

**FABRICACIÓN DE LA ALEACIÓN DE MAGNESIO AZ91 A ESCALA DE
LABORATORIO**

**CLAUDIA PATRICIA FERREIRA ARIZA
SARA JULIETH QUINTERO PEÑALOZA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA**

2017

**FABRICACIÓN DE LA ALEACIÓN DE MAGNESIO AZ91 A ESCALA DE
LABORATORIO**

**CLAUDIA PATRICIA FERREIRA ARIZA
SARA JULIETH QUINTERO PEÑALOZA**

Proyecto de investigación para optar al título de Ingeniero Metalúrgico

Directores

ANDRÉS GIOVANNI GONZALEZ HERNANDEZ

Dr. En Ingeniería

ANA EMILSE COY ECHEVERRÍA

Dra. En Corrosión y protección de aleaciones ligeras

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA**

2017

DEDICATORIA

A Dios por ser mi guía y fortaleza en todo momento.

A mis padres José Oswaldo y Elizabeth por su apoyo y comprensión. A mi madre, por sus consejos, esfuerzo, dedicación y amor brindados día a día para forjarme con buenos principios y valores; atesoro cada momento de abrazos, lágrimas y palabras de aliento para no desistir de mis sueños. Mami que gran mujer, te amo.

A mi hermana Alejandra por alegrar cada uno de los momentos de mi vida. A mis hermanos Eliana y Oswaldo por su cariño.

A mis padrinos Christian y Clara por el apoyo, cariño y guía en cada uno de los escalones de mi vida, en mi formación personal y profesional.

A mis familiares, amigos y compañeros quienes compartieron conmigo tristezas y alegrías durante estos años, gracias por sus enseñanzas y apoyo.

Clau

A Dios porque de Él, por Él y para Él es cada instante de mi vida, “Todo lo puedo en Cristo que me fortalece”.

A mi madre Esperanza, porque es quien lucho cada día para darme la oportunidad de estudiar, a ella que siempre está a mi lado sin importar las circunstancias ni cuantas canas le haga aparecer. TE AMO.

A mi preciosa hermana Valentina, regalo de Dios pequeño y valiente, y más ingeniosa que nadie, esto es para ti, para apoyar tu futuro mi bella “negrita”.

A mis abuelos, que son lo más importante que Dios me dio, quienes me dieron todo y me criaron, cada beso, sonrisa y abrazo fueron los instantes más hermosos que he vivido, los amo y los extraño, “mis viejitos amores”.

A mi hermano Edgar, tía Delfina y Arnulfo, y prima Tatiana que me han apoyado siempre, dado consejos y ayudándome a que cada día fuera mejor que el anterior.

A mi familia y amigos que estando cerca o lejos siempre han sido apoyo para mi vida y carrera universitaria.

Sara

AGRADECIMIENTOS

- A la Profesora Elcy María Córdoba, Directora del Grupo de Investigación en Tecnología y Desarrollo de Nuevos Materiales –GIMAT por su gestión en el préstamo del horno de inducción usado para desarrollar nuestro trabajo de grado.
- Al laboratorio de Rayos-X del Parque Tecnológico Guatiguará adscrito a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión por el apoyo prestado en la realización de los análisis para las diferentes muestras, parte importante del proyecto.
- Al Semillero de Fundición por el apoyo económico recibido por la Decanatura de la Facultad de Ingenierías Físicoquímicas de la UIS mediante la primera convocatoria del año 2016 para el apoyo al fortalecimiento de la investigación de estudiantes de pregrado a través de su vinculación a grupos de investigación
- A nuestros directores, el Dr. Andrés González por confiar en nosotras para que fuéramos las primeras alumnas en la UIS con quien trabajar en proyectos de grado, y la Dra. Ana E. Coy por aceptar nuestra propuesta y ser parte de todo el trabajo que se realizó, gracias a cada uno por el aporte tan grande en cuanto a conocimientos en cada área que dominan, por sus recomendaciones y porque este trabajo nos permitió acercarnos un poco más a sus vidas, sin su apoyo no hubiese sido posible.
- A los técnicos de la Escuela de Metalúrgica, especialmente a Sergio, Domingo, Ambrosio, y Mario, por el apoyo y guía para el manejo de cada muestra y análisis que se llevó a cabo y por la paciencia que nos tuvieron para repetirnos las cosas cuando fue necesario.

- A los docentes de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Industrial de Santander, por habernos formado profesionalmente.

CONTENIDO

| | Pág. |
|---|-------------|
| INTRODUCCIÓN | 17 |
| 1. ANTECEDENTES | 19 |
| 1.1 ALEACIONES DE MAGNESIO | 19 |
| 1.1.1. Designación de las aleaciones de magnesio | 20 |
| 1.1.2. Técnicas para la obtención de aleaciones de magnesio | 21 |
| 1.2 ALEACIÓN AZ91 | 23 |
| 2. OBJETIVOS | 27 |
| 2.1. OBJETIVO GENERAL | 27 |
| 2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 27 |
| 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL | 28 |
| 3.1. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA | 28 |
| 3.2. FABRICACIÓN DE LA ALEACIÓN | 29 |
| 3.3. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA, MICROESTRUCTURAL Y DE DUREZA | 30 |
| 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 32 |
| 4.1. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA | 32 |
| 4.2. FABRICACIÓN DE LA ALEACIÓN | 32 |
| 4.3. CARACTERIZACIÓN DE LAS ALEACIONES OBTENIDAS | 33 |
| 4.4. MICRODUREZA VICKERS | 40 |

| | |
|--|----|
| 4.5. COMPARACIÓN MICROESTRUCTURAL DE LAS ALEACIONES OBTENIDAS CON UNA ALEACIÓN COMERCIAL. | 40 |
| 5. CONCLUSIONES | 42 |
| 6. RECOMENDACIONES | 44 |
| CITAS BIBLIOGRÁFICAS | 45 |
| BIBLIOGRAFÍA | 48 |
| ANEXOS | 51 |

LISTA DE FIGURAS

| | Pág. |
|---|-------------|
| Figura 1. Desarrollo de las aleaciones de magnesio (Mg). | 22 |
| Figura 2. Microestructura correspondiente a la aleación AZ91, a) 200x mediante MO, b) 500x mediante SEM. Figura reproducida de la referencia [16]. | 26 |
| Figura 3. Diagrama de flujo de la metodología experimental. | 28 |
| Figura 4. Micrografías obtenidas mediante microscopía óptica a 100x. a) M1, molde de acero con atmósfera al vacío, b) M2, molde de acero con atmósfera de argón, c) M3, molde de Cu con atmósfera de argón..... | 35 |
| Figura 5. Micrografías obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido (MEB) a diferentes aumentos de las muestras: M1, molde de acero con atmósfera al vacío; M2, molde de acero con atmósfera de argón; y M3, molde de Cu con atmósfera de argón..... | 36 |
| Figura 6. Diagrama de fases Mg-Al. | 37 |
| Figura 7. Perfil de composición lineal EDS de la aleación M2. a) Sección tomada para el análisis, b) Espectro EDS. Intensidades de los diferentes elementos constitutivos a lo largo del EDS lineal c) Mg, d) Al e) Zn. | 38 |
| Figura 8. Difractograma obtenido de las muestras M1, M2 y M3..... | 39 |
| Figura 9. Comparación de micrografías obtenidas mediante microscopía óptica. a) Aleación AZ91 comercial a 200x. b) Aleación AZ91 M3 obtenida en el laboratorio a 200x. | 41 |

LISTA DE TABLAS

| | Pág. |
|---|-------------|
| Tabla 1. Designación de los elementos presentes en las aleaciones según ASTM (ASTM B275, 2005). | 20 |
| Tabla 2. Técnicas para la sinterización de aleaciones a base de magnesio..... | 22 |
| Tabla 3. Composición química de productos fabricados con la aleación AZ91. D* inyección a presión. S: Colada en arena. K: Colada en Coquilla. L: Colada a baja presión [8]. | 24 |
| Tabla 4. Microdureza de las diferentes fases en la aleación AZ91 [9]...... | 25 |
| Tabla 5. Parámetros de las condiciones de fundición para la fabricación de la aleación AZ91 en el horno de inducción. | 29 |
| Tabla 6. Resultados obtenidos por FRX de la materia prima. | 32 |
| Tabla 7. Resultados de las pérdidas totales del proceso. | 33 |
| Tabla 8. Análisis composicional de las aleaciones, obtenido mediante EDS..... | 38 |
| Tabla 9. Resultados de la prueba de microdureza Vickers de las aleaciones obtenidas. | 40 |

LISTA DE ANEXOS

| | Pág. |
|---|-------------|
| Anexo A. Horno de inducción con atmósfera controlada por argón de la casa comercial "ASEG GALONI". a) Vista general del horno, b) vista interna del horno. | 51 |
| Anexo B. Ventana de observación de las etapas del proceso de fundición de la aleación AZ91 a) Crisol rojo, b) presencia de humos producto de la oxidación del Mg, c) Ventana totalmente tapada por los humos. | 53 |
| Anexo C. Moldes utilizados para la fabricación de la aleación AZ91 a) molde de acero, b) molde de cobre. | 54 |
| Anexo D. a) Crisol luego del proceso de fabricación con presencia de Mg oxidado y parte del material que no alcanzó el proceso de fundición, b) Botón obtenido del material que alcanzó la colada. | 55 |

RESUMEN

TÍTULO: FABRICACIÓN DE LA ALEACIÓN DE MAGNESIO AZ91 A ESCALA DE LABORATORIO*

AUTORES: Ferreira Ariza, Claudia Patricia y Quintero Peñaloza, Sara Julieth**

PALABRAS CLAVES: Aleación de Magnesio AZ91, proceso de fundición, industria automotriz, análisis microestructural, pruebas mecánicas.

DESCRIPCIÓN:

El magnesio se ha convertido en un elemento muy atractivo debido a que es el metal más ligero de uso estructural. Posee una densidad 33% menor que el aluminio y 77% menor que el acero. Una de las principales aleaciones usadas en la industria automovilística es la aleación magnesio-aluminio-zinc AZ91 (9% Al, 1% Zn, en peso). Esta aleación es usada normalmente en forma de productos fundidos y actualmente el país que lidera su fabricación es China; en Colombia, no se registra la elaboración de esta aleación, por lo que se planteó como objetivo del proyecto realizar un acercamiento a la fabricación de la aleación de magnesio AZ91 a nivel de laboratorio, haciendo uso de los equipos tradicionales encontrados en un laboratorio de fundición. La fabricación de la aleación AZ91 fue realizada en un horno de inducción, donde se tuvieron en cuenta variables tales como tiempo, temperatura, molde y atmósfera. La materia prima para realizar las aleaciones fue caracterizada por fluorescencia de rayos X. Después del proceso, se obtuvieron tres muestras (M1, M2 y M3) las cuales fueron debidamente caracterizadas por medio de microscopía óptica, microscopía electrónica de barrido, espectrometría de dispersión de energía de rayos X, difracción de rayos X y microdureza Vickers, para realizar la comparación de las propiedades de las muestras obtenidas con la muestra comercial de la aleación AZ91.

