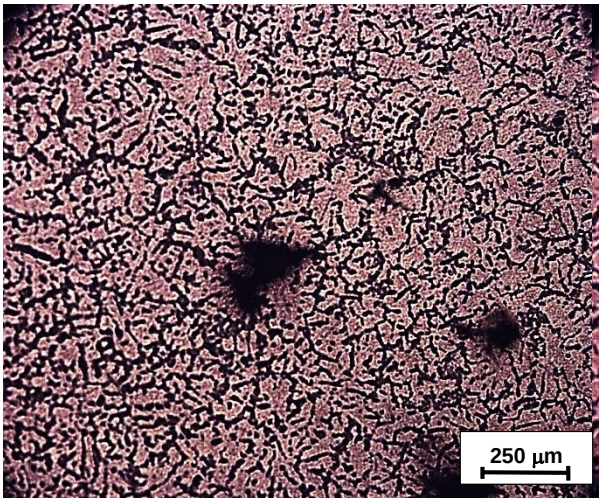


Figura 4. 5. Aleación con 0.4%Mg, 100x.

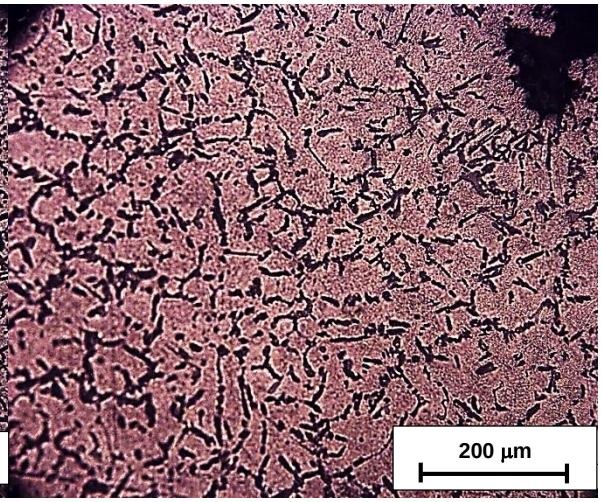


Figura 4. 6. Aleación con 0.4%Mg, 200x.

En las figuras 4.7. y 4.8. se muestra la microestructura para la pieza con 0.6%Mg.

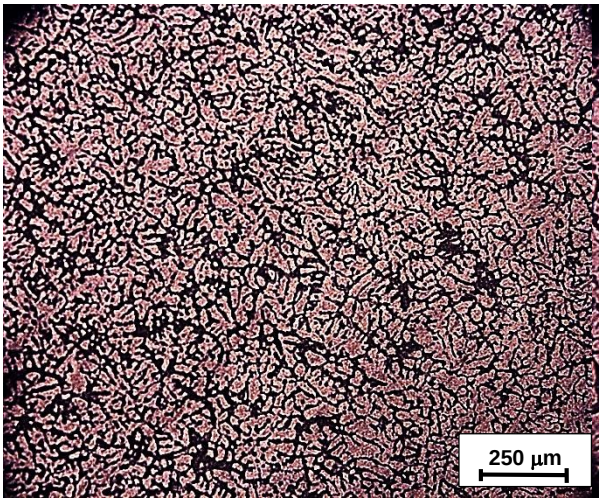


Figura 4. 7. Aleación con 0.6%Mg, 100x.

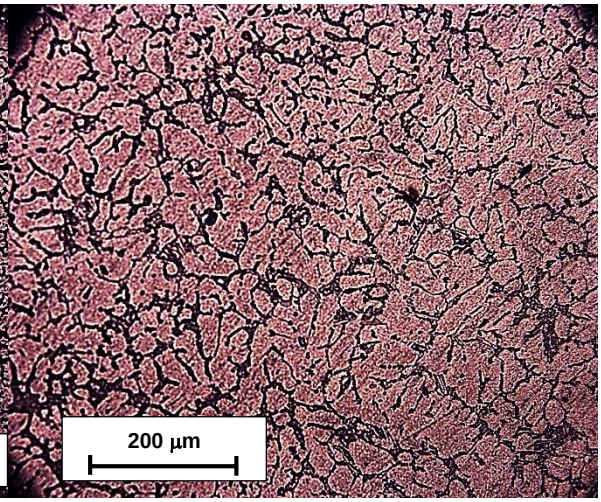


Figura 4. 8. Aleación con 0.6%Mg, 200x.

En las figuras 4.9. y 4.10. se muestra la microestructura para la pieza con 0.8%Mg.

Figura 4. 9. Aleación con 0.8%Mg, 100x.

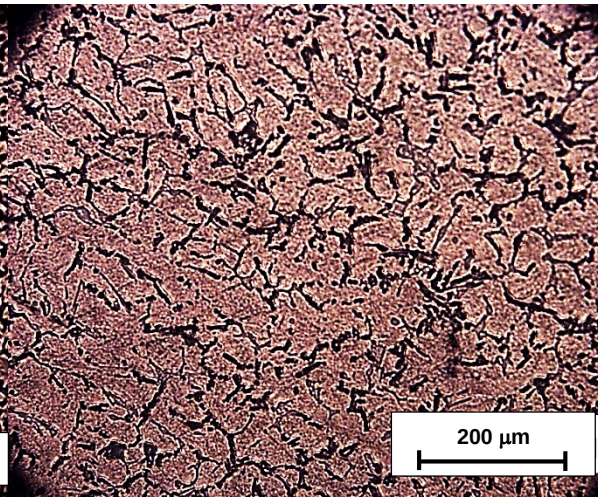


Figura 4. 10. Aleación con 0.8%Mg, 200x.

En las figuras 4.11. y 4.12. se muestra la pieza con 1.0%Mg.

Figura 4. 11. Aleación con 1.0%Mg, 100x.

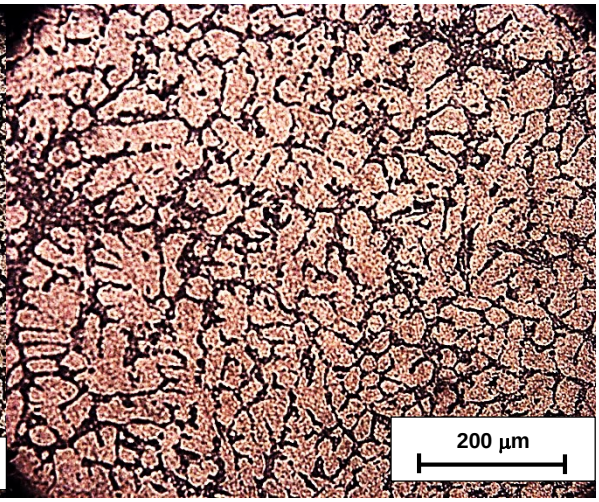


Figura 4. 12. Aleación con 1.0%Mg, 200x.

Analizando la microestructura se observa que a medida que aumenta el Mg, se forman fases adicionales. También se tiene un cambio en la morfología del Si eutéctico, para niveles bajos de 0.2 a 0.4 %Mg presenta una morfología de placas y/o agujas, mientras que para niveles de 0.8 a 1.0 %Mg la morfología es más globular. En otras palabras el Mg promueve un efecto similar a la modificación cuando se adiciona Sr, pero con un efecto más ligero.

