Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

Instituto de Investigación en Ciencias Básicas y Aplicadas.

Centro de investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas.

Tesis.

Diseño, Síntesis y caracterización de compositos base Al-Mg con adición de polvos de Fe.

Para obtener el Título de:

Maestría en Ingeniería y Ciencias Aplicadas.

Presentado por:

Gabriel Tapia Manrra.

Director de tesis:

Dr. Isaí Rosales Cadena

Cuernavaca, Morelos a 04 de abril del 2025

Resumen

En este trabajo se estudian propiedades morfológicas en general modificando su estructura, en aleaciones binarias Al y Mg, este último agregado al 10, 15 y 20% del peso atómico. Se realizo el diseño de aleaciones de acuerdo con la información referida, estas fundidas a 800°C para después caracterizar fases formadas de la aleación ($Al_{12}Mg_{17}$, Al_3Mg_2, AlMg) y así como su formación dendrítica, posterior a ello se procedió hacer el tratamiento térmico de revenido a 250 °C por 1 hora y sumergirlos en agua para llevar a cabo la Inter difusión. Se hicieron pruebas mecánicas de dureza y desgaste. Se añadió el elemento reforzante Fe a las aleaciones binarias, caracterizando su morfología del nuevo composito con el microscopio electrónico de barrido (SEM), también se realizó un estudio de estequiometria de la estructura cristalina por rayos X. Por último se hacen los estudios de pruebas mecánicas de dureza Vickers y desgaste esta por la técnica de fricción. De acuerdo con los datos obtenidos, lo propiedades mecánicas tanto dureza como, desgaste pueden ser proporcionales sin embargo hay excepciones debido a las porosidades formadas tanto en la frontera de grano como dentro de este, que no logra resolver por el tratamiento térmico.

Dedicatoria

Algún día nos hemos preguntado, del por qué muchas cosas, y que pasaría si nosotros hiciéramos las cosas diferentes, de esa manera que nos cuestionamos buscamos respuestas siempre y cuando estas tengan sentido alguno, la ciencia es producto de las dudas que el ser humano se ha cuestionado tiempos atrás, donde solo algunas respuestas han quedado respondidas, pero hay muchas sin responder.

El conocimiento está al alcance de todos solo hace falta la iniciativa de la duda, y conocer los procedimientos que se deben realizar para la obtención de buenos resultados, tomando en cuenta las limitaciones que se dan durante una investigación.

La explotación del conocimiento en la aplicación de la vida diaria puede llevar grandes resultados, lo difícil es entenderlo. Esta investigación, es gracias al soporte de Universidad Autónoma del Estado de Morelos, así como, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. Del cual quiero dedicar esta investigación**.**

Agradecimiento

Sin el apoyo de la persona, dirección y consejos no fuera posible esta investigación debido al procedimiento que se requiere, como también el manejo de materiales, una investigación que ha cumplido sus objetivos del cual podamos haber aportado en la ciencia de estos mismos, se tuvo sus complicaciones, pero nada sin resolver, quiero extender un agradecimiento profundo al Dr. Isaí Rosales Cadena por haber aceptado esta propuesta y poder apoyarme y dirigirme en este proyecto, así mismo a las instituciones antes mencionadas, Universidad Autónoma del Estado de Morelos especialmente al Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas como también al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, si olvidar al personal jurado, que también aporto en esta investigación.

Tabla de contenido

RESUMEN……2

DEDICATORIA……3

AGRADECIMIENTO ……,,……4

TABLA DE CONTENIDOS……5

1. IDENTIFICACION DEL PROBLEMA

1.1. ANTECEDENTES……..……7

1.1.1. Introducción……..……..7

1.1.2. Antecedentes……..……..…8

1.1.3. Marco teórico…… 10

1.1.4. Planteamiento del problema……..…..14

1.2. FORMULACION DE OBJETIVO……...15

1.2.1. Objetivo general ……..……15

1.2.2. Objetivos específicos ……..15

2. ALCANCE Y LIMITACIONES

2.1. Alcance……..16

2.2. Limitaciones ……16

3. METODOLOGÍA

3.1. Marco metodológico……..16

3.1.1. Metodología experimental ……18

3.1.2. Procedimiento experimental……19

3.1.3. Diseño de aleaciones (Aleaciones binarias) ……..20

3.1.4. Corte y paso de materiales……..23

3.1.5. Fundición y colada……24

3.1.5.1. Pulido……..26

3.1.6. Preparación metalográfica de los materiales……27

3.1. Adición de refuerzo (Fe)……29
3.1.1. Diseño de aleaciones con Fe……30
3.1.1.1. Corte y diseño de aleaciones……30
3.1.1.2. Fundición y colada……..30
3.1.1.3. SEM y rayos X……30
3.1.2. Microdureza Vickers……30
3.1.3. Pruebas de desgaste……..31
3.2.4. Técnicas de caracterización……..33

4. RESULTADOS

4.1. Caracterización de la microestructura……47
4.2. Propiedades mecánicas……57
4.3. Pruebas de desgaste……58
5. Discusión……61
6. Conclusiones……62
7. Recomendaciones……62
8. Referencia bibliográfica ……..62
9. Anexos ……..65

IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

ANTECEDENTES

Introducción.

Hoy en día la importancia del uso de materiales en los automóviles, que den seguridad y desempeño aumentan continuamente.

Los fabricantes de vehículos están obligados a cumplir con las normas anticontaminación, lo que conlleva fabricar carrocerías con nuevos materiales, reduciendo el peso del vehículo y, por tanto, el consumo de combustible, disminuyendo los gases contaminantes. La unión de esos dos factores ha dado lugar a las carrocerías que incorporan la gran mayoría de los modelos actuales, denominadas autoportantes: el chasis soporta la carrocería y la carrocería soporta el chasis. Están formadas por una estructura compacta, fabricada de una serie de compuestos que la dotan de rigidez y seguridad (Sandeep Khelge, 2021).

Ante tal necesidad crear materiales ligeros y resistentes**,** la industria automotriz como aeroespacial y naval ha desarrollado una serie de materiales sumamente efectivos para elevar la seguridad, la eficiencia y el desempeño. De paso, estos novedosos materiales se están fusionando para combinar sus propiedades y sacar un mejor provecho.

Uno de los materiales con poca investigación y experimentación son los materiales compuestos reforzados con partículas que en la mayoría son polímeros y fibras, pocos son enfocados en metales donde solo hay aleaciones ya trabajadas y estandarizadas para la industria automotriz.

En estos materiales compuestos las partículas de material duro y frágil, dispersas

de forma discreta y uniforme se rodean de una matriz más blanda y dúctil el cual uno de los principales elementos metálicos es aluminio que es ligero y de bajo coste, siendo además unos de los materiales abundantes en el mundo, como también cuenta con grandes propiedades mecánicas siendo uno de los metales que más aleaciones tiene debido a lo anterior explicado. (Ian Polmear, 2017)

El acero cómo bien se sabe es un material resistente y tenaz que tiene aplicaciones en la industria, sería un material idóneo para poder hacer un composito y mejorar propiedades mecánicas y aligerarlo, sin embargo, para la investigación no se puede formar un composito muy fácil con acero. Con Aluminio si, pues el Al puede embeber las partículas, el acero no tan fácil por su alto punto de fusión. Pues requerirían de prensas muy potentes y atmósfera controlada.

En los últimos años, la fuerte demanda de componentes ligeros componentes de integración de estructura ligera y función de alto rendimiento y bajo coste, lo que plantea grandes retos a las propiedades de las aleaciones de Al y Mg aleaciones. Para hacer frente a este problema a largo plazo, es esencial seguir desarrollando las aleaciones de Al y Mg. (Groover, 2019)

Antecedentes

Por sus propiedades Aluminio y Magnesio son materiales con gran ligereza y puntos de fusión bajo que no rebasan los 700 °C y son ideales para el estudio. y son muy utilizados para estructuras, y componentes en las industrias antes mencionadas, El aluminio es un elemento de aleación, incluido en la clase AZ de aleaciones de magnesio designado por la ASTM (American Society for Testing and Materials), por su disponibilidad, baja densidad, resistencia a la corrosión deseable y propiedades mecánicas mayormente materiales de fundición moldeables.

En estas aleaciones el aluminio forma precipitados de fase b, un compuesto Inter metálico con una composición de composición de $Mg_{17}Al_{12}$ y una estructura cúbica centrada en el cuerpo. Estos precipitados refuerzan las aleaciones de magnesio al resistir el movimiento de las dislocaciones basales. (X.L. Ma, 2019)

Estos dos metales son las matrices mas utilizadas en cuanto se habla de baja densidad y alta conductividad térmica con atractivas combinaciones de resistencia ductilidad y tenacidad. Las aleaciones de matriz metálica debido a que estos pueden alterar sus propiedades han atraído bastante interés. Donde ciertas propiedades mecánicas se fortalecen cuando estas unen a otra, pero otras propiedades mecánicas hacen lo contrario estas se debilitan.

Ahora bien, los compuestos reforzados con partículas que dependiendo del tamaño y la naturaleza de estas que influyen en las propiedades, estos se clasifican en:
a) Compuestos endurecidos por dispersión.
b) Compuestos con partículas.
Los compuestos endurecidos por dispersión el tamaño de las partículas es muy pequeño, con diámetros de 100-2500 Å (Zhanwei Yuan, 2020). Debido a que estas partículas dificultan el movimiento de las dislocaciones, producen un efecto de endurecimiento notable en el material con pequeñas cantidades. A esto se añade que no presentan problemas de ablandamiento debido a la fatiga, crecimientos de grano con mejor resistencia a la fluencia que los metales y aleaciones a los que refuerzan.

Los compuestos con partículas contienen grandes cantidades de partículas gruesas que no dificultan de manera efectiva el movimiento de dislocaciones. En estos se incluyen numerosas combinaciones de metales, cerámicas y polímeros. El objetivo de estos radica en producir combinaciones de propiedades poco frecuentes y no en mejorar la tenacidad.
La fabricación de estos materiales habitualmente implica métodos físicos como proyección térmica, pulvimetalurgia, aleación mecánica, colada convencional, bajo presión o por infiltración, junto a métodos químicos como el de obtención de las partículas de refuerzo in situ. (C. Hu, 2014)
Cada uno de estos métodos tiene sus ventajas e inconvenientes. Sin embargo, la vía pulvimetalúrgica presenta, generalmente, mejores propiedades, en términos de

mayor resistencia de los compuestos, que los obtenidos por colada o in situ, y a unos costos de fabricación aceptables.