La dificultad en el control de la temperatura durante el proceso de fabricación utilizado originó un alto grado de oxidación en la muestra M2 lo que ocasionó un enriquecimiento de aluminio en el baño líquido, el cual fue evidenciado como un incremento de fase β en el componente eutéctico de la aleación. Sin embargo, en las otras dos muestras (M1 y M3) las características microestructurales fueron muy similares a las de una aleación comercial AZ91 de colada.

* Proyecto de investigación

** Facultad de ingenierías Físicoquímicas. Escuela de ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales
Directores: Andrés Giovanni González Hernández, Doctor en Ingeniería; Ana Emilse Coy Echeverría, Doctora en Corrosión y Protección de Aleaciones Ligeras.

ABSTRACT

TITLE: MANUFACTURE OF AZ91 MAGNESIUM ALLOY IN LABORATORY SCALE*

AUTHORS: Ferreira Ariza, Claudia Patricia y Quintero Peñaloza, Sara Julieth**

KEYWORDS: AZ91 magnesium alloy, casting process, automotive industry, microstructural analysis, mechanical tests.

DESCRIPTION:

Magnesium has become a very attractive element because it is the lightest metal for structural use with a density 33% lower than aluminum and 77% lower than steel. One of the main alloys used in the automotive industry is the magnesium-aluminum-zinc alloy AZ91 (9% Al, 1% Zn, by weight) which is normally used in the form of melted products and currently, the country that leads its the manufacture is China, in Colombia there are not registered elaborations of this alloy. The main objective of this project is to make an approach for the manufacturing of the magnesium alloy AZ91 at laboratory level, making use of the traditional equipment found in a foundry laboratory. The AZ91 alloy was manufactured in an induction furnace, where variables such as time, temperature, mold and atmosphere were taken into account. The raw material was characterized by X-Ray fluorescence. After the process, three samples were obtained (M1, M2, M3) which were properly characterized by optical microscopy (OM), Scanning Electron Microscopy (SEM), X-ray Energy Dispersion Spectrometry (EDS), X-Ray Diffraction and Vickers Micro-Hardness, in order to make the comparison of the properties of the samples obtained at the laboratory level with those obtained from the commercial AZ91 sample.

The difficulty on the temperature control during the manufacturing process caused a high degree of oxidation in one of the specimen (M2), generating an aluminum enrichment within the liquid bath, which was evidenced as an increment of β -phase in the eutectic component of the alloy. However, in the other two specimens (M1 and M3) the microstructural characteristics were very similar to those of an AZ91 commercial cast alloy.

* Research project

** Facultad de ingenierías Físicoquímicas. Escuela de ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales
Advisers: Andrés Giovanni González Hernández, Doctor in Engineering; Ana Emilse Coy Echeverría, Doctor in Corrosion and Protection of light alloys.

INTRODUCCIÓN

El magnesio, como material estructural, es el elemento más liviano de todos los metales y es de gran interés en el mercado debido a su baja densidad ($1,74 \text{ g/cm}^3$) la cual es $\frac{1}{4}$ del acero y $\frac{2}{3}$ del aluminio [1].

Por tanto, las aleaciones de magnesio se han extendido en industrias como la aeronáutica, la automotriz, médica, electrónica y deportiva, debido a la excelente relación resistencia/peso que presentan [2]. Estas aleaciones de magnesio tienen un bajo módulo de elasticidad ($\approx 45 \text{ GPa}$) con gran capacidad de amortiguamiento de vibraciones, elevada resistencia a la abolladura y una de las cosas más importantes es que posee una alta capacidad de ser reciclado [3].

En la industria automovilística, las principales aleaciones usadas son las aleaciones de magnesio-aluminio-zinc como la AZ91 (9% Al, 1% Zn, 0,3% Mn en peso). Algunas de sus aplicaciones son cubiertas de tapas de cilindros, brazos de suspensión, llantas, carburadores, engranajes, elementos de la dirección, entre otros [4]. El uso de esta aleación representa una disminución del peso total del vehículo confiriendo un ahorro en el combustible, disminuyendo de esta manera las emisiones de CO_2 a la atmósfera.

A pesar del incremento en la demanda de aleaciones de magnesio, actualmente en Colombia no hay empresas dedicadas a su fabricación. Es sabido que al tratarse de un material que en estado líquido se oxida rápidamente, supone la necesidad de trabajar en atmósferas controladas, no oxidantes [5]. Es posible que por los meticulosos y estrictos procesos que conlleva la producción de estas aleaciones no haya sido muy atractiva su fabricación para el sector industrial local. En este sentido, el objetivo de este proyecto es hacer la primera aproximación al proceso de

fabricación de las aleaciones de magnesio y poder replicar, a escala de laboratorio la aleación comercial AZ91 usando variables como material del molde, cantidad de carga, atmósfera y tiempo de fusión.

1. ANTECEDENTES

El magnesio es un elemento metálico de color blanco plateado el cual ocupa el sexto lugar en cuanto a abundancia en la corteza terrestre pero no se encuentra en su forma elemental, estando presente en varios minerales como la magnesita (MgCO_3), dolomita ($\text{MgCO}_3 \cdot \text{CaCO}_3$), carnalita ($\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) y también en agua de mar en forma de cloruro de magnesio (Cl_2Mg), siendo el tercer mineral más abundante disuelto en este medio por consiguiente se le considera un metal prácticamente inagotable [1-6].

El magnesio cristaliza en el sistema hexagonal compacto (HC), lo que le confiere anisotropía a sus propiedades mecánicas. Es por ello que es poco dúctil a temperatura ambiente, por lo que debe ser moldeado en caliente donde es muy reactivo con el oxígeno. Su configuración electrónica es: $1s^2, 2s^2, 2p^6, 3s^2$, presentando tendencia a perder los dos electrones del último nivel, lo que facilita que forme soluciones sólidas con gran cantidad de elementos [6].

1.1 ALEACIONES DE MAGNESIO

El magnesio puro tiene poca resistencia mecánica y plasticidad, su poca plasticidad es debida a que su red es hexagonal y posee pocos planos de deslizamiento. Las bajas propiedades mecánicas excluyen la posibilidad de utilizarlo en estado puro como material estructural, pero aleado y tratado térmicamente puede mejorar sus propiedades mecánicas. Como el más liviano metal estructural disponible, la combinación de baja densidad y buena resistencia mecánica de las aleaciones de magnesio resulta en una alta relación resistencia-peso. Sobre esta base, es comparable con la mayoría de los materiales estructurales comunes.

Las aleaciones de magnesio son generalmente utilizadas a temperaturas que varían desde el ambiente hasta los 175°C. Algunas aleaciones pueden ser usadas en ambientes de servicio de hasta 370°C por breves exposiciones. A temperaturas elevadas se oxida intensamente e incluso se inflama espontáneamente [7].

1.1.1. Designación de las aleaciones de magnesio: El magnesio como material estructural se encuentra aleado y tratado térmicamente. Para este caso los dos sistemas de designación más ampliamente aceptados son el sistema ASTM (del inglés American Society for Testing and Materials) y el UNS (del inglés Unified Numbering System) [6].

El criterio ASTM se basa en designar las aleaciones de magnesio por dos letras mayúsculas seguidas de dos o tres números. Las letras representan los dos elementos que principalmente componen la aleación (Tabla 1), ordenados según la concentración que posean, empezando por el de concentración superior. Los números indican el contenido porcentual en peso de los elementos señalados por las letras, redondeados al número entero más cercano [8].

Tabla 1. Designación de los elementos presentes en las aleaciones según ASTM (ASTM B275, 2005).

| | | | | | | | |
|---------------------|-----------------|------------------|-----------------|----------------------|----------------|-----------------|------------------|
| Elemento (Letra) | Aluminio (A) | Antimonio (Y) | Arsénico (V) | Berilio (L) | Bismuto (B) | Cadmio (D) | Cobre (C) |
| | Cromo (R) | Estaño (T) | Fósforo (J) | Hierro (F) | Itrio (W) | Magnesio (G) | Manganeso (M) |
| Níquel (N) | Plata (Q) | Plomo (P) | Silicio (S) | Tierras raras (E) | Torio (H) | Zinc (Z) | Zirconio (K) |

Los sufijos A, B, C, entre otros, se refieren a variaciones en la composición dentro de los rangos especificados, mientras que la letra X indica una aleación

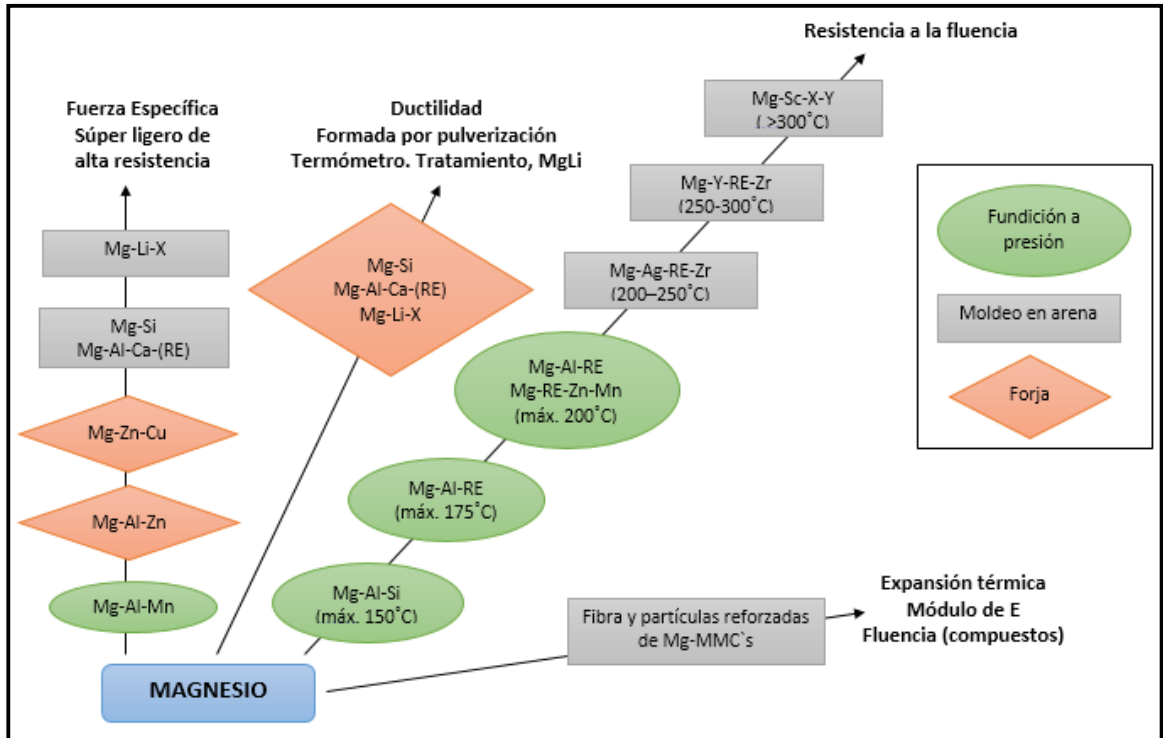
experimental. Por ejemplo, la aleación de magnesio AZ91 (A) contiene 9 % de aluminio (código de letra A) y 1 % de zinc (código de letra Z), estando la composición real entre el 8,3-9,7 Al y 0,4-1,0 Zn para productos fundidos [9].