Niveles bajos de Mg no promueven la formación de inclusiones de MgO [10], que en general se observan como puntos negros que manchan las piezas durante la etapa de pulido.

De acuerdo a los resultados de dureza el contenido de Mg tiene un efecto sobre está, incrementándose de 59 HBN para la aleación con 0.2 %Mg hasta 82.5 HBN para la aleación con 0.8 %Mg, punto en el que alcanza la máxima dureza. Este incremento se puede asociar a la formación de intermetálicos ricos en Mg y a la modificación parcial del Si eutéctico.

En relación a la fluidez el Mg la incrementa desde 106 cm hasta un máximo de 122 cm que se alcanza con la aleación que tiene 0.8 %Mg. Esto se puede asociar

al efecto que tiene el Mg en el patrón de solidificación y/o al efecto que tiene en la tensión superficial de la aleación en estado líquido.

4.6. Resultados de pulibilidad (METALART).

En la tabla 4.5. se muestran los datos obtenidos en los pasos que se les aplicaron a las piezas, se observan 3 niveles de dificultad en la pulibilidad de las piezas conforme a los comentarios dados por el departamento de pulido y acabado.

Tabla 4. 5. Datos obtenidos por el departamento de pulido y acabado, en las etapas de pulido de las piezas.

Pieza	Composición Química			Fácil	Intermedio	Difícil	Comentario
	%Mg	Condición					
1	0.08	Patrón	Desbaste				Suave para pulir
2	0.2	Liga					Buen corte, desliza bien, resistencia baja
3	0.4	Liga					Mucho mejor, no se adhiere a la lija
4	0.6	Liga					Mucha resistencia, se amarra a la lija
5	0.8	Liga					Más resistencia al pulir, se amarra a la lija
6	1	Liga					Suave para pulir
Pieza	**Composición Química**			**Fácil**	**Intermedio**	**Difícil**	**Comentario**
	%Mg	**Condición**					
1	0.08	Patrón	Desbaste 100				Muy buena
2	0.2	Liga					Poca fricción, fácil manejo
3	0.4	Liga					se desliza mejor que 0.5 y 0.6, mayor mecanizado para quitar rayas
4	0.6	Liga					Da más resistencia
5	0.8	Liga					Bueno no se adhiere
6	1	Liga					Corte bien, muy suave

Tabla 4. 5. Continuación.

Pieza	Composición Química		Asentado 240 Interior	Fácil	Intermedio	Difícil	Comentario
	%Mg	Condición					
1	0.08	Patrón					No ofrece resistencia, suave
2	0.2	Liga					Buen corte, desliza rápido
3	0.4	Liga					Se adhiere, mucha resistencia
4	0.6	Liga					Ofrece más resistencia, más pasadas para obtener un buen acabado
5	0.8	Liga					Ofrece más resistencia, más pasadas para obtener un buen acabado
6	1	Liga					Suave desbaste muy rápido
Pieza	**Composición Química**		**Asentado 240 Exterior**	**Fácil**	**Intermedio**	**Difícil**	**Comentario**
	%Mg	**Condición**					
1	0.08	Patrón					Corta bien
2	0.2	Liga					Suave, resistencia al lijado pero fácil eliminación de rayas anteriores, es sencilla.
3	0.4	Liga					Más duro que la anterior, mayor presión, difícil de lijar
4	0.6	Liga					Dureza menor que la anterior, parecido a la Primera
5	0.8	Liga					Más difícil borrar rayas anteriores, más presión, deja mucho detalle, más dura
6	1	Liga					Fácil para cortar, se trabajó más rápido, poca resistencia

Pieza	Composición Química		Sisal Exterior	Fácil	Intermedio	Difícil	Comentario
	%Mg	Condición					
1	0.08	Patrón					Duro Metal
2	0.2	Liga					Mayor dureza a lo anterior
3	0.4	Liga					Ofrece mayor resistencia a las anteriores
4	0.6	Liga					Igual que la anterior
5	0.8	Liga					Muy sencillo pulir
6	1	Liga					Suave, poca presión, borra rayas del lijado
Pieza	**Composición Química**		**Sisal Interior**	**Fácil**	**Intermedio**	**Difícil**	**Comentario**
	%Mg	**Condición**					
1	0.08	Patrón					Cuesta mucho el pulido
2	0.2	Liga					Más suave que la anterior, mejor pulido
3	0.4	Liga					Más suave que la anterior
4	0.6	Liga					Muy suave, ofrece buena resistencia al pulido, buen corte
5	0.8	Liga					Más resistente la raya, mayor presión deja más detalle
6	1	Liga					Pulido rápido, suave

Tabla 4. 5. Continuación.

Pieza	Composición Química			Fácil	Intermedio	Difícil	Comentario
	%Mg	Condición					
1	0.08	Patrón	Brillo Exterior				Muy fácil
2	0.2	Liga					Suave buen brillo
3	0.4	Liga					Suave, buen brillo
4	0.6	Liga					Bueno, mejor que los otros
5	0.8	Liga					Como la primera
6	1	Liga					Más fácil que la primera
Pieza	**Composición Química**			**Fácil**	**Intermedio**	**Difícil**	**Comentario**
	%Mg	**Condición**					
1	0.08	Patrón	Brillo Exterior				Dura, difícil para obtener brillo
2	0.2	Liga					Suave
3	0.4	Liga					Suave
4	0.6	Liga					como la primera
5	0.8	Liga					Más suave que la anterior
6	1	Liga					un poco más suave que la anterior

A continuación se muestran la evaluación obtenida de todo el proceso de acabado y pulido de las piezas, como se observa en la tabla 4.6. donde se sesga todos los resultados anteriores del proceso de pulido y brillo de las piezas en bueno y malo, esto definiéndolo como la dificultad en la pulibilidad de las piezas en cada paso del proceso que se evaluó, dando un valor de 1 punto a cada resultado.

Tabla 4. 6. Datos obtenidos de la evaluación en cada paso del proceso de pulido.

Composición Química		Evaluación	Desbaste	Desbaste 100
%Mg	Condición			
0.08	Patrón		Bueno	Bueno
0.2	Liga		Malo	Bueno
0.4	Liga		Bueno	Bueno
0.6	Liga		Malo	Malo
0.8	Liga		Malo	Bueno
1	Liga		Bueno	Bueno
Composición Química		**Evaluación**	**Asentado 240 Interior**	**Asentado 240 Exterior**
%Mg	**Condición**			
0.08	Patrón		Bueno	Bueno
0.2	Liga		Bueno	Bueno
0.4	Liga		Malo	Malo
0.6	Liga		Malo	Bueno
0.8	Liga		Malo	Malo
1	Liga		Bueno	Bueno

Composición Química		Evaluación	Sisal Interior	Sisal Exterior
%Mg	Condición			
0.08	Patrón		Malo	Malo
0.2	Liga		Bueno	Malo
0.4	Liga		Bueno	Malo
0.6	Liga		Bueno	Bueno
0.8	Liga		Malo	Bueno
1	Liga		Bueno	Bueno
Composición Química		**Evaluación**	**Brillo Interior**	**Brillo Exterior**
%Mg	**Condición**			
0.08	Patrón		Bueno	Malo
0.2	Liga		Bueno	Bueno
0.4	Liga		Bueno	Bueno
0.6	Liga		Bueno	Bueno
0.8	Liga		Bueno	Bueno
1	Liga		Bueno	Malo

En la tabla 4.7. se concentran los resultados totales con su respectivo valor numérico al evaluarlos, donde se multiplico por 10 siendo este valor la calificación más alta y se dividió por los 8 procesos utilizados.