Las aleaciones de Al-Mg son conocidas por tener la mayor resistencia de todas las aleaciones de Al sin tratamiento térmico, además de tener una buena resistencia a la corrosión y capacidad de soldadura, lo que da lugar a un amplio uso de estas aleaciones en la industria (especialmente en el sector naval). Entre ellas se incluyen la serie 5000 de aleaciones forjadas y la serie 500 de aleaciones fundidas. (Polmear, StJohn, Nie, & Qian, 2017)

Aunque las aleaciones Al-Mg parecen ser relativamente resistentes al desgarro en caliente en comparación con otras aleaciones Al todavía muestran una tendencia a formar micro fisuras y porosidad con el aumento del contenido de Mg debido a un aumento del hidrógeno atrapado (Hiromi NAGAUMI, 2002). Es sabido que para mejorar las propiedades mecánicas de un material metálico es el refinamiento de grano, esto mismo, reduce los defectos durante la fundición que estos incluyen porosidad, macro segregación, propiedades no uniformes, y desgarro en caliente y en frío (Hall, 1951) (Jeong, 2015)

Marco teórico

Durante los últimos años las principales problemáticas a nivel mundial son la contaminación por emisión de gases y otras más, donde las principales fuentes de estas emisiones son de fábricas y el transporte, como se ha mencionado anteriormente el peso es un factor muy importante en la fábrica de automóviles y su relación con el uso de combustible, entre más peso más quema de combustible aunado a la poca potencia que este adquiere para el movimiento. Además, la innovación de nuevos medios de transporte demanda a los proveedores de estas industrias nuevos materiales aleantes que sean de buen manejo y de grandes propiedades mecánicas dependiendo la aplicación de este material. (I. Chung, 2012)

La utilización de materiales ligeros y de gran resistencia puede reducir estas emisiones hacia el ambiente. (Tonshoff, 2006) (Horst E. Friedrich, 2006)

El uso de ciencia e ingeniería en la investigación ha dado materiales que se requieren para una especifica aplicación, no obstante, se sigue estudiando en nuevos materiales con nueva tecnología para reemplazar a los ya existentes hoy en día utilizando metodologías diferentes y tratamientos térmicos.

La fuerte demanda de componentes ligeros y función de alto rendimiento y bajo coste, lo que plantea grandes retos a las propiedades de las aleaciones de Al y Mg aleaciones. Para hacer frente a este problema a largo plazo, es esencial seguir desarrollando estas aleaciones. (Groover, 2019)

En la actualidad, los procesos convencionales de las aleaciones de Al y Mg incluyen principalmente líquido y la forja. La conformación líquida es por fundición en arena, fundición por compresión, fundición por gravedad, fundición a alta presión (HPDC, High Pressure Die Casting), etc. (Li, 2020) (Zhu, 2010) (Gan LI, 2021)

La principal limitación para un uso más amplio de las aleaciones de magnesio-aluminio HPDC es la baja ductilidad, debida principalmente a la nucleación de microporosidad por contracción en los límites de grano. En estas regiones, las frágiles partículas $Mg_{17}Al_{12}$ también están presentes a menudo como fase eutéctica divorciada. Por lo tanto, el conocimiento de los mecanismos de formación de la fase eutéctica divorciada y su descripción química y microestructural puede ayudar a entender la razón de la baja ductilidad y puede dar sugerencias de mejora. (Bowles, 2001) (Gokhale, 2001)

Estudios muestran que la morfología del eutéctico se divorcia como consecuencia de la elevada velocidad de enfriamiento que tiene lugar en el proceso HPDC y que la zona altamente microsegregada en los límites de grano es el lugar más adecuado para la contracción de la nucleación de microporosidades. La deformación reticular debida a el mayor contenido de elementos de aleación cerca de los límites de grano, en la interfaz con la fase frágil $Mg_{17}Al_{12}$, puede producir deformaciones internas y, por tanto, pérdida de ductilidad. (S. Barbagallo, 2004).

Los materiales compuestos reforzados con partículas pueden seleccionarse para

lograr combinaciones poco usuales de rigidez, resistencia, peso, rendimiento a alta temperatura, resistencia a la corrosión, dureza o conductividad.
Mayormente este tipo de características es más utilizado en materiales no metálicos y sus estudios son más enfocados a estos últimos.
Estos materiales nacen de la necesidad de obtener materiales que combinen las propiedades de los cerámicos, los plásticos y los metales.
A pesar de haberse obtenido materiales con unas propiedades excepcionales, las aplicaciones prácticas se ven reducidas por algunos factores que aumentan mucho su costo, como la dificultad de fabricación o la incompatibilidad entre materiales.
La gran mayoría de los materiales compuestos son creados artificialmente.
Anteriormente hay trabajos que se centran en el desarrollo por pulvimetalurgia de diferentes compuestos de matriz de aluminio reforzados con partículas cerámicas considerando la influencia fundamental de diferentes contenidos de refuerzo en la microestructura y propiedades de los compuestos.
Estas propiedades, fundamentadas en su respuesta a tracción, se han comparado con los compuestos desarrollados por la misma vía reforzados con SiC, considerados como estándar. Se han realizado ensayos de tracción a temperatura ambiente y elevadas temperaturas durante la extrusión de los materiales como después de un tratamiento térmico. Las fracturas, y otros aspectos microestructurales se analizan por microscopía electrónica de barrido, para estudiar la distribución del refuerzo, en todos los casos, por una parte, y la unión entre la matriz y el refuerzo por otra. (Sumesh Narayan, 2017)

La mayor parte del aluminio producido se moldea y fabrica en productos de aleación. Las propiedades mecánicas de las aleaciones no tratables térmicamente se controlan mediante endurecimiento por trabajo y recocido, mientras que los grupos tratables térmicamente se refuerzan mediante endurecimiento por envejecimiento.
La mayor atención están en aplicaciones comerciales industrias aeroespacial,

automotriz, marítima, de embalaje y de la construcción. Las aleaciones más ligeras que contienen litio están encontrando aplicaciones estructurales en aviones modernos. Otras piezas más especializadas incluyen el proceso pulvimetalurgia.
A380 es una de las aleaciones de aluminio más comúnmente especificadas con una serie de beneficios importantes (Ian Polmear, Wrought Aluminium Alloys, 2017) (Khisheh, 2021):

- Ofrece la mejor combinación de fundición y propiedades térmicas y mecánicas
- Muestra una excelente fluidez, hermeticidad y resistencia a la fisuración en caliente
- Se utiliza para una amplia variedad de productos, entre ellos chasis, soportes de motor, estuches de caja de cambios, muebles para el hogar, energía y herramientas de mano. Estas partes reciben mayor desgaste mecánico debido a las cargas con las que están actuando en cuanto al chasis aunado el sistema de suspensión y demás como sistema de frenos y los ejes de la rueda.

Los principales elementos de aleación del aluminio son los siguientes y se enumeran las ventajas que proporcionan. (Takahiro Kimura, 2021)

• Cromo (Cr) Aumenta la resistencia mecánica cuando está combinado con otros elementos Cu, Mn, Mg.

• Cobre (Cu) Incrementa las propiedades mecánicas, pero reduce la resistencia a la corrosión.

• Hierro (Fe). Aumenta la resistencia mecánica y a la fatiga.

• Magnesio (Mg) Tiene una gran resistencia tras el conformado en frío.

• Manganeso (Mn) Incrementa las propiedades mecánicas y reduce la calidad de embutición.

• Silicio (Si) Combinado con magnesio (Mg), tiene mayor resistencia mecánica.

• Titanio (Ti) Aumenta la resistencia mecánica.

• Zinc (Zn) Aumenta la resistencia a la corrosión.

• Escandio (Sc) Mejora la soldadura

La respuesta de polvo de aluminio mediante molienda de bolas demuestra que la reducción en el tamaño de grano resulta en un aumento de varias veces en dureza y resistencia; las respuestas del aluminio dependían de la velocidad de deformación independientemente el tipo de endurecimiento que se le da. (Akhtar S. Khan, 2006)

La presencia de granos columnares de textura cúbica proporciona distribuciones de tensión-deformación más homogéneas dentro de las piscinas de fusión y descarga las regiones adyacentes de granos finos equiaxiales, reduciendo así la alta concentración de tensión en ellos (V. Romanova, 2021).

Mediante nuevo método sinterización y prensado bajo la densidad del aluminio prealeado sinterizado por debajo de 0,1 MPa a 575 ° C es de 2,732 g / cm3 y la resistencia máxima a la tracción es de 228,16 MPa con una ductibilidad del 12%, lo que da un buen equilibrio de plasticidad y resistencia (Lei Wu, 2021).

Planteamiento del problema

En la búsqueda de automóviles altamente eficientes y con un alto nivel de seguridad, los fabricantes han recurrido al uso de materiales ligeros que permitan alcanzar un alto nivel de ligereza y de paso mayor resistencia.

Antes se decía cuanto más pesado, más fuerte en la creación de materiales, en la actualidad sucede todo lo contrario. Gracias a las innovaciones, en la actualidad, existen materias primas que son más sumamente ligeras y resistentes. Un ejemplo de ello es el aluminio que además ser mucho más ligero que acero tiene un nivel de resistencia mucho mayor cuando se le compara con el acero.

Dentro de la lista de materiales que se han hecho comunes en la composición de un automóvil está el acero de alta resistencia, el aluminio y la fibra de carbono. A veces se usan por separado y en otras ocasiones se combinan para alcanzar sus más altas propiedades. (Society of automotive engineers, 1977)

Podemos encontrar aceros endurecidos al horno, aceros de alto límite elástico, aceros de doble fase y de fase compleja o aceros de muy alto límite elástico, entre otros.

Otros aceros suaves son aleados con metales como el niobio, titanio o el boro, acompañados de un tratamiento térmico como puede ser el temple o revenido, para conseguir materiales más resistentes ante una colisión.
Hemos visto que el Aluminio-Hierro se sitúa como el candidato ideal si lo que buscamos ligereza, reciclabilidad y costo, que en la actualidad se utiliza.

El material con el que es elaborado el chasis debe de soportar cargas muertas o estáticas y cargas vivas o dinámicas, cargas peso de transporte y carga de impacto. Los procesos o métodos para realizar estas aleaciones son fundición inyectada en cámara caliente, fundición inyectada en cámara fría y tixoconformado que son procesos industrializados y para gran masa donde luego las muestras se tratan térmicamente con T6 (Tratamiento térmico T6) para las aleaciones sobresaliendo la maduración artificial de este tratamiento. se examinan comparativamente mediante microscopía óptica, microscopía electrónica de barrido con espectroscopía de rayos X de dispersión de energía y equipo de dureza Brinell para pruebas de calidad. (Ridvan GECU, 2018)

FORMULACIÓN DE OBJETIVOS

Hipótesis

El incremento de la cantidad de hierro en el compuesto producirá cambios estructurales con efecto en las propiedades mecánicas. este como mecanismo de impedimento del flujo plástico producida por las partículas agregadas.

EL MECANISMO PRINCIPAL ES POR PRECIPITACION

Objetivo general

Obtener una aleación diseñada con propiedades mecánicas superiores a las encontradas en su pureza donde podamos analizar y caracterizar su morfología y verificar influencia del tratamiento térmico y el elemento reforzador en la dureza y desgaste de dicho material diseñado.