De manera general, las familias de aleaciones de magnesio más utilizadas son las siguientes:

- Aleaciones Mg-Al-Zn
- Aleaciones Mg-Zr-Zn
- Aleaciones Mg-Zr-Zn-Tierras Raras
- Aleaciones Mg-Zr-Zn-Th
- Aleaciones Mg-Zr-RE-Th-Ag
- Aleaciones Mg-Zr-RE-Y

1.1.2. Técnicas para la obtención de aleaciones de magnesio: Para obtener aleaciones de magnesio se han desarrollado diferentes métodos, como se muestra en la Fig. 1 y Tabla 2. La selección de estas técnicas es muy importante debido a que las características microestructurales resultantes y propiedades no sólo dependen de los elementos de aleación, sino están altamente influenciadas por los parámetros de procesamiento [1].

Figura 1. Desarrollo de las aleaciones de magnesio (Mg).



Traducido de: B.L. Mordike, T. Ebert en Materials Science and Engineering A302 2001 37–45.

Tabla 2. Técnicas para la sinterización de aleaciones a base de magnesio.

| Métodos de procesamiento | |
|---|--|
| Método fase líquida | Método de fase sólida |
| Fundición en arena (Sand casting) | Pulvimetalurgia o metalurgia de polvos (PM) (The powder metallurgy (PM)): Mezcla (blending) Aleación mecánica (Mechanical alloying) Consolidación en polvo (powder consolidation) Métodos de Sinterización (sintering methods) |
| Fundición a presión (Die casting) | |
| Purgado de la empuñadura (Squeeze casting) | |
| Fundición de metal semisólido (SSM) (Semisolid metal (SSM) casting) | |
| Mezcla de agitación (Stir casting) | |
| Formación de pulverización (Spray forming) | |
| Método de infiltración en fusión (Melt infiltration method) | |
| Síntesis in situ (In situ synthesis) | |

1.2 ALEACIÓN AZ91

La reducción del peso de los automóviles mediante el uso de materiales cada vez más ligeros es una práctica habitual en los últimos años, el desarrollo sostenible del sector de transporte por carretera se fundamenta en tres aspectos básicos: Reducir la demanda energética de los vehículos (independientemente del tipo de motorización considerado), disminuir la contaminación debida a los gases de efecto invernadero y potenciar el reciclaje de vehículos [15]. La sustitución de los tradicionales motores de hierro fundido por aleaciones de magnesio, permiten reducir el peso del motor hasta un 75% [10]. Algunas de las aplicaciones típicas de las aleaciones de magnesio AZ91 son [4-6-9]: Cajas de transmisión, paneles de instrumentos, marcos de asientos, componentes de la carrocería, cubiertas de las válvulas del motor, armaduras del volante, carcasas de cajas de cambios, carburadores, entre otros.

Los sistemas de aleación más comunes fueron desarrollados sobre la base de Mg-Al, Mg-Zn y Mg-Al-Zn, y dentro de las más utilizadas se encuentran la aleación AZ91, cuyo contenido de aluminio se encuentra alrededor del 9 % en peso y de zinc 1% en peso (Tabla 3).

El aluminio aumenta la dureza y la resistencia mecánica; aunque, la ductilidad y la resistencia a la fractura disminuyen gradualmente a la vez que se incrementa el porcentaje en peso de aluminio en la aleación. También contribuye a mejorar la resistencia a la corrosión.

El zinc mejora la colabilidad de estas aleaciones, y proporciona una mejor capacidad de deformación permanente. Se suele emplear junto con el aluminio mejorando la resistencia mecánica. La cantidad debe ser limitada para evitar el agrietamiento durante la solidificación [10].

La adición de manganeso mejora la resistencia a la fluencia y también la resistencia a la corrosión; esta última debida a que el manganeso entra en combinación con el hierro, níquel y otros elementos pesados de carácter catódico, disminuyendo su efecto perjudicial, lo que se traduce en un incremento significativo de la resistencia a la corrosión de estas aleaciones [11].

Tabla 3. Composición química de productos fabricados con la aleación AZ91. D* inyección a presión. S: Colada en arena. K: Colada en Coquilla. L: Colada a baja presión [8].

| Designación | % en peso (mín. - máx.) | | | | | | | | | |
|-------------|-------------------------|---------|----------|-------------|--------|---------|---------|---------|--------|-------|
| | Proceso | Al | Zn | Mn | Si | Fe | Cu | Ni | Otros | Mg |
| AZ91(A) | D* | 8,3-9,7 | 0,35-1,0 | mín. 0,1 | 0-0,10 | 0-0,005 | 0-0,030 | 0-0,002 | 0-0,01 | resto |
| AZ91(A) | S, K, L* | 8,3-9,7 | 0,4-1,0 | mín. 0,1 | 0-0,20 | 0-0,005 | 0-0,030 | 0-0,001 | 0-0,01 | resto |
| AZ91(B) | D, S, K, L* | 8-10 | 0,3-1,0 | - | 0-0,30 | 0-0,03 | 0-0,20 | 0-0,01 | 0-0,05 | resto |

Las aleaciones de la serie AZ como la AZ91, presentan buenas propiedades en cuanto a facilidad de moldeo y resistencia a la corrosión, pero por otra parte son susceptibles a la microporosidad [4]. En aplicaciones donde es necesaria una ductilidad y tenacidad de fractura superiores (rines, volantes y estructura de asientos en automóviles) se dispone de una serie de aleaciones de alta pureza con bajo contenido de aluminio.

Un problema asociado con las primeras aleaciones de este tipo fue que el tamaño de grano tendía a ser grande y desigual, lo que se traducía a menudo en un descenso de las propiedades mecánicas, en el caso de los productos conformados por deformación plástica, excesiva anisotropía de las propiedades. Asimismo, provocaban que los valores de límite elástico fueran bajos respecto a los de resistencia a la tracción. Entonces se descubrió que el circonio tenía un marcado

efecto como afinador de grano del magnesio, aunque todavía fueron necesarios unos años más para conseguir de forma efectiva la aleación con este metal [12].

Normalmente, en las aleaciones AZ91 el aluminio está parcialmente en solución sólida y parcialmente precipitado en forma de fase β , $Mg_{17}Al_{12}$, a lo largo de los límites de grano, como una fase continua, o como parte de una estructura laminar eutéctica [13].

En la aleación AZ91 existen tres principales fases:

- Fase α - Mg
- Fase β - $Mg_{17}Al_{12}$
- Eutéctico formado por las fases α - Mg y β - $Mg_{17}Al_{12}$

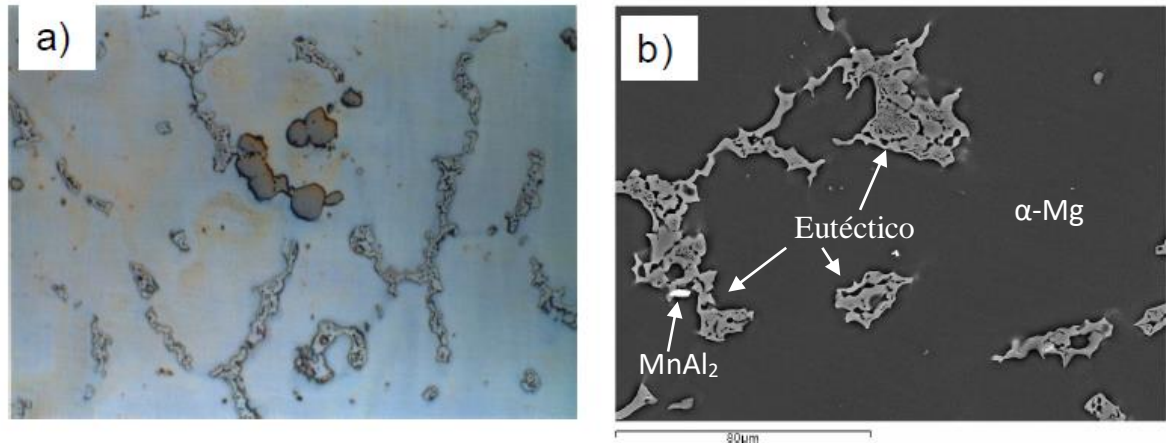
La Tabla 4, muestra los valores de dureza para cada una de estas fases, donde se observa que la fase más dura corresponde a la fase β ($Mg_{17}Al_{12}$).

Tabla 4. Microdureza de las diferentes fases en la aleación AZ91 [9].

| Fase | Microdureza (HV 1/10) |
|--|-----------------------|
| Matriz [$Mg(\alpha)$] | 66,5 |
| Fase β [$Mg_{17}Al_{12}(\beta)$] | 145,0 |
| Eutéctico [$Mg(\alpha)+Mg_{17}Al_{12}(\beta)$] | 140,0 |

En la Fig. 2, se observa la microestructura típica de colada. La matriz corresponde a la fase α -Mg (solución sólida de Al en Mg), también se observa la presencia de un eutéctico que se formó en los espacios intergranulares. Este eutéctico está compuesto de fase α -Mg y la fase β ($Mg_{17}Al_{12}$). Las propiedades mecánicas, como dureza de esta aleación son debidas al endurecimiento sufrido por solución sólida y endurecimiento por dispersión debida al eutéctico [16].

Figura 2. Microestructura correspondiente a la aleación AZ91, a) 200x mediante MO, b) 500x mediante SEM. Figura reproducida de la referencia [16].