Tabla 4. 7.Resultados de la evaluación obtenidos de las piezas.

Pieza	Composición Química		Resultados	Bueno	Malo	Durezas Brinell	Comentario
	%Mg	Condición					
1	0.08	Patrón		6.25	3.75	59.0	Patrón
2	0.2	Liga		7.5	2.5	60.2	Descartada
3	0.4	Liga		6.25	3.75	65.7	Descartada
4	0.6	Liga		**6.25**	3.75	**74.5**	2
5	0.8	Liga		5	5	82.6	Similar al patrón
6	1.0	Liga		**8.75**	1.25	**71.9**	1

Al observar los resultados de la evaluación de cada pieza podemos asumir que la pieza con 1.0%Mg es la que presento mayor calificación, pero se observó un cambio en el oscurecimiento del brillo de la pieza, pasando de un brillo con tendencias amarillentas a uno con tonalidades azuladas, en las figuras 4.13. y 4.14. se muestran las piezas ya terminadas.

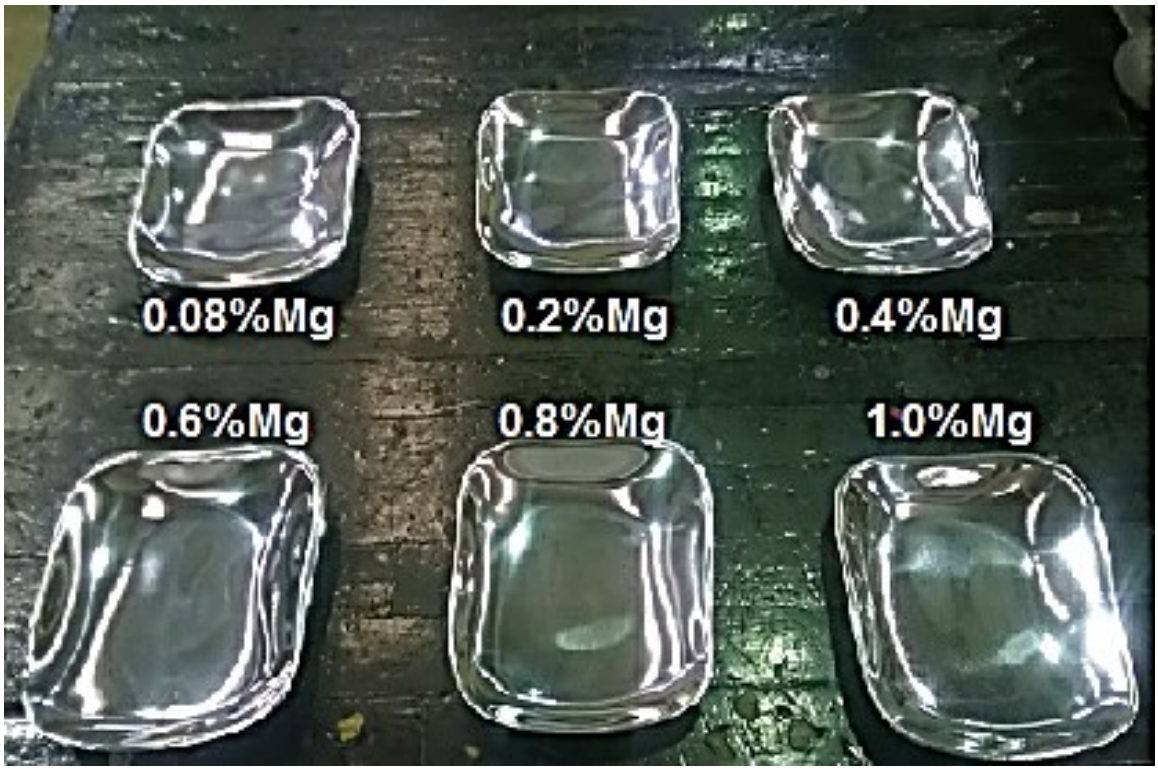


Figura 4. 13. Piezas terminadas vista frontal.