Objetivos específicos

- **Diseño de aleaciones** estimar y seleccionar los porcentajes de los compuestos binarios, así como el porcentaje de elemento reforzador.
- **Caracterizar** las aleaciones para examinar las fases encontradas y la existencia de fracturas y/o deformaciones.
- **Medir características mecánicas** con el fin de analizar la influencia de la presencia de Fe y sin el contenido de este.

ALCANCE Y LIMITACIONES

Alcance

- Mostrar los efectos de una aleación binaria Al- Mg, al añadir Fe como un elemento reforzador.

Limitación

- El estudio es a atmosfera no controlada, por lo tanto, en los estudios podrán notarse algunos compuestos oxidantes u/o oxidados.

METODOLOGIA

Marco metodológico

Los compuestos de matriz de aluminio (AMC) representan una clase de MMC (Metal matrix composite) que poseen propiedades como baja densidad, alta rigidez y resistencia, resistencia superior al desgaste, coeficiente controlado de expansión térmica, mayor resistencia a la fatiga y mejor estabilidad a temperaturas elevadas. El uso de AMC en aplicaciones de motor reduce el sobrepeso, el consumo de combustible y la contaminación en los automóviles (Jaswinder Singh, 2016).

El presente estudio se centra en la preparación de un compuesto binario (Fe - Mg) mediante el proceso de moldeo por agitación añadiendo un 10%, 15% y 20% en volumen de Hierro (Fe) a la aleación de Aluminio – Magnesio, ya realizadas, después no enfocamos en pruebas experimentales para evaluar las características

de desgaste y fricción y compararlas con las de las características de aleaciones binarias.

Hot pressing es un procedimiento de alta presión en pulvimetalurgia para formar una pieza compactada utilizando polvos, igual a una temperatura controlada para impulsar el sinterizado y fluencia. Estas dos variables son simultáneas durante el proceso. El prensado en caliente se utiliza principalmente para fabricar materiales duros que la mayoría de las veces son materiales para herramientas de corte y cerámicas, en la actualidad tanto metales y cerámicas puede ser combinados por medio de este método; y donde los factores de fortalecimiento diferían significativamente dependiendo de los metales de transición añadidos (Amandine Duchaussoy, 2019).

Existen muchos procesos de fabricación para la producción de materiales compuestos de matriz metálica, entre ellos se prefiere la fundición por agitación debido a su simplicidad, flexibilidad y aplicabilidad a la producción de grandes cantidades (Sharma, 2013).

La porosidad del material matriz aumenta al aumentar el contenido de hierro. El área de los poros y el tamaño medio aumentan de 2,05 a 3,80% y de 39 597 a 70 332 μm2 con un aumento en el contenido de hierro de 1,136%. Por lo que a mayor porosidad está directamente relacionada con el contenido de hierro. Deben evitarse los niveles de hierro por encima del nivel crítico ya que esto podría causar una grave pérdida en el producto final (Vidžaja Knap, 2021).

Las aleaciones aluminio magnesio son superiores a casi todas las otras aleaciones de fundición de aluminio en cuanto a resistencia, corrosión y maquinabilidad además de excelentes condiciones de resistencia mecánica y ductilidad.

Las principales tecnologías de producción de polvo de aleación de aluminio son aleación mecánica, la atomización centrífuga, el proceso RSR, la granulación de agua con vaso giratorio, la atomización de gas, la técnica de hilado por fusión y la atomización de agua (Oleg D. Neikov, 2019).

El aluminio rinde a 390 MPa en prensado isostatico, 10 veces la tensión de

contraparte de grano grueso. El porcentaje de reducción hasta la rotura es de aproximadamente un 20% debido a la presencia de granos microcristalinos que actúan contra la propagación de fisuras. Además, Los granos microcristalinos se deforman a través de mecanismos basados en la dislocación, mientras que la evidencia actual sugiere que la matriz se deforma por un deslizamiento cooperativo del límite del grano (S. Billard, 2006).

Iniciaremos con el diseño de las aleaciones (Base Al - Fe) a las cuales les adicionamos Mg y polvos de Fe, posteriormente introducirlas en el horno a diferentes tiempos y con diferentes cantidades de Fe. Posteriormente toda la caracterización metalográfica: corte lijado, pulido y ataque químico, para su posterior observación en el microscopio. Para continuar desarrollarás propiedades mecánicas como dureza y desgaste.

Fundamentos de los materiales

Metodología experimental.

La difusión de los materiales nos habla del movimiento de partículas en el interior de objetos sólidos, modificando la temperatura interna del material, este concepto es una parte fundamental para la modificación de estructuras cristalinas de objetos solidos en mi caso hablare más de metales.

La comprensión de la correlación entre la estructura de los materiales y sus propiedades es la clase en el diseño de los materiales con las propiedades deseadas, por esta razón, se deben introducir algunas nociones de lo que se entiende por material, por propiedades y por estructura.

Se recuerda que las combinaciones binarias de estos metales, como también de otros hay variación de combinaciones y es necesario ensayarla cada una de ellas para saber que propiedades mecánicas que son atribuidas de cada aleación.

Durante el periodo experimental se diseñó las aleaciones binarias, después de este se añadirá un refuerzo en mi caso utilizare el Fe de esta manera formando un composito. Lo idea es desarrollar modelos cuantitativos en relación con la estructura y propiedades de cada elemento, apoyándome en el sistema general de diseñó de aleaciones que consta de los siguientes pasos.

Análisis

Diseño y síntesis

Implementación

Operación

Este dispositivo de inserción de alto brillo se utiliza para microscopía de barrido de rayos X que fuente ideal como nueva herramienta científica y además util para la caracterización de rayos X espacialmente resuelta en ciencia de materiales, física, química, biología y medicina.

La espectromicroscopía magnética de rayos X con resolución temporal utiliza el efecto de dicroísmo magnético circular de rayos X (XMCD) para sondear la respuesta dinámica de la magnetización de elementos específicos dentro de un material magnético que presenta un orden magnético (inducido por el campo). El XMCD revela la orientación y la magnitud de los momentos magnéticos registrando datos de absorción de rayos X con rayos X polarizados circularmente con diferente helicidad. Las geometrías típicas utilizadas para las medidas XMCD resueltas en el tiempo son la detección de promedios en la llamada geometría XMCD longitudinal. Aquí la diferencia de longitud (Boero G. a.-U., 2009)

Mz entre la longitud del vector de magnetización MEquilibrium y la proyección de la magnetización en precesión M sobre MEquilibrium se mide con el vector k de los rayos X de sondeo paralelo a MEquilibrium y un campo magnético externo aplicado BExt. Una verdadera detección resuelta en tiempo y fase se realiza en la llamada geometría transversal, sondeando el componente oscilante de M en la zona sub 20 pb. oscilante de M en el régimen de sub 20 picosegundos en modo multi bunch estándar utilizando un fotodiodo de avalancha. (Ollefs, 2015)

Procedimiento Experimental.

En el desarrollo experimental se diseñaron las aleaciones binarias, después de este se añadirá un refuerzo de partículas de Fe de esta manera formando un composito.

Materiales

Los materiales principales de acuerdo con lo antes hablado y basándonos en las propiedades de dicho material son:

Aluminio

Tabla 1 Datos de aluminio

Densidad	2698.4 kg/m^3
Punto de fusión	660 °C

Magnesio

Tabla 2 Datos de Magnesio

Densidad	1738 kg/m^3
Punto de fusión	650 °C

Hierro

Tabla 3 Datos de Hierro

Densidad	7874 kg/m^3
Punto de fusión	1535 °C

Son materiales blandos y ligeros más utilizados por la industria automotriz y aeroespacial, El hierro que en su mayoría es usado en aceros y estructuras estáticas, así como en ciertas piezas mecánicas como reforzador e igual que los otros tiene usos en las industrias antes mencionadas.

Fueron cortados en trozos pequeños de cada elemento de manera manual debido al grosor de barra de ambos elementos (Al – Mg) y al material que se estaba manejando (Mg) demasiado inflamable, para después ser fundidos en una mezcla binaria de ambos materiales se obtuvieron las probetas con diferentes porcentajes de composición siendo mayoría el aluminio que al final de todo es la matriz.

Se realizaron cortes de aproximadamente 3 x 3 mm de cada material para el fácil manejo en el crisol.

Aleaciones Binarias

Para iniciar la metodología se hacen aleaciones binarias y ser caracterizadas previas a su refuerzo y tratamiento térmico.

Diseño de Aleaciones

Teniendo como base el diagrama de fases de las aleaciones binarias Al – Mg se hicieron las siguientes combinaciones. Debido como se observa en el diagrama de fases, se analizó las fases constituyentes existen 3 fases sin que interviniera otra se optó por tener ese porcentaje en gramos de cada elemento (Al – Mg), debido a que el empirismo es inevitable el porcentaje de composición de cada elemento fue escalonado por tres tipos de combinaciones mostradas en la imagen de estos, así también cuales fueron los pesos de cada uno de los materiales aquí el esquema de los pesos con la siguiente formula:

$$\%\ de\ cada\ elemento = \frac{\text{P. A. E1 (\% E1)}}{\text{P. A. E1 (\%E1)} + \text{P. A. (\%E2)}}$$

								75g			
		80-20			alloy 1 %	Fe %		Alloy 1	Fe		
I	I	99	1		0.975024	0.02497632	1%	9.750	0.250	10.000	0.09750237
	II	97	3		0.927271	0.07272853	3%	9.273	0.727	10.000	0.27818144
	III	95	5		0.882244	0.11775611	5%	7.058	0.942	8.000	0.35289756
		75-25									
II	I	99	1		0.976342	0.02365771	1%	8.787	0.237	9.024	0.08787081
	II	97	3		0.930933	0.06906746	3%	8.378	0.691	9.069	0.25135179
	III	95	5		0.887898	0.11210242	5%	7.991	1.121	9.112	0.39955391
		70-30									
III	I	99	1		0.977517	0.02248261	1%	9.775	0.225	10.000	0.09775174
	II	97	3		0.934211	0.06578881	3%	9.342	0.658	10.000	0.28026336
	III	95	5		0.892984	0.10701574	5%	8.930	1.070	10.000	0.44649213

Diagrama de equilibrio Al – Mg

El diagrama de fase es un mapa de las fases a composiciones y temperaturas específicas, sirve como guía para la selección o procesamiento de los materiales:

La información que se puede obtener de los diagramas de fase es:

1) Conocer que fases están presentes a diferentes composiciones y temperaturas bajo condiciones de enfriamiento lento (equilibrio).

2) Determinar la solubilidad, en el estado sólido y en el equilibrio, de un elemento (o compuesto) en otro.
3) Determinar la temperatura a la cual una aleación, bajo condiciones de equilibrio comienza a solidificar y la temperatura a la cual ocurre los cambios de fase.
4) Conocer la temperatura a la cual comienzan a fundirse diferentes fases.
5) Determinar las fases de solubilidad para el proceso de endurecimiento por precipitación (Dahle, 2002).