La morfología del eutéctico puede variar y éste se puede presentar en tres formas diferentes dependiendo del proceso de fabricación de la aleación: como una fase β divorciada, parcialmente divorciada ó laminar. La presencia de la fase laminar eutéctica es debido a la difusión lenta en la fase α -Mg de la matriz durante la solidificación de la aleación [14]. Queda claro entonces que aunque la aleación tenga una misma composición, la microestructura obtenida dependerá en gran medida del proceso de fabricación.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Fabricar una aleación de magnesio AZ91 a escala de laboratorio.

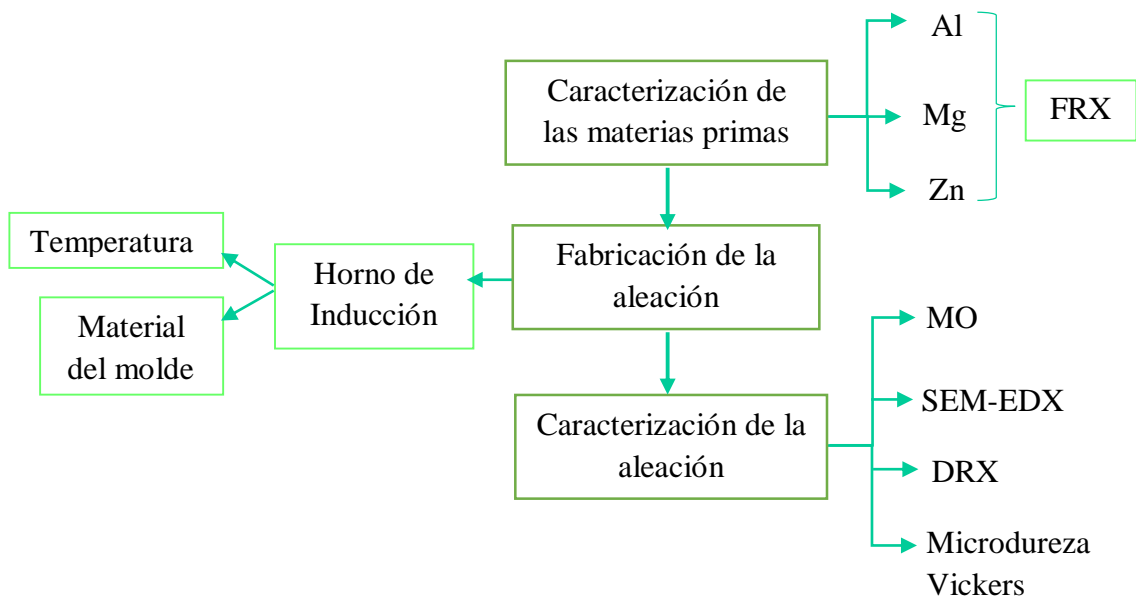
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar la influencia del tiempo de fusión del proceso de fabricación y el material del molde sobre las características microestructurales de la aleación obtenida.
- Evaluar las pérdidas por oxidación de Mg, Al y Zn durante el proceso de fabricación de la aleación AZ91 en un horno de inducción.
- Comparar a nivel microestructural la aleación obtenida con la aleación comercial encontrada en la literatura.

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En la Fig. 3 se presenta un esquema de la metodología experimental utilizada para la realización del presente trabajo.

Figura 3. Diagrama de flujo de la metodología experimental.



3.1. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

Las materias primas necesarias para realizar la fundición de la aleación AZ91 fueron metales de aluminio, magnesio y zinc, todos estos metales fueron analizados mediante fluorescencia de rayos X (FRX) en el equipo Espectrómetro secuencial de Fluorescencia de Rayos-X, marca Bruker, modelo S8 Tiger, con el fin de determinar su porcentaje de pureza.

3.2. FABRICACIÓN DE LA ALEACIÓN

Para fabricar la aleación se realizaron los cálculos respectivos de la carga a utilizar, se cortaron las materias primas y pesaron en una balanza. Antes de realizar el proceso de fundición, el molde, el crisol de grafito y la carga fueron sometidos a un precalentamiento a 150°C durante 15 minutos con el fin de evitar un choque térmico durante el proceso de fusión. La fabricación de la aleación se llevó a cabo en el horno de inducción con atmósfera controlada por argón de la casa comercial “ASEG GALONI” (ver anexo 1) el cual está a cargo del grupo de investigación GIMAT. En la Tabla 5 se muestran los parámetros de utilizados en la fundición referente a las tres mejores condiciones de fabricación de la aleación AZ91, después de realizar varios ensayos preliminares.

Tabla 5. Parámetros de las condiciones de fundición para la fabricación de la aleación AZ91 en el horno de inducción.

| Parámetros | | Codificación de las muestras | | |
|--------------------------------------|-----------------|------------------------------|--------------|--------------|
| | | M1 | M2 | M3 |
| Carga | Carga total (g) | 7,16 | 3,51 | 3,52 |
| | Mg (g) | 6,39 | 3,15 | 3,15 |
| | Al (g) | 0,67 | 0,32 | 0,33 |
| | Zn (g) | 0,10 | 0,04 | 0,04 |
| Molde | | Acero | Acero | Cobre |
| Atmósfera | | Vacío | Argón | Argón |
| | | Tiempo de proceso [min] | | |
| Potencia inicial (1) | | 0 | 0 | 0 |
| Crisol rojo | | 1,11 | 1,17 | 1,09 |
| Incremento de la potencia (P) | | 3,05 P=25 | 2,15 P=20 | 2,10 P=20 |
| Oxidación | | 3,30 | 2,25 | 2,28 |
| Colada | | 4 | 3,3 | 3,1 |
| Despresurización | | 6,06 | 5,4 | 5,12 |

La temperatura máxima a la cual se programó el horno fue de 740°C, sin embargo, fue difícil determinar y controlar esta temperatura máxima en cada uno de los ensayos realizados debido a que los humos de oxidación del magnesio cubrían la ventana de observación e impedía la lectura correcta con el pirómetro óptico que tenía el equipo. Así que fue necesario realizar ensayos preliminares con objeto de determinar el tiempo necesario para alcanzar la temperatura de fusión de la aleación (660°C) y que fuera esta la variable de control. De acuerdo a la Tabla 5, cuando se menciona “Crisol Rojo”, se refiere a la incandescencia que alcanzaba el crisol del grafito en el horno, el cual se ubicó entre los tiempos 1,09 a 1,17 minutos una vez dado inicio al proceso de fundición. Luego, entre 2,25 a 2,28 minutos comenzaba la oxidación del metal desprendiendo humos blancos de MgO que bloqueaban la ventana de observación (ver anexo 2); aproximadamente a los 1,5 minutos de presentarse la oxidación se realizó la colada, estableciendo hasta esta etapa un tiempo de 4 minutos para la carga mayor (M1) y un tiempo alrededor de 3 minutos para las cargas M2 y M3.

3.3. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA, MICROESTRUCTURAL Y DE DUREZA

Para el análisis microestructural, se prepararon las muestras según lo indicado en la norma ASTM E3 [17], procedimiento que consistió en un desbaste gradual con papel abrasivo de SiC hasta la granulometría 2000 y pulido con paño y alúmina de 3,1 y 0,05 μm , con el fin de obtener una superficie especular. Una vez preparadas las muestras, con el objeto de revelar su microestructura, se atacaron con una solución compuesta por 10 ml de ácido acético, 6 gramos de ácido pícrico y 100 mililitros de etanol (95%), durante un tiempo de 5 segundos según la norma ASTM E 407 [18].

Las muestras fueron caracterizadas mediante microscopía óptica (MO) con uso del microscopio óptico Olympus GX-71, ubicado en el laboratorio de microscopía de la

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales (UIS), microscopía electrónica de barrido (MEB) utilizando un microscopio electrónico de la marca JEOL JSM-6490LV de la Universidad de Antioquia, con objeto de evaluar las características microestructurales de la aleación fabricada y su composición elemental mediante espectrometría de dispersión de energía de rayos X (EDS). Las fases de las muestras fueron determinadas mediante difracción de rayos X (DRX) con difractómetro marca Bruker modelo D8 del Parque Tecnológico de Guatiguará (UIS).

El ensayo de microdureza Vickers se realizó a cada una de las probetas aplicando una fuerza de 50 g, para ello se utilizó el micro-durómetro Innovatest que se encuentra ubicado en el laboratorio de microscopía de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales (UIS). La carga de indentación fue escogida de acuerdo a la literatura [19].

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

Los resultados de composición química de la materia prima empleada para la fabricación de la aleación, obtenidos mediante fluorescencia de rayos X (FRX) se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. Resultados obtenidos por FRX de la materia prima.

| Materia prima (metales) | Composición química (% en peso) | | | | | | | | | |
|-------------------------|---------------------------------|--------------|--------------|------|------|------|------|------|------|------|
| | Mg | Al | Zn | Fe | Si | Mn | Cr | Cu | Cl | Ga |
| Magnesio | 99,75 | 0,02 | | 0,11 | 0,01 | 0,01 | 0,05 | | 0,01 | |
| Aluminio | 0,62 | 98,67 | 0,02 | 0,18 | 0,45 | | | | | 0,01 |
| Zinc | | 0,04 | 99,45 | 0,05 | 0,4 | | 0,02 | 0,03 | | |

Los resultados arrojaron que el Mg presentó 99,75% de pureza, el Al 98,67% y el Zn 99,45%; se considera que los materiales presentaron la pureza adecuada para emplearse en la fabricación de la aleación AZ91.

4.2. FABRICACIÓN DE LA ALEACIÓN

Como se mencionó en la metodología, el proceso de fusión de la aleación fue difícil de realizar ya que el pirómetro óptico no pudo cumplir su función debido a que los humos de magnesio ocasionaron obstrucción en la medida de temperatura. Por esto, en el proceso no fue fácil controlar la temperatura por lo que se decidió realizarlo midiendo los tiempos de cada etapa (calentamiento de crisol, aumento de la potencia, oxidación y colada).