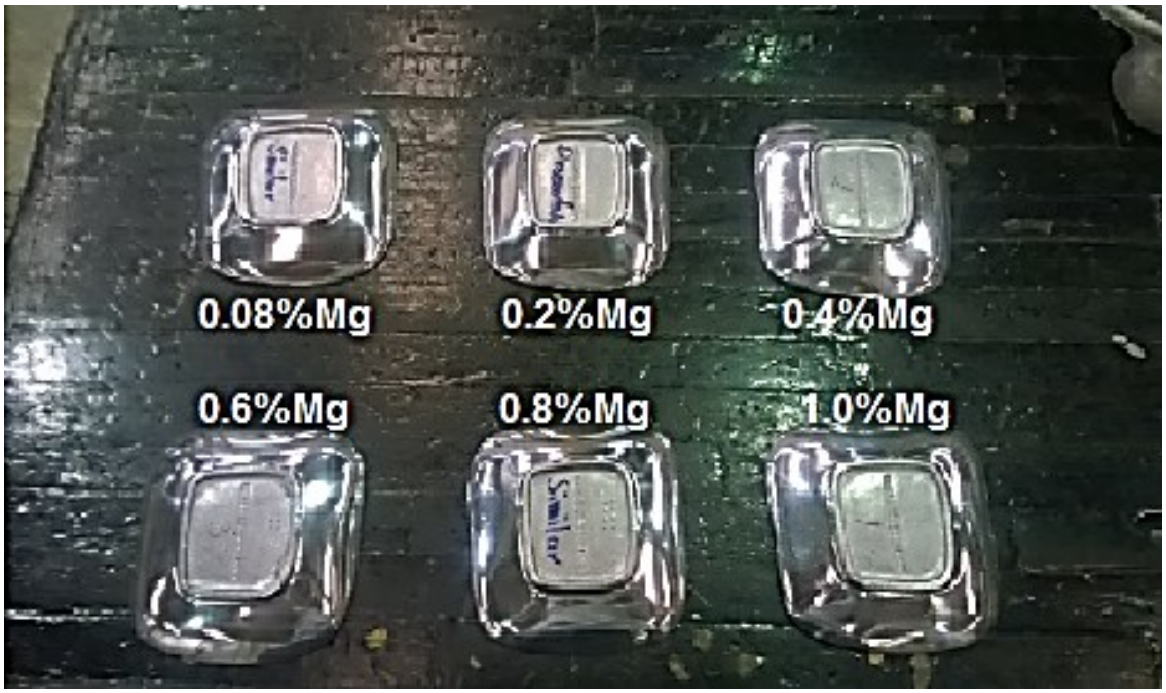
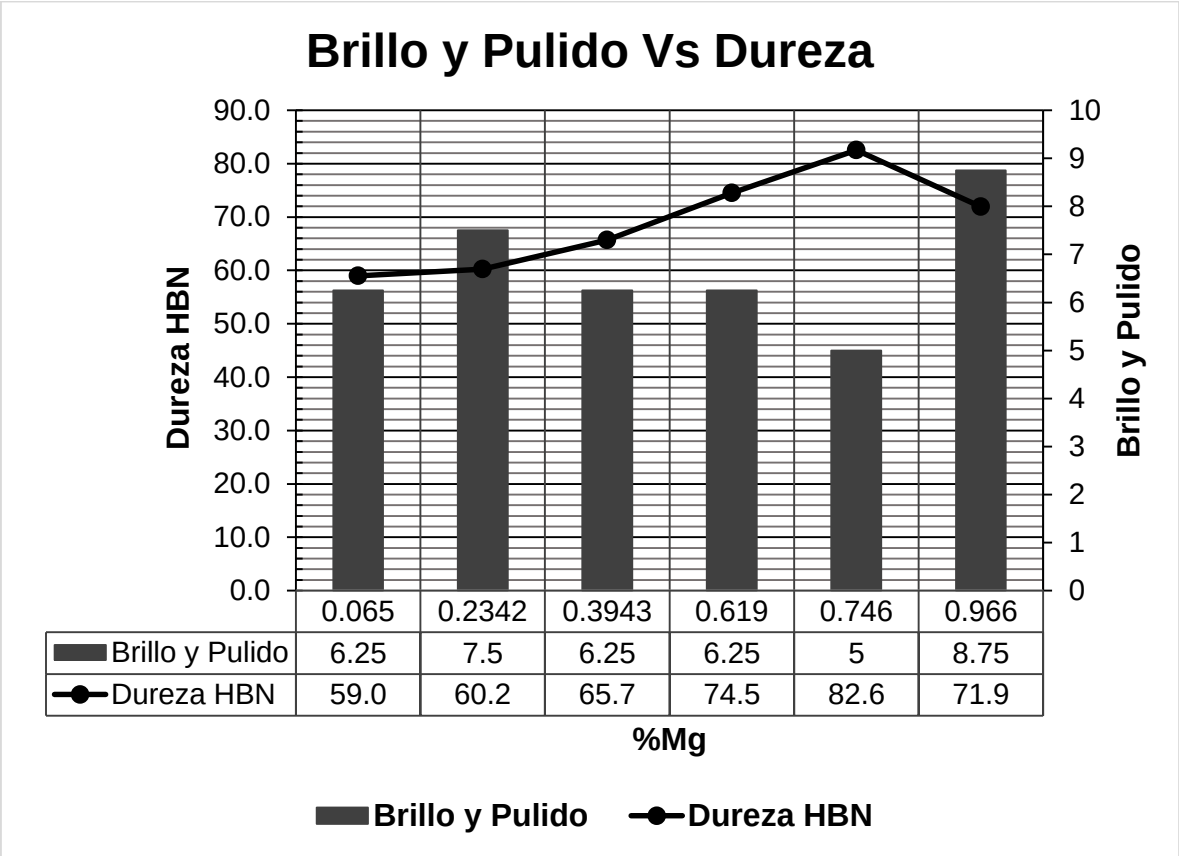


Figura 4. 14. Piezas terminadas vista posterior.

En la gráfica 4.3. podemos observar la relación entre la dureza y los resultados evaluados por el Departamento de Pulido y Calidad de la empresa METALART con relación al porcentaje de magnesio.



Gráfica 4. 3. Resultados obtenidos de las piezas evaluadas.

Al comparar todos los resultados obtenidos, podemos observar que la dureza optima debe estar entre el rango de 60 y 70 HBN para evitar el incremento del tiempo de trabajo en las piezas y que al aumentar el contenido de magnesio el efecto de opacamiento da resultados más favorables.

CAPITULO 5.

5. CONCLUSIONES.

El efecto de llenado de las piezas tiene relación con la fluidez del metal ya que el valor obtenido más bajo fue lo suficientemente bueno para obtener piezas sanas, por lo que no se tuvo problemas con las posteriores piezas.

Al relacionar la dureza con la pulibilidad (lijado y pulido) de las piezas se puede concluir que entre mayor sea la dureza mejor es el acabado superficial, ya que no se presenta empastamiento en los equipos y no hay marcas superficiales provocadas por el lijado que se aplica antes del proceso de pulido. Sin embargo una dureza muy alta provocaría un mayor desgaste en los equipos y mayor tiempo en el trabajo de cada pieza. Por lo que una adecuada relación de dureza-pulibilidad se obtienen los mejores resultados en el proceso de abrillantado, siendo en este caso la pieza con 1.0%Mg y una dureza de 71.9 HBN, que es importante para el departamento de pulido y acabado y del departamento de calidad.

Se concluye que a mayor incremento en el contenido de magnesio se presenta el opacamiento de las piezas obteniendo a luz fluorescente una tonalidad azulada que le da una presentación más elegante y una semejanza a la plata.

Los altos niveles de Mg ensayados no provocan la presencia excesiva de inclusiones negras de MgO que manchan las piezas en el pulido, para controlar su presencia es adecuado tener una buena práctica de la técnica de fusión.

BIBLIOGRAFÍA.

[1] Universidad Catolica Argentina, Aluminio y sus aleaciones,Estudio y ensayo de materiales, Argentina, 2008.

[2] G. E. Totten y D. S. MacKenzie, «Handbook of Aluminum,» de *Physical Metalurgy and Processes, Vol. 1*, NY, USA, Marcel Dekker Inc., 2003.

[3] J. Hogerl, S. Spaic y H. Tensi, «Optical, Microscopy and Submicroscopy Structure Morphology of the Alloy A357super,» *Aluminum,* vol. 74, nº 10, pp. 780-788, Jahrgang, Alemania, 1998.

[4] W. Elsen, P. C. Van Wiggen, G. Chai y L. Backerud, «On the Sr Modification on Al-Si Alloys,» *3rd International Conference of Al Alloys, Norwegian Inst. of Techn.,* p. 75, June 1992.

[5] V. Lavaert, M. Moors, E. Wettinck, R. Castañeda y L. Goyos, «Influencia del Contenido de Mg, Cu y Ni en la Estructura y Propiedades Mecánicas de las Aleaciones Al-7Si Fundidas,» *Revista Ingeniería Mecánica,* vol. 6, nº 2, pp. 59-63, Cuba, 2003.

[6] K. O'Relly y B. Cantor, Solidification and Casting, London, UK: Institute of Physics Publishing, 2003.

[7] W. Hufnagel, Manual del Aluminio, España: Reverté S. A., 1995.

[8] V. S. Zolotorevsky, N. A. Belov y M. V. Glazoff, Casting Aluminum Alloy, London, UK: Elservier, 2007.

[9] M. P. Gloover, Fundamentos de Manufactura Moderna, Massachusetts, USA: Pearson Prentice Hall, 1997.