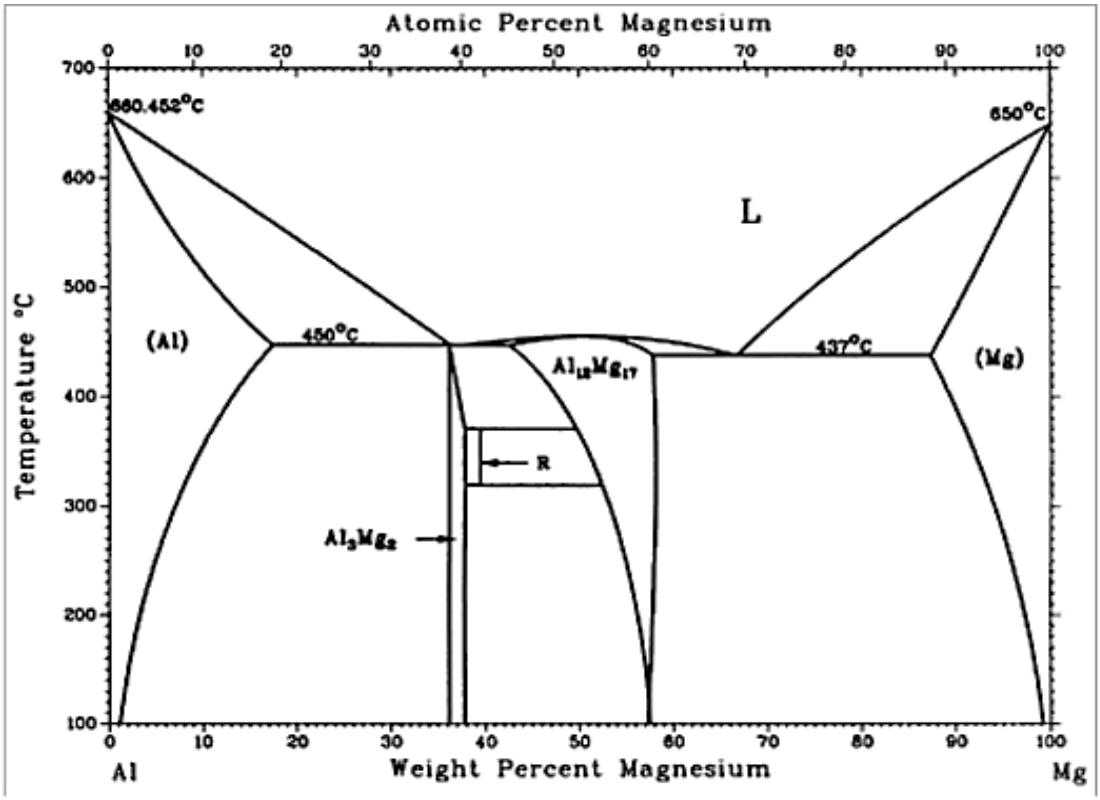


Figura 1 Diagrama de fases de la aleación Binaria Al - Mg

La figura muestra la compuestos y fases presentes, así como la temperatura eutéctica de la aleación binaria Al-Mg. Tomada de (T.B. Massalski, 1990).

Estas aleaciones presentan un punto eutéctico 38.5% de Mg y a una temperatura de 480°C. Además, estas aleaciones se dividen en aleaciones hipoeutécticas de 0 a 38.5 % de Magnesio e hipereutécticas aquellas mayores a 48.5%. El diagrama muestra una solubilidad máxima de Mg en Al 18.9%, a temperatura autéctica de 450 °C.

Aleaciones binarias Al - Mg

Existen una serie de factores y de parámetros que deben ser tomados en cuenta para obtener piezas sanas, con las dimensiones deseadas y con procesos económicamente viables, en el caso de que las muestras sean ya de manufactura, en nuestro caso las únicas variables que controlaremos es la temperatura y peso de las muestras.

El eutéctico Al - Mg de esta aleación pertenece al grupo de morfologías irregulares y laminares a pesar de su bajo contenido del material soluto.

La nucleación del eutéctico Al-Mg es una parte esencial de la evolución de la microestructura, precipitando al final de la formación de las dendritas de aluminio y por lo tanto influye en la formación de defectos en la pieza solidificada, principalmente en la porosidad y en la segregación de elementos, repercutiendo sobre las propiedades mecánicas y la calidad de la pieza.

La imagen que se muestra anteriormente muestra los diferentes compuestos generados durante la aleación.

Debido a la distribución del soluto, y máxima solubilidad decidimos tomar cuenta ese parámetro para realizar las aleaciones de que fue 20%, 15% y 10% de Magnesio en Aluminio. Tomando en cuenta una masa total especifica de 75 g en la aleación (Véase esquema 1,2,3)

Corte y peso de los materiales

Para la preparación de las aleaciones binarias mediante el proceso de colada se utilizó aluminio comercialmente puro (99,58% en peso), al igual que magnesio

comercialmente puro (99.85% en peso), se cortaron piezas pequeñas de lingotes de ambos materiales.

Tabla 4 Calculo de peso de aleación de Al al 80% y Mg al 20%.

Masa total especifica		75 g	
Elemento	%	Masa (g)	Peso atómico
Al	80	61.211	26.9815
Mg	20	13.789	24.312

Tabla 5 Calculo de peso de aleación de Al al 85% y Mg al 15%.

Masa total especifica		75 g	
Elemento	%	Masa (g)	Peso atómico
Al	85	64.710	26.9815
Mg	15	10.290	24.312

Tabla 6 Calculo de peso de aleación de Al al 90% y Mg al 10%.

Masa total especifica		75 g	
Elemento	%	Masa (g)	Peso atómico
Al	90	68.175	26.9815
Mg	10	6.825	24.312

Se procedió con el pesaje de cada material en una balanza analítica teniendo un error aproximado de ±0.005 con el real al teórico, ya pesados se resguardaron para evitar contaminación. (T.B. Massalski, 1990)

La naturaleza inflamable a altas velocidades de corte son los problemas comunes asociados al mecanizado de aleaciones de Mg, Sin embargo, mediante el uso de herramientas de corte adecuadas y la combinación de procesos, la complejidad del mecanizado del Mg y sus aleaciones puede ser mas fácil (Tönshoff, 2006) (T. Friemuth, 1999).

A velocidades de corte más altas durante el torneado, la aparición de acumulaciones debido a la adhesión del material de la pieza de trabajo a la herramienta de corte.

Por esta razón los cortes

de los materiales fueron de manera manual para la seguridad y buen manejo de los metales

Fundición y colada de las aleaciones.

El vaciado de metal líquido ocurre por gravedad, por lo cual el llenado se realiza gracias al propio peso del metal y al flujo de este hasta llenar la cavidad. El molde que utilizamos está compuesto por un sistema de llenado o bebedero y un sistema de respiración o venteos. La alimentación del molde por gravedad que utilizamos con llevo 2 fases:

- Primera fase: Dosificar el metal.
- Segunda fase: El llenado del molde se realiza por la bajada de colada en el canal de alimentación. Penetrando en el molde, el metal desaloja el aire a través del venteo.

En nuestro caso no utilizamos mazarotas.



Figura 2 Mufla



Figura 3 Molde.



Figura 4 Crisol.

Lo más conveniente para seguir con el estudio de la aleación la colada fue en un molde en forma de prisma cuadrado, para la fácil sujeción de las pequeñas muestras a analizar, la temperatura a la que se fundió la aleación fue a 850 °C para evitar impurezas solidas en la fundició, así como la homogenización de la mezcla. Dejándola enfriar durante 10 min a temperatura ambiente antes de ser desmoldada.



Figura 5 Colada

La aleación fue colada en un molde en forma de prisma cuadrado, para la fácil sujeción de las pequeñas muestras a analizar; la temperatura a la que se fundió la aleación fue a 850 °C para evitar impurezas solidas en la fundición, así como la homogenización de la mezcla. Dejándola enfriar durante 10 min a temperatura ambiente antes de ser desmoldada.

Pulido

Las aleaciones resultantes fueron tratadas para su caracterización usando lijas de carburo de silicio y posterior a usar pasta abrasiva para el pulido así limpiar la superficie del material.

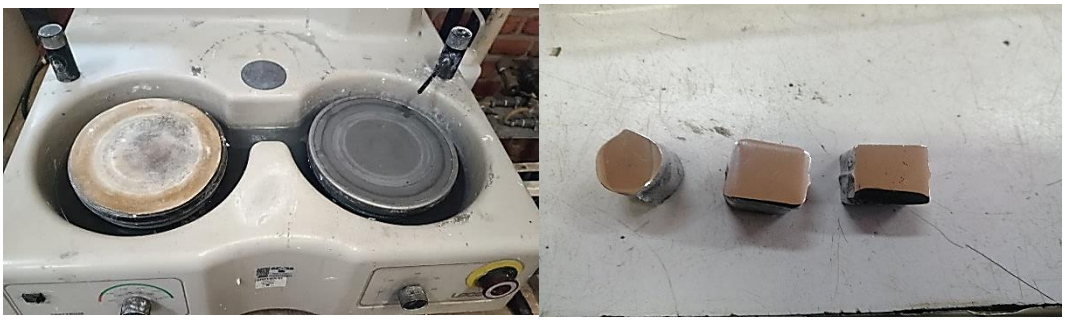


Figura 6 Desbaste y pulido. En la figura anterior se muestra la pulidora y material en proceso.

Para seguir con el procedimiento las aleaciones binarias pasan a desbaste donde se elimina la superficie imperfecta debido por el corte transversal de la herramienta,

posteriormente pasa a pulido para eliminar principalmente marcas y rayaduras ya que su caracterización en el SEM lo requiere y tener imagines sin defectos.

Las lijas que se utilizaron son de grano 350, 600, 1250, 2000, 3000 lubricando con agua y polish

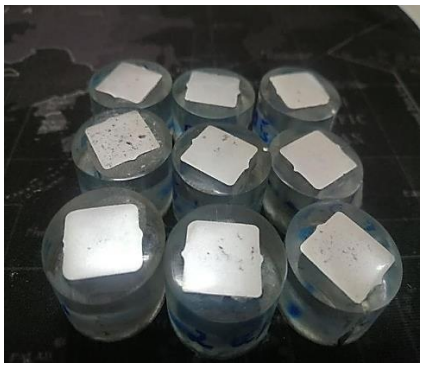
Las muestras son colocadas y sujetas en el porta lijas de grano mayor a menor a 250 rpm desbastando en un solo lado y cambiando de posición al cambio de lija. Al finalizar con lijado y pulido el material es enjuagado y secado para remover residuos del procedimiento posteriormente son resguardado para evitar la oxidación y contaminación por la superficie atmosférica.