En esta etapa se obtuvieron tres muestras: M1, fabricada con molde de acero con atmósfera al vacío; M2, molde de acero con atmósfera de argón y M3, molde de Cu con atmósfera de argón (anexo 3). Las pérdidas del proceso fueron calculadas de la diferencia entre la carga y el material que quedó en el molde, más el material que quedó en el crisol (anexo 4). Es importante señalar que hubo salpicaduras durante el proceso que no pudieron ser cuantificadas y además en las paredes del horno se depositó óxido de magnesio en polvo debido a la evaporación del mismo a pesar que el horno tenía una atmósfera al vacío o con Argón. En la muestra M1 no se calcularon las pérdidas, ya que no fue posible medir el material restante en el crisol y en el resto del horno. Los resultados de las pérdidas totales del proceso se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Resultados de las pérdidas totales del proceso.

| | Resultados | | |
|---|------------|--------|--------|
| | M1 | M2 | M3 |
| Peso final muestra | 1,15 g | 1,69 g | 0,74 g |
| Pérdidas totales (Oxidación + pérdida de material) | ---- | 24,2% | 36,6% |

4.3. CARACTERIZACIÓN DE LAS ALEACIONES OBTENIDAS

Las micrografías obtenidas mediante microscopía óptica (MO) de las aleaciones M1, M2 y M3, a diferentes aumentos se muestran en la Fig. 4. De forma general, se puede apreciar una microestructura típica de colada, con una matriz de fase α -Mg (solución sólida de Al en Mg) y presencia de un componente intergranular, el cual se encuentra en mayor proporción en la muestra M2 (Fig. 4 b).

Con el fin de analizar con mayor detalle la microestructura de las muestras, se realizó un análisis mediante MEB. Las micrografías obtenidas a diferentes aumentos se muestran en la Fig. 5.

Se puede observar que la fase α -Mg rodeadas por el componente intergranular, cuya morfología corresponde al eutéctico parcialmente divorciado de fase β y α -Mg, el cual, como se observó mediante MO, se encuentra en mayor proporción en la muestra M2 (Fig. 5). Esta diferencia microestructural podría asociarse a posibles pérdidas de magnesio durante el proceso de fusión, que pudieron ocasionar un enriquecimiento de aluminio en el líquido, desplazando de esta forma la composición de la aleación a la derecha del diagrama de equilibrio (Fig. 6), presentando de esta forma una elevada cantidad de eutéctico.

Figura 4. Micrografías obtenidas mediante microscopía óptica a 100x. a) M1, molde de acero con atmósfera al vacío, b) M2, molde de acero con atmósfera de argón, c) M3, molde de Cu con atmósfera de argón.

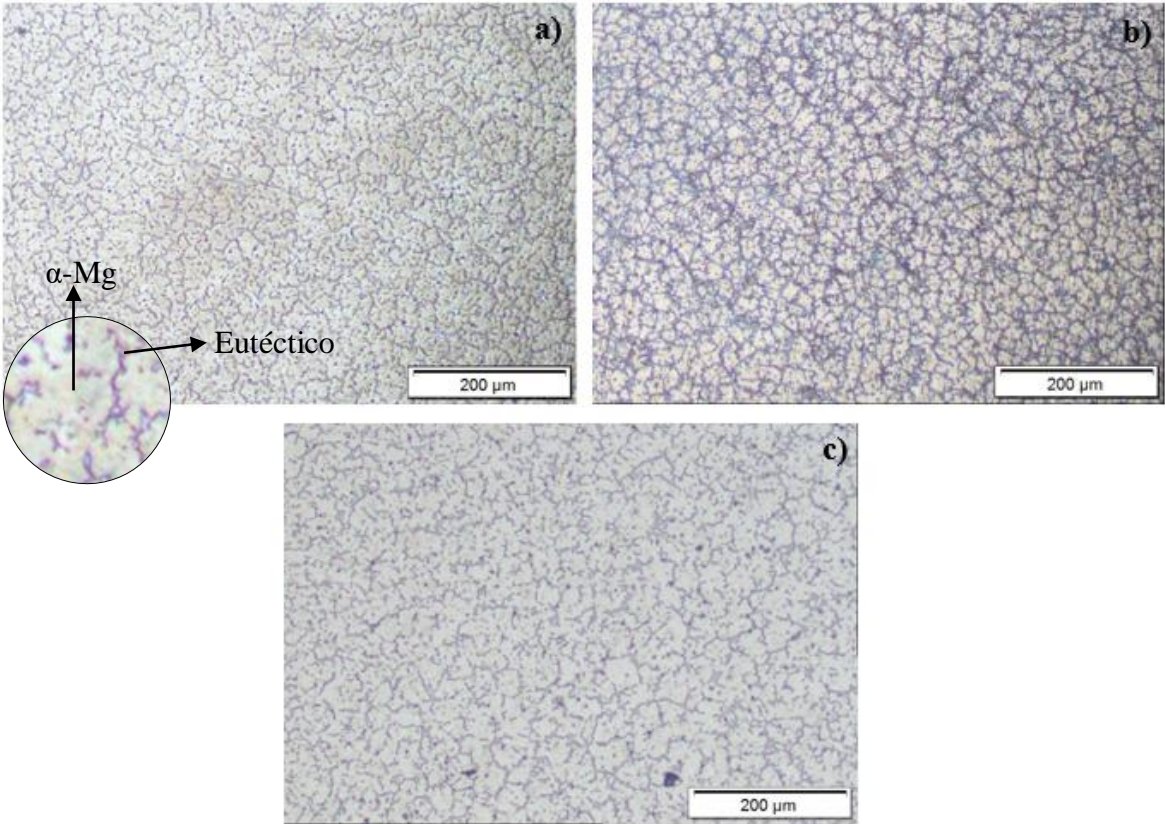


Figura 5. Micrografías obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido (MEB) a diferentes aumentos de las muestras: M1, molde de acero con atmósfera al vacío; M2, molde de acero con atmósfera de argón; y M3, molde de Cu con atmósfera de argón.

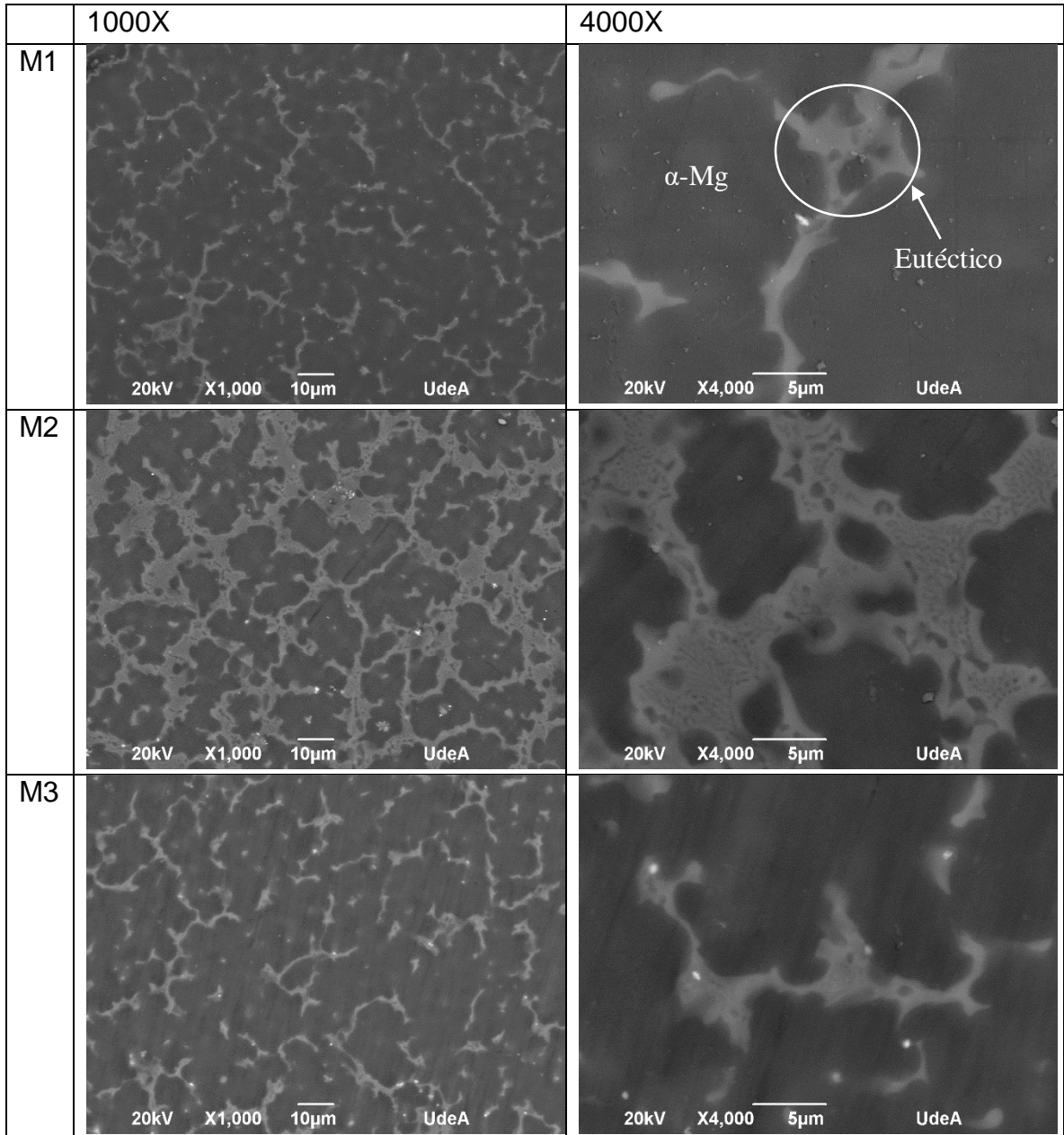
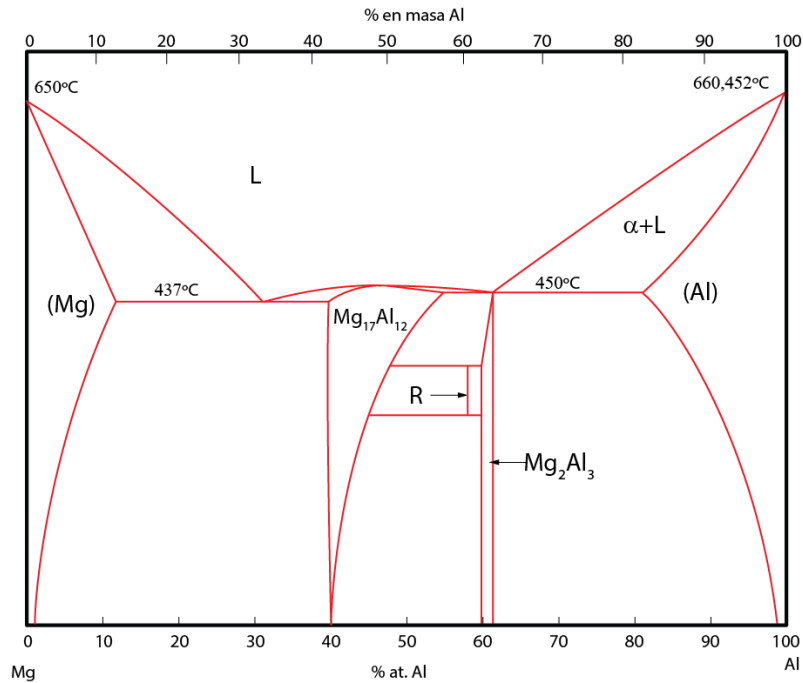


Figura 6. Diagrama de fases Mg-Al.