[10] E. Bedolla y A. Contreras, «Fabricación y caracterización de materiales compuestos de matriz metálica Al-Cu y Al-Mg reforzados con partículas de TiC,» *Revista Mexicana de Física,* vol. 5, nº 50, pp. 495-500, Octubre, 2004.

[11] J. L. Díaz Rojas, Efecto de la relación Fe/Cu y bajos contenidos de Ni en la dureza y abrillantado de piezas de aluminio coladas en molde de arena en verde, Mexico, D.F.: Tesis Licenciatura, UNAM, 2012.

[12] A. R. Garrido Meneses y V. H. Sánchez Taco, Determinación de la metodología para la obtención de aleaciones de aluminio de fundición maquinables sin porosidades, Quito, Perú: Tesis Licenciatura, Escuela Politécnica Nacional, 2011.

[13] J. R. Kissell y R. L. Ferry, Aluminum Structures: A Guide to Their Specifications and Design, NY, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2002.

[14] M. L. Sharp, Aluminum Structures: Structural Engineering Handbook, USA: CRC Press LLC, 1999.

[15] J. Campbell, Castings, London, UK: Butterworth Heinemann, 2003.

[16] J. G. Kaufman y E. L. Rooy, Aluminum Alloys Castings: Properties, Processes, and Applications, Ohio, USA: ASM International, 2004.

[17] M. B. Djurdjevic, Z. Odanovic y J. Pavlovic-Krstic, «Melt quality control at Aluminum casting plants,» *Association of Metallurgical Engineers of Serbia,* vol. 16, nº 1, pp. 63-76, Serbia, 2010.

[18] D. Apelian, Aluminum Cast Alloys: Enabling Tools for Imploved Performance, Illinois, USA: NADCA, 2009.

[19] ASM Handbook, «Casting,» de *Metals Handbook, Vol. 15*, USA, ASM International, 1990.

[20] ASM Handbook, «Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials,» de *Metals Handbook, Vol. 2*, USA, ASM International, 1990.

[21] ASTM E10-00, *Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials,* West Conshohocken, PA: ASTM International, 2004, DOI: 10.1250/E0010-00, www.astm.org.

[22] ASTM E407-99, *Microetching Metals and Alloys,* West Conshohocken, PA: ASTM International, 2004, DOI: 10.1250/E0407-99, www.astm.org.

ANEXOS.

Anexo 1. Ejemplo de Balance de Carga.

A continuación se ejemplifican dos balances de carga que se realizaron para la fabricación de:

1. 1 Kg de la aleación maestra con 48%Mg.

   El contenido de Magnesio se considerará como 100% puro, para la facilidad del cálculo ya que las impurezas pueden ser despreciables para este caso.

   Formula:

$$C.Q.Reqerida\ [gr] = Peso\ Total\ [gr]\left(\frac{\%Mg\ a\ fabricar}{100\%}\right)$$

   Calculo:

$$1Kg\left(\frac{48\%}{!\,00\%}\right) = 0.48Kg\left(\frac{1000g}{1Kg}\right) = 480g\ de\ Mg$$

   Por lo tanto:
   Se necesitan 480 g de Mg para fabricar 1 Kg de la aleación maestra.

2. Y 4 Kg para las aleaciones de cada pieza fabricada, solo se realizara la de 0.2%Mg.

Los datos a utilizar son:

a. Porcentaje de Mg de la aleación maestra: 47.76%Mg.
b. Porcentaje de Mg de la aleación 443MA: 0.0721%Mg.
c. Eficiencia del Mg a utilizar: 92%.
d. C. Q. Requerida: 0.2%Mg.
e. Carga a fabricar: 4.0 Kg

Formulas:

$$C.Q.Requerida\ [g] = Peso\ Total\ [g]\left(\frac{\%Mg\ a\ fabricar}{100\%}\right)\left(\frac{100\%}{\%Eficiencia}\right)$$

$$C.Q.Requerida\ [g] = Aleación\ METALART\ [g] + Aleación\ maestra\ Al - Mg\ [g]$$

Calculo:

$$C.Q.Req[g] = 4000g\left(\frac{0.2\%}{100\%}\right)\left(\frac{100\%}{92\%}\right) = 8.696g$$

$$Aleación\ METALART = \left(\frac{0.0721\%}{100\%}\right) = 0.000721g$$

$$Aleación\ maestra\ Al - Mg = \left(\frac{47.76\%}{100\%}\right) = 0.4776g$$

Por lo tanto se agregara de aleación maestra Al-Mg:

$$\left(\frac{8.696g - 0.000721g}{0.4776g}\right) = 18.207g$$

Anexo 2. Composición química obtenida por espectrometría de absorción atómica.

- Análisis obtenido para la aleación maestra Al-Mg.

Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Química

Departamento de Ingeniería Metalúrgica

Laboratorio de Análisis Químico

Solicitante		Julio Ramos				**Observac.**
# de solicitud		001/2013	**# de muestras**		1	***1/200**
Fecha de recepción		08-ene-13	**# de elementos**		1	
Fecha de entrega		09-ene-13	**Total de análisis**		1	
Peso Muestra [gr]		0.1005				
Muestra	**Mg (ppm)**	**% Mg**				
Al-Mg	**2.4**	47.761194				

- Análisis obtenido de la prueba de un lingote Al-1.4%Mg.

Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Química

Departamento de Ingeniería Metalúrgica

Laboratorio de Análisis Químico

Solicitante		Julio Ramos				**Observac.**
# de solicitud		005/2013	**# de muestras**		1	***1/50**
Fecha de recepción		17-ene-13	**# de elementos**		1	
Fecha de entrega		21-ene-13	**Total de análisis**		1	
Peso Muestra [gr]		0.1008				
Muestra	**Mg (ppm)**	**% Mg**				
Al-Mg	**0.3**	1.48809524				

Anexo 3. Composiciones química obtenidas por espectrometría de emisión atómica en la UNAM.

- Análisis obtenido para la homogenización de la aleación proporcionada por la empresa METALART (60 Kg).

Program: AL-011 — *01/30/2012 12:49:38 PM*
Comment: FACULTAD DE QUIMICA UNAM TRABAJO GLOBAL
Single spark(s) — *Elements: Concentration*

Muestra No.: METALART (COMP. QUIM. HOMOGENE — *Quality:*
Usuario: JORGE ROJAS-JULIO RAMOS — *Analista: M EN I AGUSTIN G. RUIZ TAMAYO*
Comentarios: PROYECTO-TESIS