Preparación metalográfica de los materiales

A nivel microscópico para analizar y caracterizar materiales metálicos se requiere, en primera instancia, la preparación metalográfica de una superficie metálica, después un análisis microscópico con la ayuda de un microscopio metalográfico. El análisis consiste en determinar: presencia de inclusiones, tipo y tamaño de grano, tipo de microestructura en forma de microconstituyentes, defectos físicos, etc., Lo que conduce a establecer los procesos de manufactura, propiedades mecánicas aproximadas del material analizado, etc. La meta final de la preparación metalográfica de un material metálico es obtener una superficie plana y especular (tipo espejo) para poder atacar adecuadamente dicha superficie y de esta forma analizarla.

La secuencia de la preparación metalográfica fue la siguiente.

1) **Corte**. Seccionamiento de la pieza de interés con algún medio de corte que no altero la microestructura del metal
2) **Montaje**. La pieza es pequeña, se debio colocar dentro de una probeta de resina epóxica (montaje en frío). La probeta es un cilindro de 1 pulgada de diámetro y una altura máxima de 1.5 pulgadas.



3) **Desbaste**. Se realiza con “lijas de agua” grados 80, 240, 320, 400, 600, 1000, 1200, 2000 y por último de 3000. El propósito de este procedimiento fue empezar a obtener una superficie plana, debido a que el corte, en la mayoría de los procesos de corte, produce una superficie irregular con crestas y valles. Al pasar de una lija a otra, en el orden mencionado, la altura y profundidad de crestas y valles van disminuyendo, es decir la superficie se va aplanando. Las lijas tienen una base de papel seguida de un adhesivo y granos de silicio.
4) **Pulido**. En esta etapa la superficie adquiere el aspecto espejo, se realizó en paños sintéticos en movimiento y el abrasivo que es la alúmina (Al_2O_3), mezclada en situ con agua para formar una pasta y al pasar la parte metálica sobre la pasta, la superficie metálica adquirió la apariencia de un espejo.
5) **Análisis preliminar microscópica,** Es necesario revisar la superficie pulida para determinar la presencia de rayas del desbaste con las lijas, además esta parte es importante para determinar la presencia de inclusiones: óxidos, sulfuros, silicatos, microporos, microgrietas, etc., que se observan sin revelar o atacar la microestructura.
6) **Ataque químico.** Una vez que se considera que no hay rayas del desbaste, se procede a revelar la microestructura por medios ácidos o bases en algún medio neutro. Para tener una imagen de la microestructura de los metales se debe realizar un ataque electroquímico este influye en la revelación de microestructura superficial de la muestra, el ataque remueve material debido a que el metal y el químico añadido juntos complementan una celda galvánica

revelando así más nitidez hasta lograr ver los límites de grano, así como las fases presentes y las dendritas.

El ataque químico fue hecho por Hidroxido de Sodio (NaOH) durante 20 segundos por cada muestra, el tiempo de reacción tenía que ser exacto de lo contrario no se observaría la microestructura o la muestra se oxidaba completamente.

7) **Análisis microscópico.** Este paso final es para analizar y caracterizar microscópicamente al material con el microscopio óptico metalográfico (50x, 100x, 400x, 600x. 1000x) y si es necesario e importante se puede utilizar un microscopio electrónico de barrido con más de 10,000 aumentos. ¿Qué se analiza?, lo que se ha mencionado:óxidos, sulfuros, silicatos, microporos, microgrietas, tipo y tamaño de grano, tipo de microestructura en forma de microconstituyentes, defectos físicos, etc.

Adición de refuerzo Fe

Diseño de aleaciones con elemento reforzador (Fe)

Después de haber realizado los compuestos binarios el siguiente paso fue la colocación del elemento reforzador en este caso el Hierro (F

e) que ayudaría al compuesto binario a mejorar aun mas las propiedades mecánicas del compuesto binario. Basándonos en el ***Figura 7*** (Diagrama de fases de la aleación Binaria Al – Mg).

Corte.

El siguiente paso se cortó el material de manera manual para ser pesado con una báscula analítica y ser mas precisos con la cantidad de material que sería utilizado en la aleacion.

Fundición y colada

Los materiales fueron fundidos en un crisol a una temperatura de 750 °C para mejor difusión de los elementos, después de haber alcanzado la temperatura de fusión de aluminio (660 °C) a 700°C el polvo de Hierro (particula) fue agregado a la mezcla, apoyándonos con una varilla de acero para girar y asi homogenizar la mezcla, vaciando la aleación en moldes de cobre.

Caracterizacion microestructural

MEB y Difraccion de rayos X

Después haber obtenido el composito se cortó para hacer muestras encapsuladas y posteriormente caracterizar por medio microscopio electrónico de barrido utiliando técnicas de análisis puntual y análisis en línea. Posteriormente realizar estudios por medio de difracción de rayos X e identificar que fases fueron obtenidas utilizando una radiación de cobre KCuα= 1.534 nm y una velocidad de barrido de 3°/min.

Microdureza Vickers

El comportamiento de la microdureza de estas aleaciones se observa detalladamente en las graficas de dureza contra tipo de aleación o composito.

En este trabajo se utiliza un método de medida de la microdureza para investigar la resistencia de la aleación o del composito sometido a una carga. Para ello, se miden los valores de microdureza Vickers en la superficie de probetas para seleccionar la dureza en diferentes fases.

A continuación, se calculó la medida de microdureza, como dureza Vickers (HV-kgf / mm2), de acuerdo con la Ecuación (1). se midió la dureza de acuerdo con la norma ASTM E384-17.

$$HV = \frac{F}{A} = \frac{1.8544 \,.\, F}{d^2} \quad (1)$$

Donde:

F = carga aplicada en kgf

d = longitud de las diagonales en μm

1.8544 = factor de corrección geométrico.

Pruebas de desgaste

El desgaste se caracteriza por la remoción de partículas provocada por la fricción generada entre dos superficies en contacto relativo. Aunque la fricción es un fenómeno físico, es común en áreas industriales como las energías renovables, la aviación, mecánica, química, marítima, etc..

El uso de la lubricación es la técnica más popular para minimizar el desgaste y la fricción entre dos superficies que están en contacto. Aunque la lubricación entre las dos superficies minimiza la fricción, también reduce los mecanismos de desgaste. De este modo, también se evitan los daños superficiales. (Sobczak-Kupiec, 2016)

Las pruebas de perdida de peso se realizaron en un aparato de desgaste pin-on-disc a una velocidad constante de 200 rpm. Para la prueba de desgaste se utilizó una probeta con un diámetro de 1 cm. Los ensayos se realizaron en condiciones secas (cero lubricaciones), con una contraparte de acero AISI 4140, diámetro de 12 cm, y con una distancia de deslizamiento de 4000 m. Para garantizar la precisión de todos los datos experimentales, las pruebas se realizaron de acuerdo con la norma ASTM G99-05. Antes de iniciar la prueba, el material de los pernos y las superficies de los discos se limpiaron con alcohol etílico. (Şirin, 2022) (Khanna, 2023)

La cara a desgastar del composito se fijó en paralelo a la superficie del disco en todos los experimentos de pérdida de peso utilizando una carga de 5 N (tomada por la masa que sujeta de la base del perno y la masa del perno afectada por la gravedad). Se tomó el peso inicial de la probeta como referencia, y cada 100 m (considerando el diámetro de la huella y las rpm de trabajo) se registró el peso nuevamente de la probeta para asi obtener una diferencial de perdida de masa.

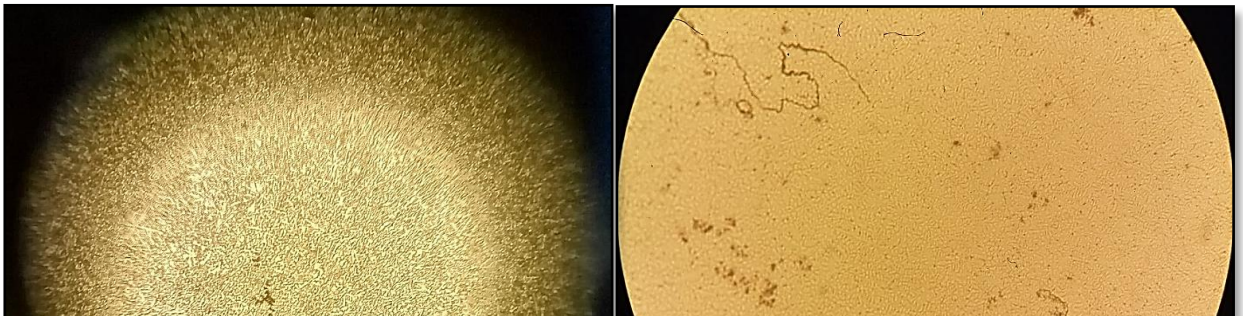


Figura 8 Imagen de microscopio óptico después de ataque químico. A) 20x b)50x

En imágenes se muestran dendritas después del ataque químico que se realizó por medio de NaOH. Imágenes de un microscopio óptico metalográfico.

Técnicas de caracterización

Aleación Al (80%) y Mg (20%)

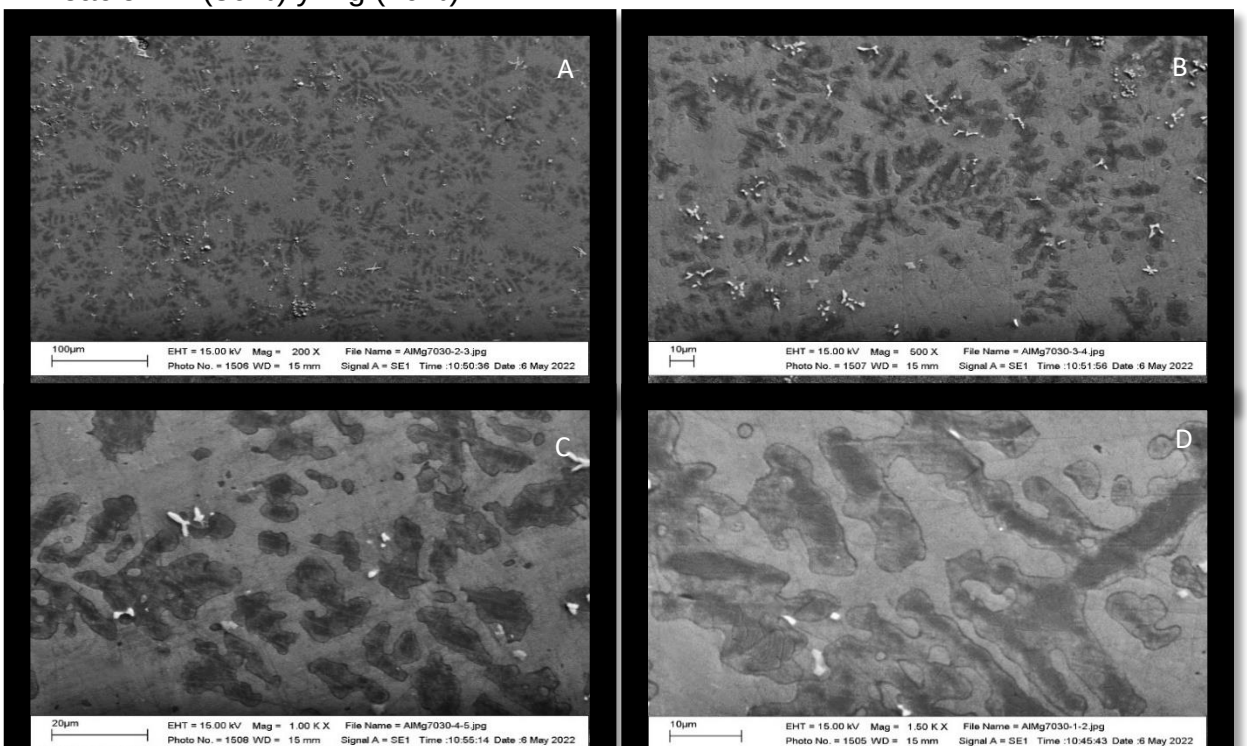


Figura 9 Imagenes de microscopio electrónico de barrido. A) 200x b)600x c)1000x y d)1500x