Para comprobar la hipótesis planteada, y conocer de forma aproximada los porcentajes en peso de cada uno de los elementos mayoritarios de las muestras obtenidas, se realizó un análisis EDS cuyos resultados se muestran en la Tabla 8. Se puede ver que la muestra M2 posee un porcentaje en peso de aluminio de 18,41%, siendo éste mayor que el contenido en las otras muestras, superándolas en casi el doble, corroborando de esta forma el análisis microestructural realizado. Este enriquecimiento en aluminio pudo tener su origen posiblemente a la reactividad del magnesio, que en este caso fue más sensible en la fusión.

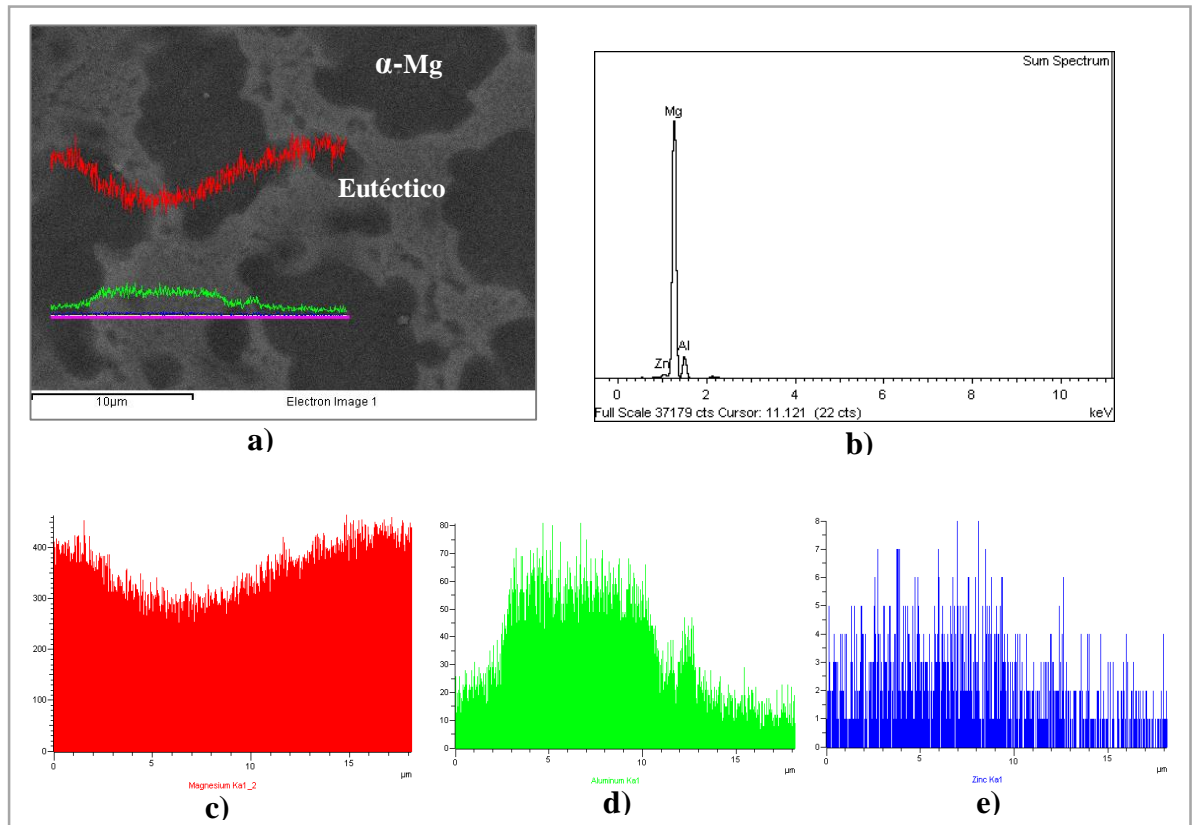
Como se mencionó anteriormente, fue difícil manejar la temperatura de la bobina del horno de inducción, por lo que la muestra M2 pudo tener una temperatura mayor de fusión que las otras, generando mayor oxidación del magnesio y enriquecimiento en aluminio. Las otras muestras M1 y M3 presentaron una composición elemental similar y se acercan más a la composición química de la aleación AZ91.

Tabla 8. Análisis composicional de las aleaciones, obtenido mediante EDS.

| | | M1 | M2 | M3 |
|--------|----|-------|--------------|-------|
| % Peso | Mg | 88,66 | 79,40 | 87,80 |
| | Al | 9,41 | 18,41 | 10,73 |
| | Zn | 1,94 | 2,19 | 1,47 |

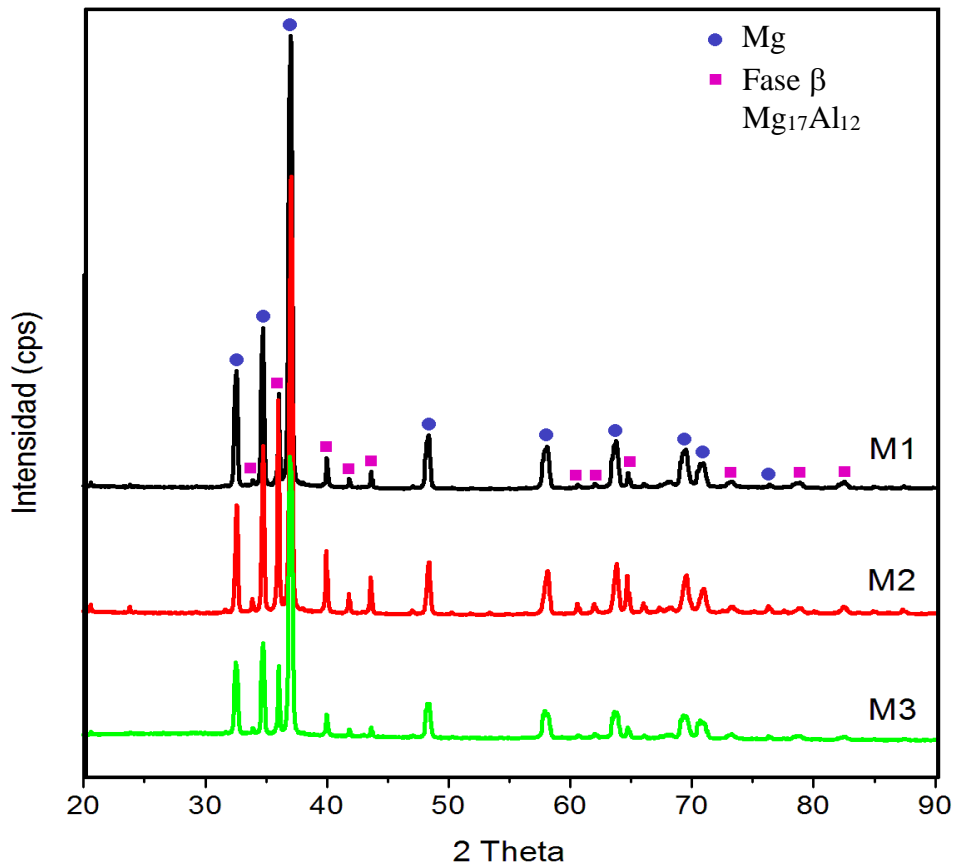
La Fig. 7 muestra el análisis lineal de EDS realizado a la muestra M2 en la zona del eutéctico. Se puede observar que el eutéctico está enriquecido en aluminio, mientras que la pequeña cantidad de zinc (2,19%) no cambia a lo largo del análisis lineal. El comportamiento del análisis lineal presenta las mismas características para las otras dos muestras.

Figura 7. Perfil de composición lineal EDS de la aleación M2. a) Sección tomada para el análisis, b) Espectro EDS. Intensidades de los diferentes elementos constitutivos a lo largo del EDS lineal c) Mg, d) Al e) Zn.



En la Fig. 8 se muestran los difractogramas de las muestras M1, M2 y M3, obtenidos mediante DRX. Como se puede apreciar en todas las muestras se tiene la presencia de Mg y de fase β ($Mg_{17}Al_{12}$), fases características en este tipo de aleación. Se ve claramente que los máximos de difracción asociados a la fase β tienen mayor intensidad en la muestra M2 comparada con las otras muestras, lo que puede asociarse con la mayor cantidad de fase β en esta aleación, lo que corrobora los resultados obtenidos mediante las técnicas microscópicas.

Figura 8. Difractograma obtenido de las muestras M1, M2 y M3.



4.4. MICRODUREZA VICKERS

En la Tabla 9 se presentan los resultados del perfil de microdureza hallados en las muestras. Se puede observar que la muestra M2 tiene una mayor microdureza con un valor promedio de HV 151 mientras que las muestras M1 y M3 presentan una microdureza similar de HV 84 y HV 85 respectivamente.

Tabla 9. Resultados de la prueba de microdureza Vickers de las aleaciones obtenidas.

| | Dureza Vickers (HV) | | | | | | Desviación estándar |
|-----------|---------------------|-------|------|-------|-------|----------|---------------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Promedio | |
| M1 | 79,4 | 87,4 | 88,7 | 88,2 | 78,1 | 84,36 | 5,16 |
| M2 | 138,2 | 162,2 | 165 | 145,4 | 145,1 | 151,18 | 11,73 |
| M3 | 87,1 | 84,6 | 82,7 | 85,8 | 86,1 | 85,26 | 1,68 |

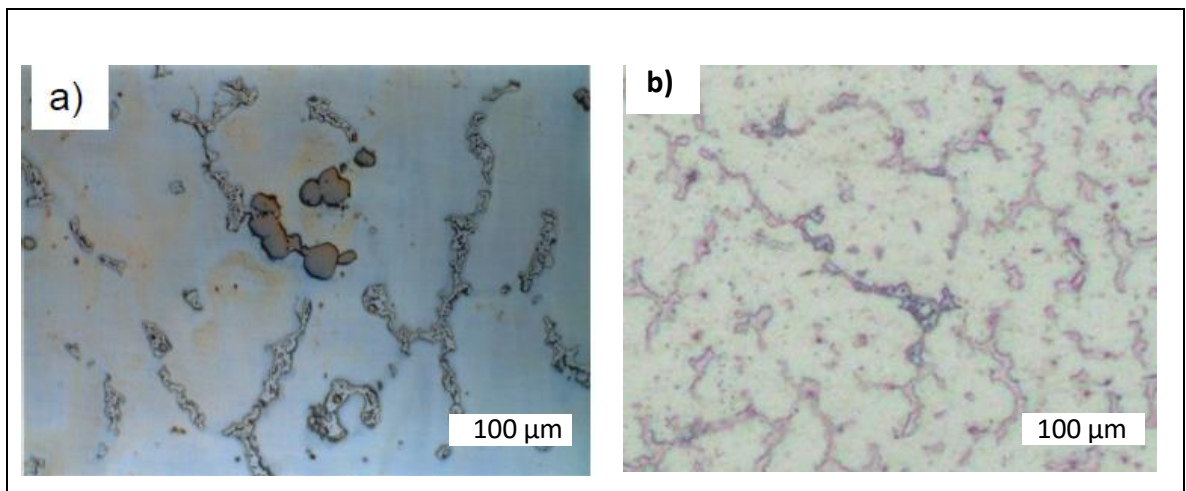
Relacionando la microdureza obtenida con la microestructura y composición de la aleación se puede establecer que la muestra M2 tienen una mayor dureza debido que presenta mayor cantidad de fase eutéctica con respecto a las otras dos muestras M1 y M3.