No	Si %	Fe %	Cu %	Mn %	Mg %	Zn %	Ni %	Cr %	Pb %
1	5.74	0.2948	0.4328	0.0446	0.0866	0.0273	0.0138	0.0074	0.0052
2	5.78	0.2862	0.3943	0.0428	0.0839	0.0270	0.0124	0.0073	0.0049
3	5.81	0.2895	0.4250	0.0435	0.0878	0.0270	0.0135	0.0077	0.0054
4	5.81	0.2917	0.4355	0.0442	0.0871	0.0262	0.0133	0.0072	0.0053
5	5.72	0.2862	0.4135	0.0421	0.0855	0.0268	0.0121	0.0067	0.0051
6	5.76	0.3133	0.4465	0.0449	0.0901	0.0273	0.0138	0.0071	0.0057
7	6.00	0.3061	0.4377	0.0430	0.0863	0.0268	0.0136	0.0078	0.0055
8	5.71	0.3077	0.4342	0.0447	0.0863	0.0292	0.0136	0.0074	0.0058
9	5.77	0.3003	0.4325	0.0434	0.0883	0.0272	0.0129	0.0070	0.0056
10	5.68	0.3020	0.4446	0.0452	0.0890	0.0269	0.0135	0.0072	0.0057

No	Ti %	V %	Co %	Sr %	Al %
1	0.1466	0.0088	<0.0020	0.0002	93.2
2	0.1444	0.0086	<0.0020	0.0002	93.2
3	0.1412	0.0080	<0.0020	0.0002	93.1
4	0.1442	0.0083	<0.0020	0.0001	93.1
5	0.1402	0.0076	<0.0020	0.0001	93.2
6	0.1447	0.0084	<0.0020	0.0002	93.1
7	0.1449	0.0081	<0.0020	0.0001	92.9
8	0.1462	0.0085	<0.0020	0.0002	93.2
9	0.1410	0.0079	<0.0020	0.0001	93.2
10	0.1447	0.0083	<0.0020	0.0001	93.2

Program: AL-011 — *01/30/2012 12:49:38 PM*
Comment: FACULTAD DE QUIMICA UNAM TRABAJO GLOBAL
Average (n=10) — *Elements: Concentration*

Muestra No.: METALART (COMP. QUIM. HOMOGENE — *Quality:*
Usuario: JORGE ROJAS-JULIO RAMOS — *Analista: M EN I AGUSTIN G. RUIZ TAMAYO*
Comentarios: PROYECTO-TESIS

	Si %	Fe %	Cu %	Mn %	Mg %	Zn %	Ni %	Cr %	Pb %
$\bar{x}$	5.78	0.2978	0.4297	0.0439	0.0871	0.0272	0.0133	0.0073	0.0054

	Ti %	V %	Co %	Sr %	Al %
$\bar{x}$	0.1438	0.0083	<0.0020	0.0002	93.2

- Análisis obtenido de la prueba de un lingote Al-1.4%Mg.

02/11/2013 02:45:52 PM

Program: AL-011
Comment: FACULTAD DE QUIMICA UNAM TRABAJO GLOBAL
Single spark(s)

Elements: Concentration

Muestra No.: Al-Mg PRUEBA 1
Usuario: RAMOS PLAZA ANGEL JULIO
Comentarios: TESIS LIC.

Quality:
Analista: ADRIAN M. AMARO VILLEDA

No	Si %	Fe %	Cu %	Mn %	Mg %	Zn %	Ni %	Cr %	Pb %
1	0.1075	0.1264	0.0022	0.0076	1.430	<0.0050	0.0047	<0.0010	<0.0020
2	0.1138	0.1403	0.0022	0.0076	1.472	<0.0050	0.0051	<0.0010	<0.0020
3	0.1090	0.1274	0.0020	0.0075	1.447	<0.0050	0.0047	<0.0010	<0.0020

No	Ti %	V %	Co %	Sr %	Al %
1	0.0057	0.0142	<0.0020	0.0002	98.3
2	0.0057	0.0143	<0.0020	0.0002	98.2
3	0.0057	0.0141	<0.0020	0.0002	98.3

02/11/2013 02:45:52 PM

Program: AL-011
Comment: FACULTAD DE QUIMICA UNAM TRABAJO GLOBAL
Average (n=3)

Elements: Concentration

Muestra No.: Al-Mg PRUEBA 1
Usuario: RAMOS PLAZA ANGEL JULIO
Comentarios: TESIS LIC.

Quality:
Analista: ADRIAN M. AMARO VILLEDA

	Si %	Fe %	Cu %	Mn %	Mg %	Zn %	Ni %	Cr %	Pb %
$\bar{x}$	**0.1101**	**0.1314**	**0.0021**	**0.0076**	**1.450**	**<0.0050**	**0.0048**	**<0.0010**	**<0.0020**

	Ti %	V %	Co %	Sr %	Al %
$\bar{x}$	**0.0057**	**0.0142**	**<0.0020**	**0.0002**	**98.3**

- Análisis obtenido para la pieza fabricada con 0.2%Mg.

Program: AL-011 ***02/18/2013 12:11:33 PM***
Comment: FACULTAD DE QUIMICA UNAM TRABAJO GLOBAL
Single spark(s) ***Elements: Concentration***

Muestra No.: Al-0.2%Mg *Quality:*
Usuario: RAMOS PLAZA ANGEL JULIO *Analista: ADRIAN M. AMARO VILLEDA*
Comentarios: TESIS DE LICENCIATURA

No	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Cr	Pb
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1	5.86	0.2949	0.4165	0.0429	0.2371	0.0243	0.0129	0.0072	0.0048
2	5.75	0.2912	0.4156	0.0431	0.2304	0.0241	0.0128	0.0070	0.0049
3	5.79	0.2914	0.4169	0.0433	0.2350	0.0242	0.0128	0.0070	0.0050

No	Ti	V	Co	Sr	Al
	%	%	%	%	%
1	0.1424	0.0094	<0.0020	0.0002	93.0
2	0.1460	0.0093	<0.0020	0.0002	93.1
3	0.1377	0.0089	<0.0020	0.0001	93.0

Program: AL-011 ***02/18/2013 12:11:33 PM***
Comment: FACULTAD DE QUIMICA UNAM TRABAJO GLOBAL
Average (n=3) ***Elements: Concentration***

Muestra No.: Al-0.2%Mg *Quality:*
Usuario: RAMOS PLAZA ANGEL JULIO *Analista: ADRIAN M. AMARO VILLEDA*
Comentarios: TESIS DE LICENCIATURA

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Cr	Pb
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
$\bar{x}$	**5.80**	**0.2925**	**0.4163**	**0.0431**	**0.2342**	**0.0242**	**0.0128**	**0.0071**	**0.0049**

	Ti	V	Co	Sr	Al
	%	%	%	%	%
$\bar{x}$	**0.1420**	**0.0092**	**<0.0020**	**0.0001**	**93.0**

- Análisis obtenido para la pieza fabricada con 0.4%Mg.