En las figuras 9 se observa la imagen de la muestra Al (80%) y Mg (20%) en estado de aleación binaria, por microscopia electrónica de barrido (MEB) En donde se observa una estructura dendrítica a lo largo de toda la superficie de la muestra. El tamaño de las dendritas es de aproximadamente 50 micras con brazos de entre 20 y 30 µm de longitud aproximadamente. Es importante observar la aparición una gran cantidad de precipitados distribuidos homogéneamente sobre la superficie de la muestra (puntos blancos) esto se debe a la incorporación de $Al_{12}Mg_{17}$.

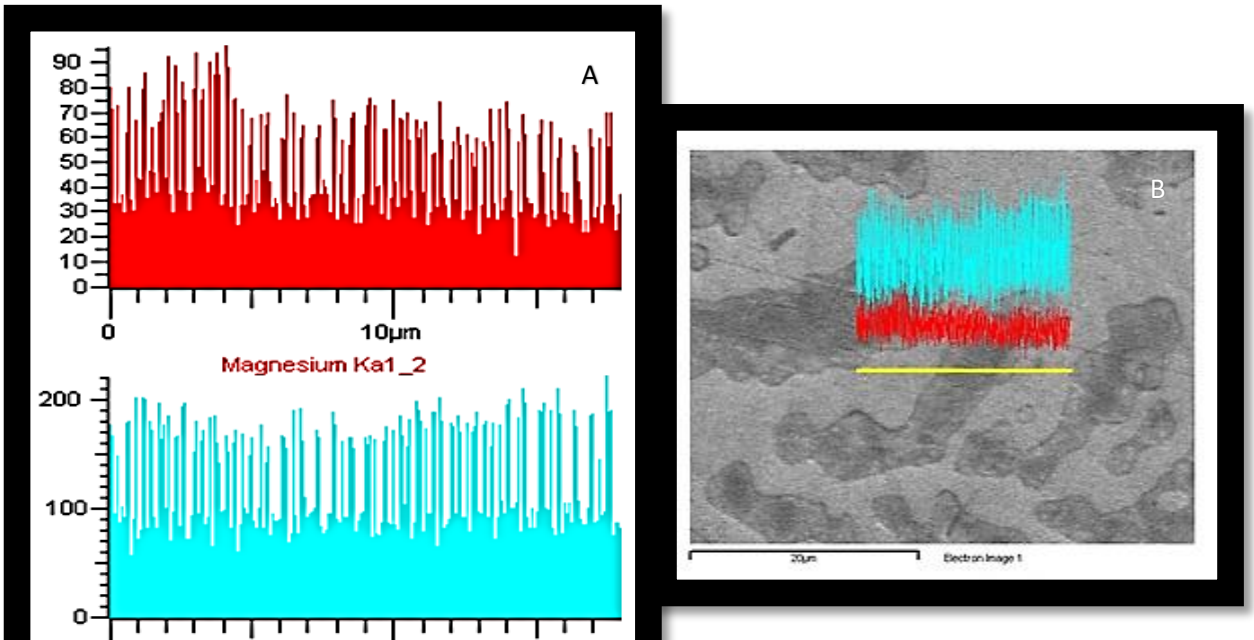


Figura 10 Análisis de scanlíne de la aleación binaria Al al 80% y Mg al 20%

En la figura 13 se observa la imagen de la microestructura de la muestra binaria Al al 80% y Mg al 20% en donde se puede visualizar el análisis en línea (Scanline) sobre la matriz y un brazo dendrítico, esto con la finalidad de observar la distribución elemental de los compuestos de la aleación. Se observa que el Al (línea azul) es constante y gruesa en el barrido, lo cual significa que en esa zona existe una concentración de ese elemento considerable, por otra parte, se puede aprecias que el Mg (línea roja) presenta una en menor cantidad.

El material más oscuro representa una fase rica en Magnesio, Mientras que la fase blanca representa una fase rica en Aluminio, en la metalografía se muestra una segunda fase que se encuentra por encima de las demás esta rica en aluminio.

Aleación Al (85%) y Mg (15%)

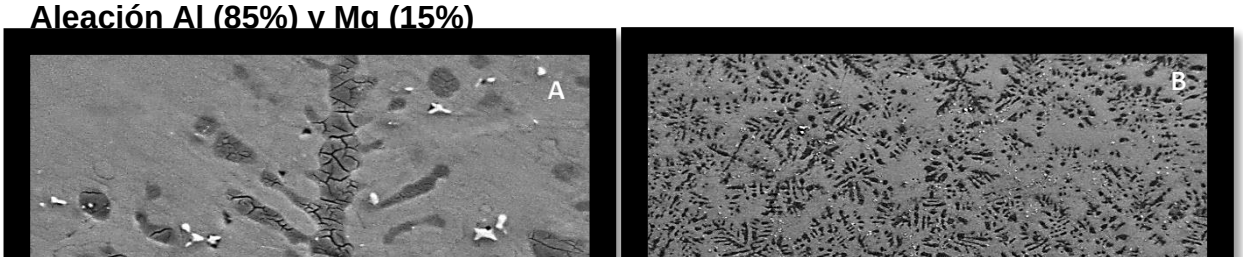
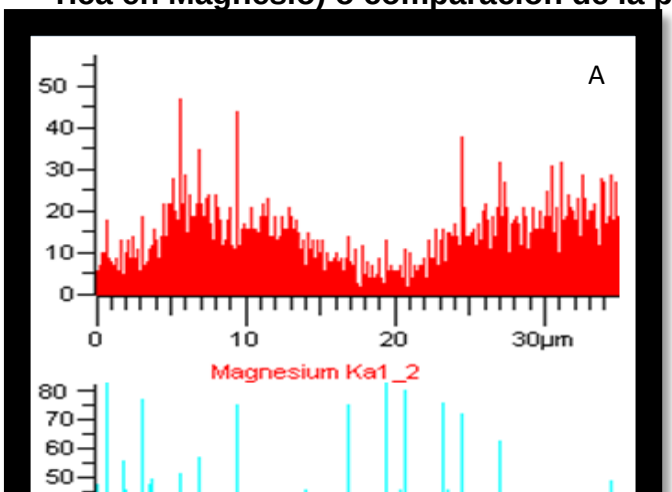


Figura 11 imágenes de microscopio electrónico de barrido. A) 200x b)600x c)1000x y d)1500x

En la figura 14 – 17 se observa la imagen de la muestra Al (85%) y Mg (15%) en estado de aleación binaria por microscopia electrónica de barrido (MEB) En donde se observa una estructura dendrítica a lo largo de toda la superficie de la muestra. El tamaño de las dendritas es de aproximadamente 50 micras con brazos de entre 20 y 30 µm de longitud aproximadamente. Es importante observar la aparición una gran cantidad de precipitados distribuidos homogéneamente sobre la superficie de la muestra (puntos blancos) esto se debe a la incorporación de $Al_{12}Mg_{17}$.

En la imagen panorámica (200x) se ve menor población de zona oscura (Fase rica en Magnesio) o comparación de la primera aleación Al (70%) y Mg (30%)



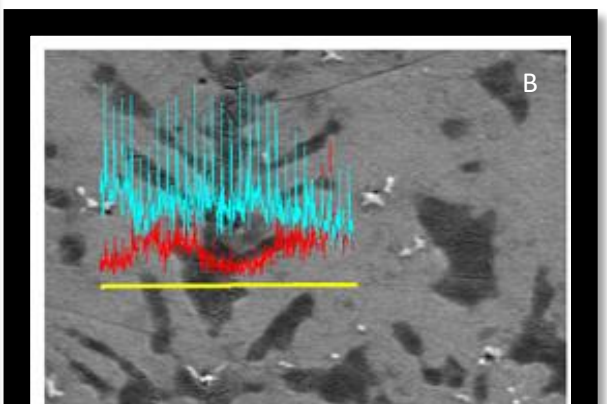


Figura 11 análisis de scanline de la aleación binaria Al al 85% y Mg al 15%

En la figura 17 se observa la imagen de la microestructura de la muestra binaria Al al 85% y Mg al 15% *en donde se puede visualizar el análisis en línea sobre una dendrita, esto con la finalidad de observar la distribución elemental de Aluminio y Magnesio. Se observa que el Al (línea azul) presenta una variación inicial en el barrido, lo cual significa que en esa zona existe una concentración de ese elemento considerable, por otra parte, se puede aprecias que el Mg (línea roja) presenta una fluctuación a la mitad del barrido, indicando la disminución del elemento analizado o bien, que existe una discontinuidad en la superficie.*

Aleación Al(90%) y Mg(10%)