4.5. COMPARACIÓN MICROESTRUCTURAL DE LAS ALEACIONES OBTENIDAS CON UNA ALEACIÓN COMERCIAL.

Para hacer el análisis comparativo en términos microestructurales de las aleaciones obtenidas con una aleación comercial AZ91 proveniente de colada, encontrada en la literatura, se seleccionó la muestra M3. La figura 9 muestra las micrografías obtenidas mediante microscopía óptica de las dos aleaciones, tomadas a diferentes aumentos. Las dos aleaciones presentan la microestructura típica de la aleación AZ91 obtenida por colada, constituida por una matriz de fase α -Mg y un eutéctico

parcialmente divorciado de fase β y α . De forma detallada se puede observar que la aleación M3 presenta una microestructura ligeramente más fina, comparada con la aleación comercial. También es evidente en la aleación comercial la presencia de precipitados de Mn-Al de tamaño relativamente grande. En términos generales, se puede decir que las aleaciones M1 y M3 obtenidas en el laboratorio presentan una microestructura muy similar a la encontrada a la aleación comercial.

Figura 9. Comparación de micrografías obtenidas mediante microscopía óptica. a) Aleación AZ91 comercial a 200x. b) Aleación AZ91 M3 obtenida en el laboratorio a 200x.



5. CONCLUSIONES

En este trabajo de grado se elaboraron en un horno de inducción aleaciones de magnesio AZ91 a escala de laboratorio y se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- En ensayos preliminares se pudo determinar que el tiempo de proceso tiene una influencia significativa ya que tiempos cortos de proceso no se lograba la fusión total del material y un tiempo muy largo generaba oxidación e incluso la pérdida total de la carga. Por otro lado, el material del molde no ejerció una influencia significativa debido a que la colada se hizo dentro del horno, manteniendo las mismas condiciones de temperatura para los dos moldes.
- Por la dificultad de controlar la temperatura exacta del horno al momento de realizar la fusión en cada una de las muestras no se logró medir las pérdidas por oxidación, siendo posible calcular solamente las pérdidas totales del proceso. Sin embargo, de acuerdo al análisis microestructural y de composición química elemental se identificó que la muestra M2 tuvo mayor pérdida por oxidación de magnesio asociado a la alta temperatura que pudo tener el horno debido a que no se tenía control de ella ocasionando un enriquecimiento en aluminio del baño.
- Los estudios de caracterización microestructural realizados tanto por MO y MEB a cada una de las muestras obtenidas revelan que M1 y M3 presentaron una microestructura correspondiente a la aleación de magnesio AZ91 comercial, con una fase α rica en Mg y un eutéctico [α -Mg + fase β] parcialmente divorciado. Además, se mantuvieron en los rangos de composición elemental de acuerdo a los resultados obtenidos por DRX, mientras que la muestra M2 no corresponde a una aleación AZ91, teniendo mayor porcentaje en peso de Al (18,41 %) lo que muestra en su microestructura mayor cantidad de eutéctico.

- Las muestras M1 y M3 presentan unas características microestructurales muy similares a la presentada por al aleación comercial, encontrada en la literatura, cumpliendo satisfactoriamente con el acercamiento a la fabricación de la aleación comercial a escala de laboratorio.

6. RECOMENDACIONES

En este trabajo se propuso fabricar la aleación comercial de magnesio AZ91 con una metodología desarrollada en el laboratorio de fundición de la universidad; la cual permite alcanzar los resultados y propiedades compatibles característicos de ella.

Los resultados indican que se alcanzó el objetivo propuesto sin embargo es necesario continuar las investigaciones hasta aquí realizadas. Para ello, se plantean las siguientes recomendaciones.

- Trabajar con una atmósfera de CO_2 y utilizar sales protectoras para el baño líquido para disminuir las pérdidas de magnesio por oxidación.
- Realizar el proceso de fusión en un horno diferente al de inducción posiblemente un horno eléctrico para tener un mejor control de la temperatura y evitar el sobrecalentamiento de la carga y su posterior oxidación.
- Adicionar pequeñas cantidades de Mn, característico de la aleación comercial pero que no se implementó en este proyecto.
- Efectuar estudios para el tratamiento, valorización y utilización de los residuos generados durante el proceso, como lo son los gases emitidos por la oxidación del magnesio.

CITAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] MANOJ Gupta. NAI M Ling S. Magnesium, Magnesium Alloys, and Magnesium Composites. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey, 2011.
- [2] KLEINER, M. GEIGER, M. KLAUS, A. Manufacturing of lightweight components by metal forming. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2003.
- [3] Du, J.; HAN, W.; PENG, Y. Life cycle greenhouse gases, energy and cost assessment of automobiles using magnesium from Chinese Pidgeon process. Journal of Cleaner Production, 2010.
- [4] POLMEAR, I.J. Light Alloys. Metallurgy of the light metals, 3rd Edition, Arnold, London, 1995.
- [5] COCA, P.; Rosique, J. Ciencia de materiales. Ediciones Pirámide, Madrid, 1992.
- [6] ADOLFO J Saá S. Estudio experimental basado en la rugosidad superficial para la selección de herramientas y condiciones de corte en operaciones de refrentado en seco a baja velocidad de piezas de magnesio. Tesis doctoral. Ingeniero Industrial. Universidad Nacional de Educación a Distancia. Madrid, España-2015.
- [7] L. Čížek, M. Greger, L.A. Dobrzański, I. Juříčka, R. Kocich, L. Pawlica, T. Tański. Structure and properties of alloys of the Mg-Al-Zn system. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, volume 32 (2009).
- [8] ASM HANDBOOK. Casting. Volumen 15. Novena edición. ASM International. 2001.

[9] LUCCI, Roberto O. Reciclado de magnesio: recuperación de la aleación AZ91 a partir de virutas de mecanizado. Tesis Doctoral. Ciencia de la Ingeniería. Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba, Argentina-2015.

[10] GIL Mur, Francisco. Aparicio, Conrado. Manero, José. Rodríguez, Daniel. Doménech, Albert. Arandés, Miguel. Planell, Josep A. Aleaciones Ligeras. Edición de la Universidad Politécnica de Catalunya, SL. Barcelona, 2001.

[11] HERNÁNDEZ Tufiño, Gustavo. Caracterización de Aleaciones de Magnesio (AZ80). Tesis. Instituto Politécnico Nacional. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Unidad Profesional Azcapotzalco. México D.F. Junio 2012.

[12] THARUMARAJAH, A.; KOLTUN, P. Is there an environmental advantage of using magnesium components for light-weighting cars, Journal of Cleaner Production, 2007.

[13] A. PARDO, M.C. MERINO, A.E. COY, F. VIEJO, R. ARRABAL, S. FELIÚ JR. Influencia de la microestructura y la composición sobre el comportamiento de la corrosión de las aleaciones de Mg / Al en medios de cloruro. Departamento de Ciencia de Materiales, Facultad de Química, Universidad Complutense, 28040 Madrid, España, 2008.

[14] MANZANARES Grados, Ruth Aracelis. Estudio del Comportamiento frente a la Corrosión de aleaciones de Magnesio: AM20, AZ31 y AZ91 HP recubiertas con SiC por dispersión con láser, y con Zinc por rociado térmico por arco (arc spray) y por gas frío (cold spray). PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA. Lima, Mayo 2009.

[15] OPTI Materiales para el transporte y la energía. Tendencias tecnológicas a medio y largo plazo. Observatorio de prospectiva tecnológica industrial, Ministerio de Ciencia y Tecnología, 2003.

[16] PARDO A., MERINO M.C, COY A.E., ARRABAL R., VIEJO F., MATYKINA E. Corrosion behaviour of magnesium/aluminium Alloys in 3.5 wt. % NaCl. Manchestern United Kingdom, 2007.

[17] ASTM E3-11(2017) Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.

[18] ASTM E407-07(2015) Standard Practice for Microetching Metals and Alloys, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.

[19] SUNGHAK LEE, SEUNG LEE, DO HYANG. Effect of Y, Sr and Nd additions on the Microstructure and Microfracture Mechanism of squeeze-Cast AZ91-X Magnesium Alloys. Metallurgical And Materials Transactions volume 29 A. Korea 1997.

BIBLIOGRAFÍA

A. PARDO, M.C. MERINO, A.E. COY, F. VIEJO, R. ARRABAL, S. FELIÚ JR. Influencia de la microestructura y la composición sobre el comportamiento de la corrosión de las aleaciones de Mg / Al en medios de cloruro. Departamento de Ciencia de Materiales, Facultad de Química, Universidad Complutense, 28040 Madrid, España, 2008.

ADOLFO J Saá S. Estudio experimental basado en la rugosidad superficial para la selección de herramientas y condiciones de corte en operaciones de refrentado en seco a baja velocidad de piezas de magnesio. Tesis doctoral. Ingeniero Industrial. Universidad Nacional de Educación a Distancia. Madrid, España-2015.

ASM HANDBOOK. Casting. Volumen 15. Novena edición. ASM International. 2001.

ASTM E3-11(2017) Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.

ASTM E407-07(2015) Standard Practice for Microetching Metals and Alloys, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.

COCA, P.; Rosique, J. Ciencia de materiales. Ediciones Pirámide, Madrid, 1992.

DU, J.; HAN, W.; PENG, Y. Life cycle greenhouse gases, energy and cost assessment of automobiles using magnesium from Chinese Pidgeon process. Journal of Cleaner Production, 2010.

GIL Mur, Francisco. Aparicio, Conrado. Manero, José. Rodríguez, Daniel. Doménech, Albert. Arandés, Miguel. Planell, Josep A. Aleaciones Ligeras. Edición de la Universidad Politécnica de Catalunya, SL. Barcelona, 2001.