Program: AL-011
Comment: FACULTAD DE QUIMICA UNAM TRABAJO GLOBAL **02/11/2013 02:50:24 PM**
Single spark(s)

Elements: Concentration

Muestra No.: PRELIMINAR 1
Usuario: ANGEL JULIO RAMOS PLAZA
Comentarios: PROYECTO-TESIS

Quality:
Analista: M EN I ADRIAN M AMARO VILLEDA

No	Si %	Fe %	Cu %	Mn %	Mg %	Zn %	Ni %	Cr %	Pb %
1	5.85	0.2903	0.4180	0.0453	0.3921	0.0300	0.0127	0.0072	0.0048
2	5.79	0.2886	0.4148	0.0449	0.3956	0.0306	0.0125	0.0072	0.0046
3	5.85	0.2827	0.4075	0.0438	0.3950	0.0290	0.0125	0.0072	0.0044

No	Ti %	V %	Co %	Sr %	Al %
1	0.1351	0.0107	<0.0020	0.0001	92.8
2	0.1379	0.0106	<0.0020	0.0001	92.9
3	0.1400	0.0115	<0.0020	0.0002	92.8

Program: AL-011
Comment: FACULTAD DE QUIMICA UNAM TRABAJO GLOBAL **02/11/2013 02:50:24 PM**
Average (n=3)

Elements: Concentration

Muestra No.: PRELIMINAR 1
Usuario: ANGEL JULIO RAMOS PLAZA
Comentarios: PROYECTO-TESIS

Quality:
Analista: M EN I ADRIAN M AMARO VILLEDA

	Si %	Fe %	Cu %	Mn %	Mg %	Zn %	Ni %	Cr %	Pb %
$\bar{x}$	**5.83**	**0.2872**	**0.4134**	**0.0446**	**0.3943**	**0.0299**	**0.0125**	**0.0072**	**0.0046**

	Ti %	V %	Co %	Sr %	Al %
$\bar{x}$	**0.1377**	**0.0109**	**<0.0020**	**0.0001**	**92.8**

- Análisis obtenido para la pieza fabricada con 0.6%Mg.

Program: AL-011 **02/26/2013 07:46:57 PM**
Comment: FACULTAD DE QUIMICA UNAM TRABAJO GLOBAL
Single spark(s) **Elements: Concentration**

Muestra No.: Al-0.65%Mg (20 min d calor)
Usuario: ANGEL JULIO RAMOS PLAZA
Comentarios: PROYECTO-TESIS
Quality:
Analista: M EN I ADRIAN M AMARO VILLEDA

No	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Cr	Pb
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1	5.89	0.2631	0.4152	0.0441	0.602	0.0231	0.0120	0.0074	0.0038
2	5.97	0.2704	0.4121	0.0445	0.619	0.0235	0.0121	0.0074	0.0038
3	5.95	0.2732	0.4231	0.0450	0.630	0.0236	0.0124	0.0074	0.0041
4	6.04	0.2684	0.4139	0.0432	0.624	0.0233	0.0119	0.0072	0.0037

No	Ti	V	Co	Sr	Al
	%	%	%	%	%
1	0.1375	0.0100	<0.0020	0.0003	92.6
2	0.1317	0.0095	<0.0020	0.0002	92.5
3	0.1305	0.0094	<0.0020	0.0002	92.5
4	0.1343	0.0096	<0.0020	0.0003	92.4

Program: AL-011 **02/26/2013 07:46:57 PM**
Comment: FACULTAD DE QUIMICA UNAM TRABAJO GLOBAL
Average (n=4) **Elements: Concentration**

Muestra No.: Al-0.65%Mg (20 min d calor)
Usuario: ANGEL JULIO RAMOS PLAZA
Comentarios: PROYECTO-TESIS
Quality:
Analista: M EN I ADRIAN M AMARO VILLEDA

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Cr	Pb
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
$\bar{x}$	5.96	0.2688	0.4161	0.0442	0.619	0.0234	0.0121	0.0073	0.0039

	Ti	V	Co	Sr	Al
	%	%	%	%	%
$\bar{x}$	0.1335	0.0096	<0.0020	0.0002	92.5

- Análisis obtenido para la pieza fabricada con 0.8%Mg.

Program: AL-011 **04/29/2013 11:59:20 AM**
Comment: FACULTAD DE QUIMICA UNAM TRABAJO GLOBAL
Single spark(s) **Elements: Concentration**

Muestra No.: Al-Mg (07 marzo 13)
Usuario: Angel Julio Ramos Plaza
Comentarios: Asignatura: Proyecto

Quality:
Analista: M en I Agustin G Ruiz Tamayo

No	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Cr	Pb
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1	5.91	0.2938	0.541	0.0435	0.762	0.0275	0.0126	0.0068	0.0055
2	5.97	0.2935	0.529	0.0439	0.742	0.0285	0.0125	0.0070	0.0055
3	5.84	0.2907	0.528	0.0439	0.735	0.0276	0.0126	0.0070	0.0053

No	Ti	V	Co	Sr	Al
	%	%	%	%	%
1	0.1304	0.0077	<0.0020	0.0001	92.3
2	0.1310	0.0081	<0.0020	0.0001	92.2
3	0.1360	0.0084	<0.0020	0.0001	92.4

Program: AL-011 **04/29/2013 11:59:20 AM**
Comment: FACULTAD DE QUIMICA UNAM TRABAJO GLOBAL
Average (n=3) **Elements: Concentration**

Muestra No.: Al-Mg (07 marzo 13)
Usuario: Angel Julio Ramos Plaza
Comentarios: Asignatura: Proyecto

Quality:
Analista: M en I Agustin G Ruiz Tamayo

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Cr	Pb
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
$\bar{x}$	**5.91**	**0.2927**	**0.533**	**0.0438**	**0.746**	**0.0279**	**0.0126**	**0.0069**	**0.0054**

	Ti	V	Co	Sr	Al
	%	%	%	%	%
$\bar{x}$	**0.1325**	**0.0081**	**<0.0020**	**0.0001**	**92.3**

- Análisis obtenido para la pieza fabricada con 1.0%Mg.

Program: AL-011 ***02/18/2013 12:08:16 PM***
Comment: FACULTAD DE QUIMICA UNAM TRABAJO GLOBAL
Single spark(s) ***Elements: Concentration***

Muestra No.: Al-0.8% Mg *Quality:*
Usuario: RAMOS PLAZA ANGEL JULIO *Analista: ADRIAN M. AMARO VILLEDA*
Comentarios: TESIS DE LICENCIATURA

No	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Cr	Pb
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1	5.83	0.2957	0.4158	0.0436	0.967	0.0246	0.0132	0.0069	0.0048
2	5.82	0.2971	0.4110	0.0434	0.963	0.0241	0.0129	0.0071	0.0048
3	5.82	0.3019	0.4102	0.0435	0.968	0.0248	0.0129	0.0070	0.0046

No	Ti	V	Co	Sr	Al
	%	%	%	%	%
1	0.1398	0.0094	<0.0020	0.0001	92.2
2	0.1416	0.0096	<0.0020	0.0001	92.3
3	0.1401	0.0094	<0.0020	0.0001	92.3

Program: AL-011 ***02/18/2013 12:08:16 PM***
Comment: FACULTAD DE QUIMICA UNAM TRABAJO GLOBAL
Average (n=3) ***Elements: Concentration***

Muestra No.: Al-0.8% Mg *Quality:*
Usuario: RAMOS PLAZA ANGEL JULIO *Analista: ADRIAN M. AMARO VILLEDA*
Comentarios: TESIS DE LICENCIATURA

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ni	Cr	Pb
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
$\bar{x}$	5.82	0.2982	0.4123	0.0435	0.966	0.0245	0.0130	0.0070	0.0047

	Ti	V	Co	Sr	Al
	%	%	%	%	%
$\bar{x}$	0.1405	0.0095	<0.0020	0.0001	92.3

Anexo 4. Composiciones química obtenidas por espectrometría de emisión atómica en la empresa METALART.