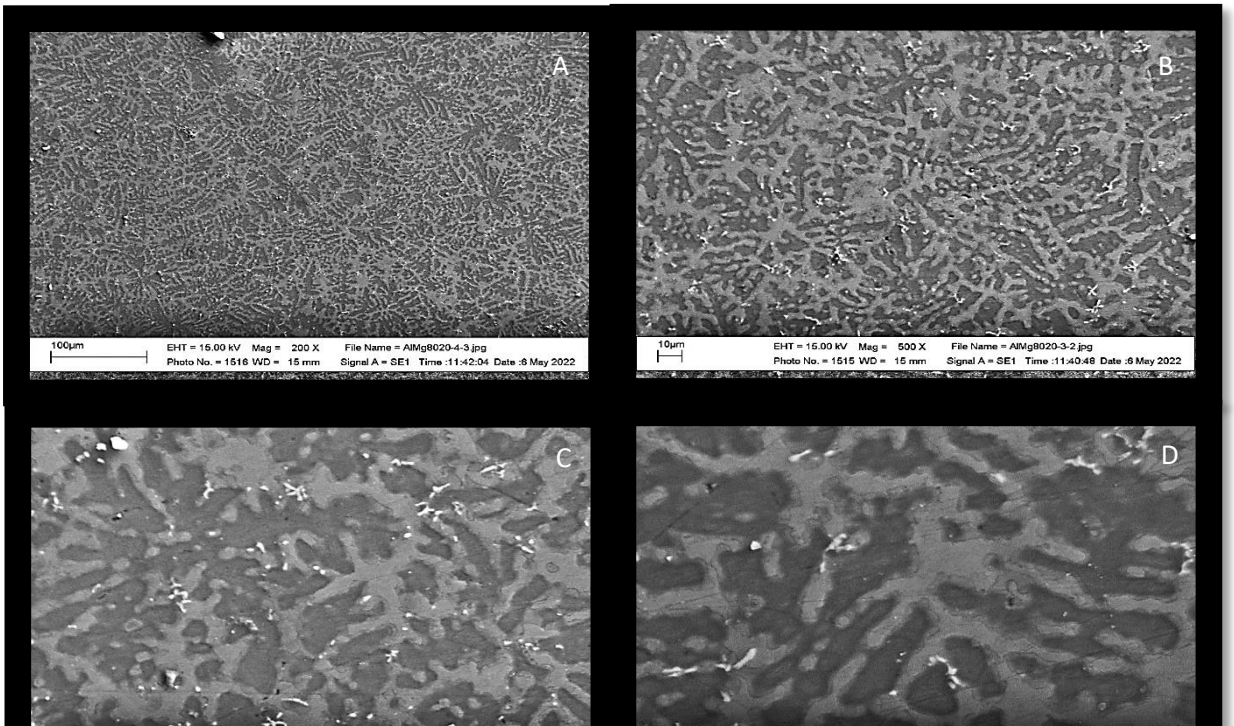
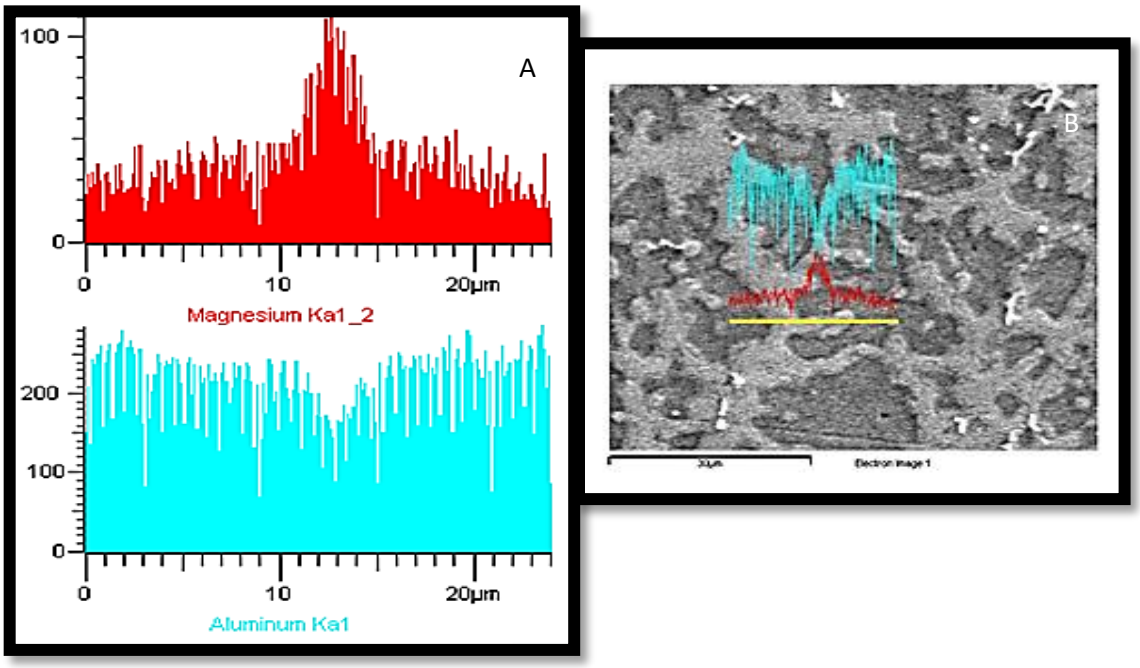


Figura 12 imágenes de microscopio electrónico de barrido. A) 200x b)600x c)1000x y d)1500x

En la figura 19 - 22 se observa la imagen de la muestra Al(90%) y Mg(10%) en estado binario por microscopia electrónica de barrido (MEB), En donde se observa una estructura dendrítica a lo largo de toda la superficie de la muestra. El tamaño de las dendritas es de aproximadamente 50 micras con brazos de entre 20 y 30 µm de longitud aproximadamente, Es importante observar la aparición una gran cantidad de precipitados distribuidos homogéneamente sobre la superficie de la muestra (puntos blancos) esto se debe a la incorporación de compuestos de $Al_{12}Mg_{17}$.



En la figura 22 se observa la imagen de la microestructura de la muestra Al al 90% y Mg al 10% en donde se puede visualizar el análisis en línea sobre una dendrita, esto con la finalidad de observar la distribución elemental de Aluminio y Magnesio. Se observa que el Al (línea azul) presenta una variación inicial en el barrido, lo cual significa que en esa zona existe una concentración de ese elemento considerable, por otra parte, se puede aprecias que el Mg (línea roja) presenta una fluctuación a la mitad del barrido, indicando la disminución del elemento analizado o bien, que existe una discontinuidad en la superficie.

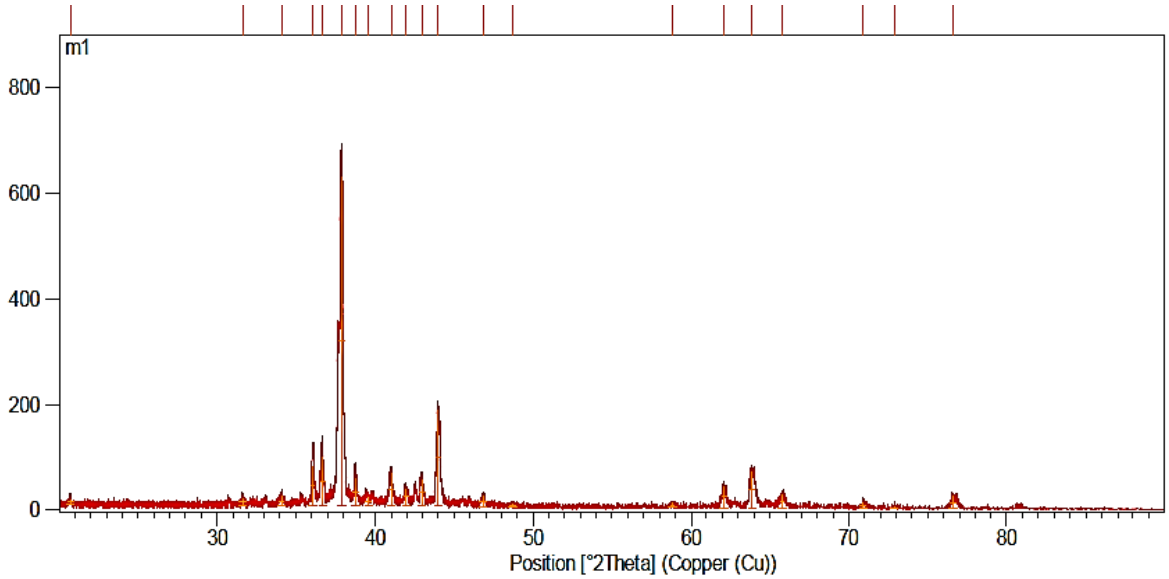
pesar de que sea la aleacion con menor porcentaje de Magnesio tiene mayor distribucion en la superficie de la muestra.

Figura 13 Análisis en línea de la aleación binaria Al al 90% y Mg al 10%

Caracterización por XRD (X ray diffraction)

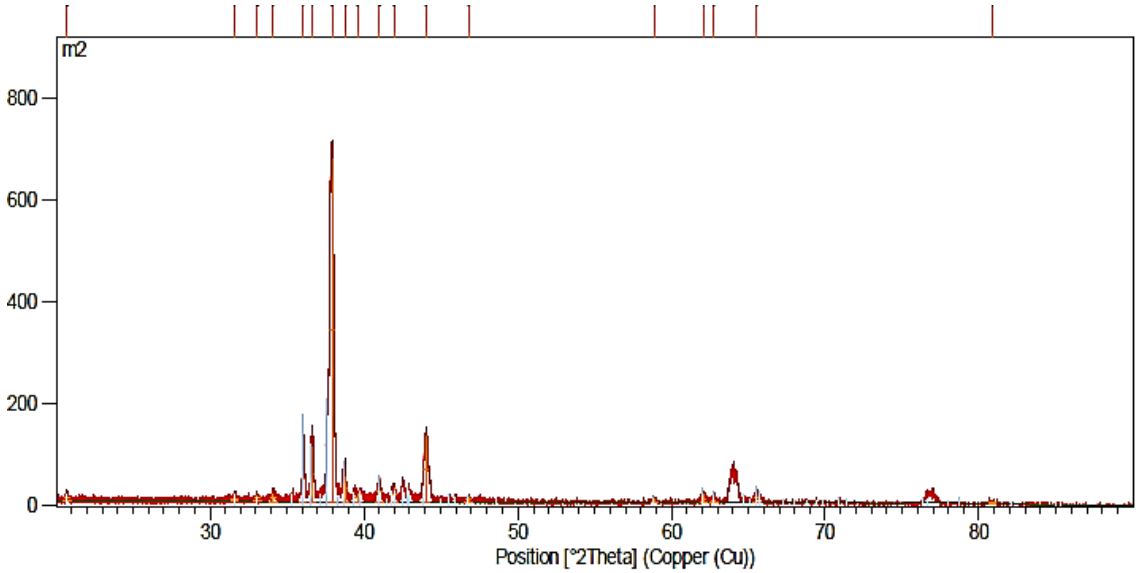
Colocación de refuerzos (F

Para hacer las bases de probetas muestras, el material que se utilizó para su construcción fue acero 1045, debido a su difícil mecanizado se realizaron tratamientos térmicos (recocido) para modificación de los granos por ende se obtendría un material blando y ya fácil de mecanizar. En estos moldes se realizaran las muestras añadiendo Fe como reforzador y al mismo tiempo compresionar la mezcla y evitar porosidad y alta compactacion.