HERNÁNDEZ Tufiño, Gustavo. Caracterización de Aleaciones de Magnesio (AZ80). Tesis. Instituto Politécnico Nacional. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Unidad Profesional Azcapotzalco. México D.F. Junio 2012.

KLEINER, M. GEIGER, M. KLAUS, A. Manufacturing of lightweight components by metal forming. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2003.

L. Čížek, M. Greger, L.A. Dobrzański, I. Juříčka, R. Kocich, L. Pawlica, T. Tański. Structure and properties of alloys of the Mg-Al-Zn system. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, volume 32 (2009).

LUCCI, Roberto O. Reciclado de magnesio: recuperación de la aleación AZ91 a partir de virutas de mecanizado. Tesis Doctoral. Ciencia de la Ingeniería. Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba, Argentina-2015.

MANOJ Gupta. NAI M Ling S. Magnesium, Magnesium Alloys, and Magnesium Composites. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey, 2011.

MANZANARES Grados, Ruth Aracelis. Estudio del Comportamiento frente a la Corrosión de aleaciones de Magnesio: AM20, AZ31 y AZ91 HP recubiertas con SiC por dispersión con láser, y con Zinc por rociado térmico por arco (arc spray) y por gas frío (cold spray). PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA. Lima, Mayo 2009.

OPTI Materiales para el transporte y la energía. Tendencias tecnológicas a medio y largo plazo. Observatorio de prospectiva tecnológica industrial, Ministerio de Ciencia y Tecnología, 2003.

PARDO A., MERINO M.C, COY A.E., ARRABAL R., VIEJO F., MATYKINA E. Corrosion behaviour of magnesium/aluminium Alloys in 3.5 wt. % NaCl. Manchester United Kingdom, 2007.

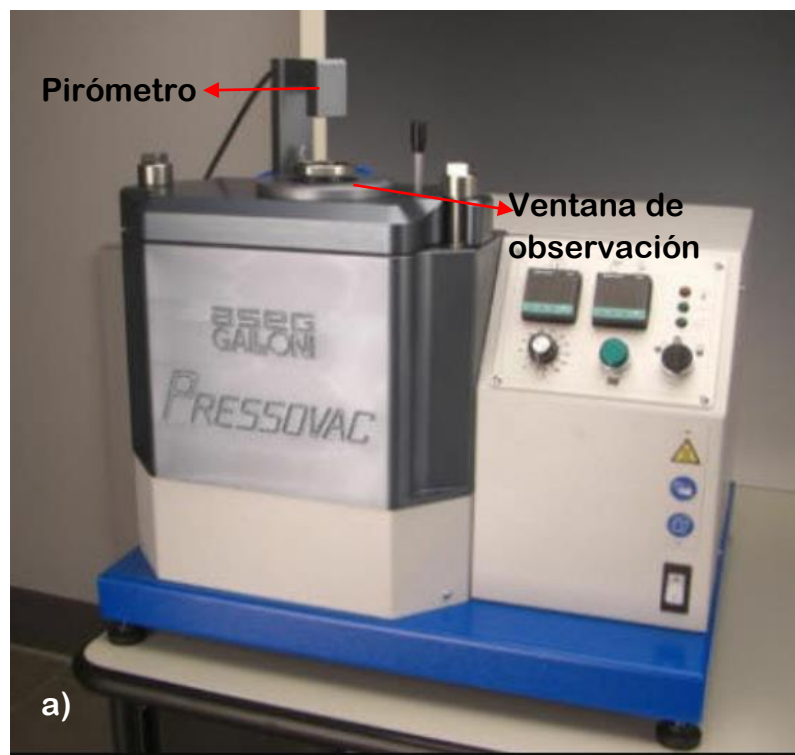
POLMEAR, I.J. Light Alloys. Metallurgy of the light metals, 3rd Edition, Arnold, London, 1995.

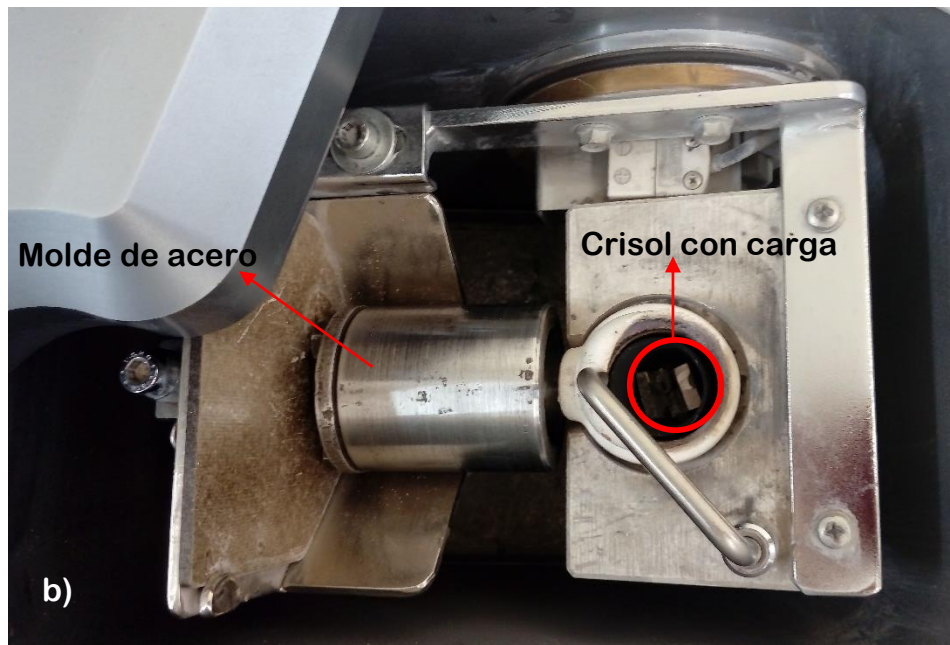
SUNGHAK LEE, SEUNG LEE, DO HYANG. Effect of Y, Sr and Nd additions on the Microstructure and Microfracture Mechanism of squeeze-Cast AZ91-X Magnesium Alloys. Metallurgical And Materials Transactions volume 29 A. Korea 1997.

THARUMARAJAH, A.; KOLTUN, P. Is there an environmental advantage of using magnesium components for light-weighting cars, Journal of Cleaner Production, 2007.

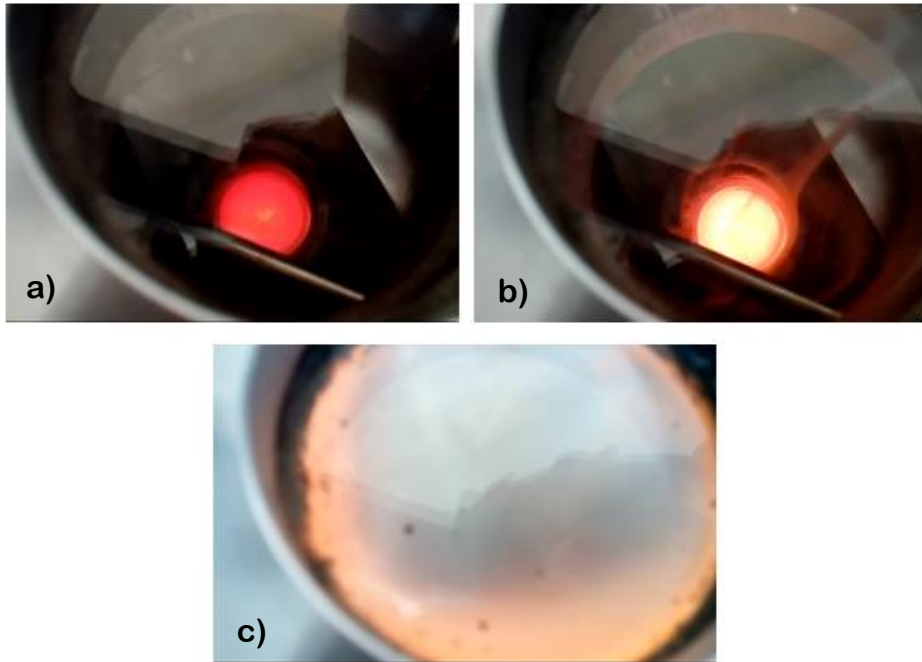
ANEXOS

Anexo A. Horno de inducción con atmósfera controlada por argón de la casa comercial "ASEG GALONI". a) Vista general del horno, b) vista interna del horno.

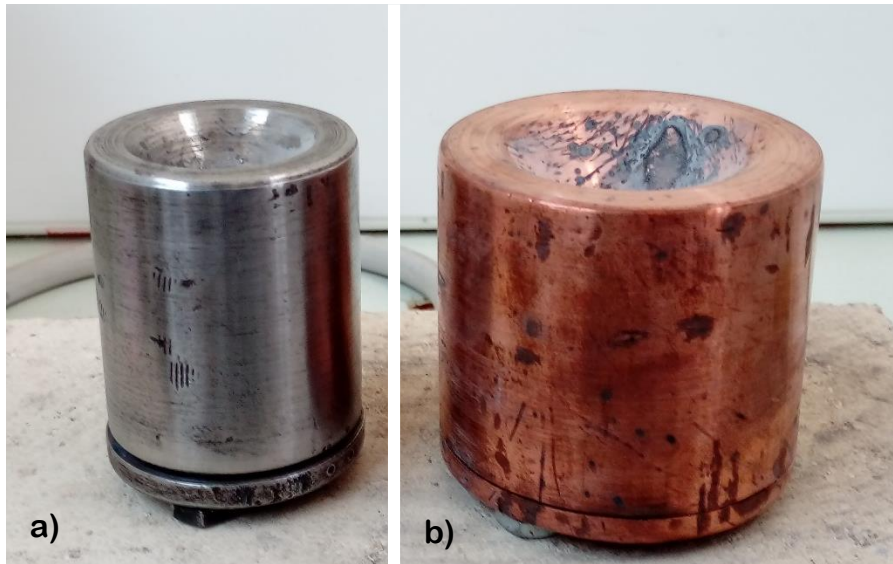




Anexo B. Ventana de observación de las etapas del proceso de fundición de la aleación AZ91 a) Crisol rojo, b) presencia de humos producto de la oxidación del Mg, c) Ventana totalmente tapada por los humos.



Anexo C. Moldes utilizados para la fabricación de la aleación AZ91 a) molde de acero, b) molde de cobre.



Anexo D. a) Crisol luego del proceso de fabricación con presencia de Mg oxidado y parte del material que no alcanzó el proceso de fundición, b) Botón obtenido del material que alcanzó la colada.