- Análisis obtenido de la prueba de un lingote Al-1.4%Mg.

Program: Al-01-D 11/06/2013 05:35:48 PM
Comment: Al-Global METALART
Single spark(s) Elements: Concentration

NUMERO: 6 MUESTRAS CALIDAD: 02-AS275/1
NOMBRE: JULIO RAMOS CLIENTE: TESIS MAGNESIO

No	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0.114	0.140	0.0015	<0.0005	1.48	<0.0005	0.0094	0.0091	<0.0020
2	0.116	0.146	0.0016	<0.0005	1.47	<0.0005	0.0096	0.0092	<0.0020
3	0.111	0.138	0.0013	<0.0005	1.49	<0.0005	0.0092	0.0081	<0.0020

No	Ag	B	Be	Bi	Ca	Co	Li	Na	Pb
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1	<0.0001	<0.0002	<0.0001	<0.0010	0.0007	<0.0010	<0.0002	0.0005	<0.0005
2	<0.0001	<0.0002	<0.0001	<0.0010	0.0010	<0.0010	<0.0002	0.0007	<0.0005
3	<0.0001	<0.0002	<0.0001	<0.0010	0.0008	<0.0010	<0.0002	0.0006	<0.0005

- Análisis obtenido para la pieza fabricada con 0.2%Mg.

Program: Al-01-D 11/06/2013 05:35:48 PM
Comment: Al-Global METALART
Single spark(s) Elements: Concentration

NUMERO: 6 MUESTRAS CALIDAD: 02-AS275/1
NOMBRE: JULIO RAMOS CLIENTE: TESIS MAGNESIO

No	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1	6.34	0.289	0.438	0.036	0.191	0.0047	0.015	0.037	0.127
2	6.21	0.287	0.428	0.036	0.190	0.0047	0.015	0.035	0.140
3	6.31	0.294	0.435	0.037	0.188	0.0047	0.015	0.036	0.135

No	Ag	B	Be	Bi	Ca	Co	Li	Na	Pb
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1	<0.0001	0.0004	<0.0001	<0.0010	0.0010	<0.0010	<0.0002	0.0003	0.0041
2	<0.0001	0.0006	<0.0001	<0.0010	0.0007	<0.0010	<0.0002	0.0003	0.0040
3	<0.0001	0.0005	<0.0001	<0.0010	0.0006	<0.0010	<0.0002	0.0003	0.0041

- Análisis obtenido para la pieza fabricada con 0.4%Mg.

Program: Al-01-D 11/06/2013 05:35:48 PM
Comment: Al-Global METALART
Single spark(s) Elements: Concentration

NUMERO: 6 MUESTRAS CALIDAD: 02-AS275/1
NOMBRE: JULIO RAMOS CLIENTE: TESIS MAGNESIO

No	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1	6.70	0.327	0.472	0.042	0.368	0.0048	0.016	0.041	0.121
2	6.63	0.321	0.451	0.041	0.355	0.0047	0.016	0.041	0.123
3	6.47	0.312	0.457	0.040	0.361	0.0046	0.016	0.041	0.125

No	Ag	B	Be	Bi	Ca	Co	Li	Na	Pb
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0.0060	0.0006	<0.0001	<0.0010	0.0007	<0.0010	<0.0002	0.0003	0.0048
2	0.0060	0.0005	<0.0001	<0.0010	0.0008	<0.0010	<0.0002	0.0005	0.0046
3	0.0059	0.0005	<0.0001	<0.0010	0.0005	<0.0010	<0.0002	0.0003	0.0043

- Análisis obtenido para la pieza fabricada con 0.6%Mg.

Program: Al-01-D 11/06/2013 05:35:48 PM
Comment: Al-Global METALART
Single spark(s) Elements: Concentration

NUMERO: 6 MUESTRAS CALIDAD: 02-AS275/1
NOMBRE: JULIO RAMOS CLIENTE: TESIS MAGNESIO

No	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1	6.56	0.306	0.456	0.039	0.64	0.0045	0.015	0.036	0.122
2	6.60	0.305	0.455	0.039	0.63	0.0046	0.016	0.036	0.122
3	6.68	0.312	0.442	0.040	0.63	0.0044	0.015	0.035	0.126

No	Ag	B	Be	Bi	Ca	Co	Li	Na	Pb
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1	<0.0001	0.0004	<0.0001	<0.0010	0.0005	<0.0010	<0.0002	0.0003	0.0046
2	<0.0001	0.0002	<0.0001	<0.0010	0.0012	<0.0010	<0.0002	0.0007	0.0044
3	<0.0001	0.0004	<0.0001	<0.0010	0.0009	<0.0010	<0.0002	0.0005	0.0041

- Análisis obtenido para la pieza fabricada con 0.8%Mg.

Program: Al-01-D 11/06/2013 05:35:48 PM
Comment: Al-Global METALART
Single spark(s) Elements: Concentration

NUMERO: 6 MUESTRAS CALIDAD: 02-AS275/1
NOMBRE: JULIO RAMOS CLIENTE: TESIS MAGNESIO

No	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1	6.83	0.321	0.59	0.041	0.73	0.0046	0.017	0.034	0.117
2	6.50	0.304	0.54	0.039	0.69	0.0045	0.016	0.035	0.111
3	6.49	0.310	0.55	0.040	0.70	0.0045	0.016	0.035	0.123

No	Ag	B	Be	Bi	Ca	Co	Li	Na	Pb
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1	<0.0001	0.0005	<0.0001	<0.0010	0.0013	<0.0010	<0.0002	0.0004	0.0049
2	<0.0001	0.0005	<0.0001	<0.0010	0.0007	<0.0010	<0.0002	0.0004	0.0046
3	<0.0001	0.0005	<0.0001	<0.0010	0.0010	<0.0010	<0.0002	0.0006	0.0046

- Análisis obtenido para la pieza fabricada con 1.0%Mg.

Program: Al-01-D 11/06/2013 05:35:48 PM
Comment: Al-Global METALART
Single spark(s) Elements: Concentration

NUMERO: 6 MUESTRAS CALIDAD: 02-AS275/1
NOMBRE: JULIO RAMOS CLIENTE: TESIS MAGNESIO

No	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1	6.58	0.305	0.454	0.039	0.95	0.0043	0.015	0.034	0.126
2	6.68	0.307	0.441	0.039	0.90	0.0043	0.015	0.032	0.127
3	6.56	0.307	0.445	0.040	0.93	0.0043	0.015	0.034	0.125

No	Ag	B	Be	Bi	Ca	Co	Li	Na	Pb
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1	<0.0001	0.0004	<0.0001	<0.0010	0.0005	<0.0010	<0.0002	0.0003	0.0043
2	<0.0001	0.0004	<0.0001	<0.0010	0.0017	<0.0010	<0.0002	0.0056	0.0037
3	<0.0001	0.0004	<0.0001	<0.0010	0.0006	<0.0010	<0.0002	0.0003	0.0043