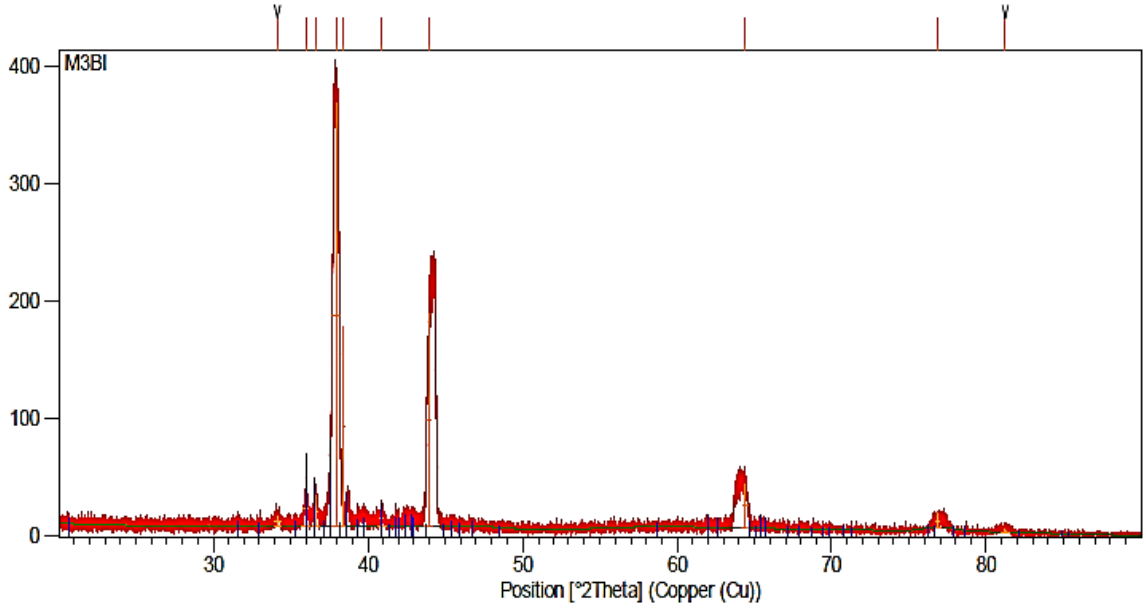
Ref. Cod	Compound Name	Chemical Formula	Score	Scale Factor
00-029-0048	Aluminum Magnesium	Al3 Mg2	54	0.335
01-073-1148	Aluminum Magnesium	Al12 Mg17	15	0.151

Figura 9 Difracto grama de la aleación binaria Al al 80% y Mg al 20%



Ref. Code	Compound Name	Chemical Formula	Score	Scale Factor
00-029-0048	Aluminum Magnesium	Al3 Mg2	43	0.218
01-073-1148	Aluminum Magnesium	Al12 Mg17	27	0.190

Figura 10 Difracto grama de la aleación binaria Al al 85% y Mg al 15%



Ref. Code	Compound Name	Chemical Formula	Score	Scale Factor
00-029-0048	Aluminum Magnesium	Al3 Mg2	22	0.137

Figura 11 Difracto grama de la aleación binaria Al al 90% y Mg al 10%

En las figuras 24-25, se presenta el difracto grama de las muestras de aleaciones binarias en la figura se puede observarla formación de compuestos como el $Al_{12}Mg_{17}$, Sin embargo, en el pico principales (con mayor intensidad) se observa la formación del compuesto Al_3Mg_2. Se puede apreciar que la formación de los compuestos corresponde a la cantidad de elementos adicionados de acuerdo con el diagrama de fases binario. Se puede observar que en la ultimo difracto grama (Al al 90% y Mg al 10%) solo se observa Al_3Mg_2.

Diseño de aleaciones con elemento reforzador (Fe)

Después de haber realizado los compuestos binarios el siguiente paso fue la colocación del elemento reforzador en este caso el Hierro (Fe) que ayudaría al compuesto binario a mejorar aun mas las propiedades mecánicas del compuesto binario. Basándonos en el ***Ilustración 12*** *Diagrama de fases de la aleación Binaria Al – Mg.* Y literatura antes ya investigada.

Corte.

El siguiente paso se cortó el material de manera manual para ser pesado con una báscula analítica y ser mas precisos con la cantidad de material que sería utilizado en el composito.

Fundición y colada

Los materiales fueron fundidos en un crisol a una temperatura de 750 °C para mejor difusión de los elementos, después de haber alcanzado la temperatura de fusión de aluminio (660 °C) a 700°C el Hierro (Fe) fue agregado a la mezcla, apoyándonos con una varilla de acero para homogenizar la mezcla.

SEM y rayos X

Después haber obtenido el composito se corto para hacer muestras encapsuladas y posteriormente caracterizar por medio microscopio electrónico de barrido y hacer estudios por medio de rayos x y descubrir que fases fueron obtenidas. (Boero, 2005)

Microodureza Vickers

Tanto la microdureza Vickers como la densidad de dislocaciones de los cristales crecidos son máximas en composiciones intermedias. Las dislocaciones originadas por la deformación interna son los principales factores del endurecimiento observado. El comportamiento de la microdureza de este sistema mixto se explica satisfactoriamente con la ayuda de graficas. (Ma, 2021)

En este trabajo se utiliza un método de medida de la microdureza para investigar la evolución del daño superficial del composito sometido a cargas cíclicas. Para ello, se miden los valores de microdureza Vickers en la superficie de probetas para diferentes fases. (Sankar, 2018)

Los resultados muestran que la variable de daño definida en base a la variación de la microdureza durante el ciclado puede revelar algunas características de la evolución y distribución del daño por fatiga particularmente en las etapas previas a la nucleación de grietas por fatiga.

A continuación, se calculó la medida de microdureza, como dureza Vickers (HV-kgf / mm2), de acuerdo con la Ecuación (1). se midió la dureza de las huellas de desgaste de acuerdo con la norma ASTM E384-17.

$$HV = \frac{F}{A} = \frac{1.8544\ .\ F}{d^2}$$

Pruebas de desgaste

El desgaste se caracteriza por la generación de partículas de desgaste provocada por la fricción. Aunque la fricción es un fenómeno físico, es común en áreas industriales como las energías renovables, la aviación, la metalurgia, la industria química, la marítima y en todas las etapas de nuestra vida.

El uso de la lubricación es la técnica más popular para minimizar el desgaste y la fricción entre dos superficies que están en contacto. Aunque la lubricación entre las dos superficies minimiza la fricción, también reduce los mecanismos de desgaste. De este modo, también se evitan los daños superficiales. (Sobczak-Kupiec, 2016)

Las pruebas de COF(coefficient of friction) se realizaron en un Turkyus pin-on-disc a 200 rpm. En la prueba se utilizó un probeta diámetro de 10 mm. Los ensayos COF se realizaron en condiciones secas, con una base de acero (AISI D2), Diámetro de 12 cm, y con una distancia 2000 m. Para garantizar la precisión de todos los datos experimentales, las pruebas de COF se realizaron tres veces de acuerdo con la norma ASTM G99-05. Antes y después de cada prueba, el material de los pernos y las superficies de los discos se limpiaron con alcohol etílico y se secaron cuidadosamente. (Şirin, 2022) (Khanna, 2023)

El composito se fijó en paralelo a la superficie del disco en todos los experimentos de COF. Antes de los experimentos, se calibró la célula de carga para garantizar la precisión de las mediciones.

Resultados y discusión

Prosiguiendo con el método experimental después de analizar a la aleación binaria con la interfaz rica en aluminio y fases secundarias, se procede a hacer las

aleaciones con el material reforzador Fe. Durante el desarrollo de la fundición era necesario tener control atmosférico debido al pronto oxidación de la aleación fundida. Debido a eso se aumentamos el peso atómico de la aleación y tuve más cantidad de fundición. La idea principal era hacer la fundición en moldes para presurizarlas y compactarla con un embolo, sin embargo, debido a la expansión del metal del molde y embolo quedaba atascado por tal motivo se opto por hacer la fundición directa y mezcla en el crisol.

Tabla 7 Peso atómico de los metales

Elemento	Peso atomico
Aluminio	26.9815 g/mol
Magnesio	24.3120 g/mol
Hierro	55.8450 g/mol

Tabla 8

Tabla 9 Porcentaje de peso de las aleaciones binarias y el porcentaje del elemento reforzador (Fe).

Al	Mg	Fe		
80 %	20 %	1%	3%	5%
85 %	15 %			
90 %	10 %			

Tabla 10 Peso en gramos de aleacion binaria para psoterior agreagar los polvos de Fe

	Al (g)	*Mg (g)*
1	61.2112	13.7888
2	64.7103	10.2897
3	68.1745	6.8255

En total fueron 12 muestras 3 compuestos de cada aleación binaria. Se pulieron nuevamente y se atacó químicamente para proceder a las micrografías y ver la microestructura de los compuestos.

Cambio estructural

En las figuras se muestran los compositos a diferente concentración respectivamente a 80% - 20%, 85% - 15%, y 90% - 10% de Al - Mg. Con sus

refuerzos de polvo de Fe. Se aprecia partículas de Fe en medio de la fases rica en aluminio, el vertido de los polvos fue de manera manual, así mismo fue la agitación antes de colar el molde.



Figura 18 Composito Al al 80% y Mg al 20% con 1% de Fe

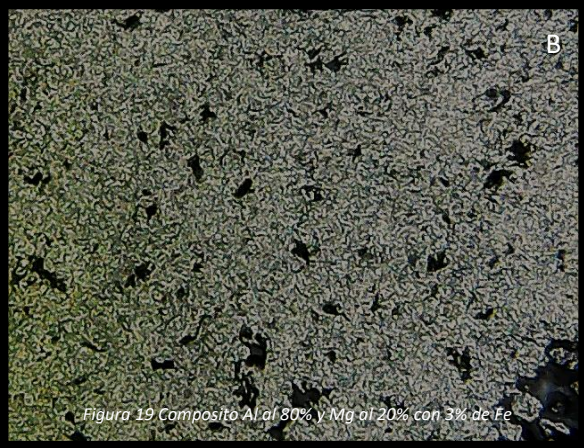


Figura 19 Composito Al al 80% y Mg al 20% con 3% de Fe



Figura 20 Composito Al al 80% y Mg al 20% con 5% de Fe



Figura 21 Composito Al al 85% y Mg al 15% con 1% de Fe



Figura 22 Composito Al al 85% y Mg al 15% con 3% de Fe

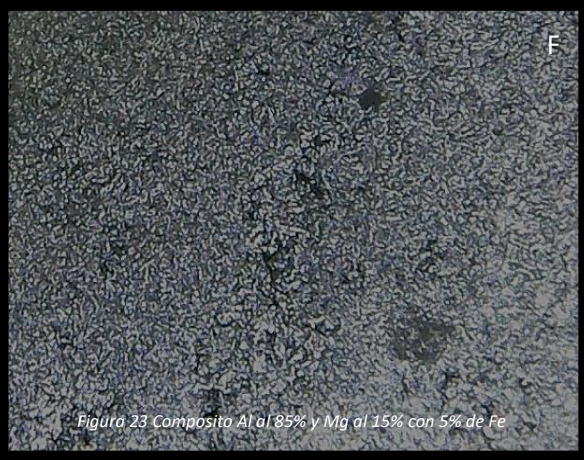


Figura 23 Composito Al al 85% y Mg al 15% con 5% de Fe

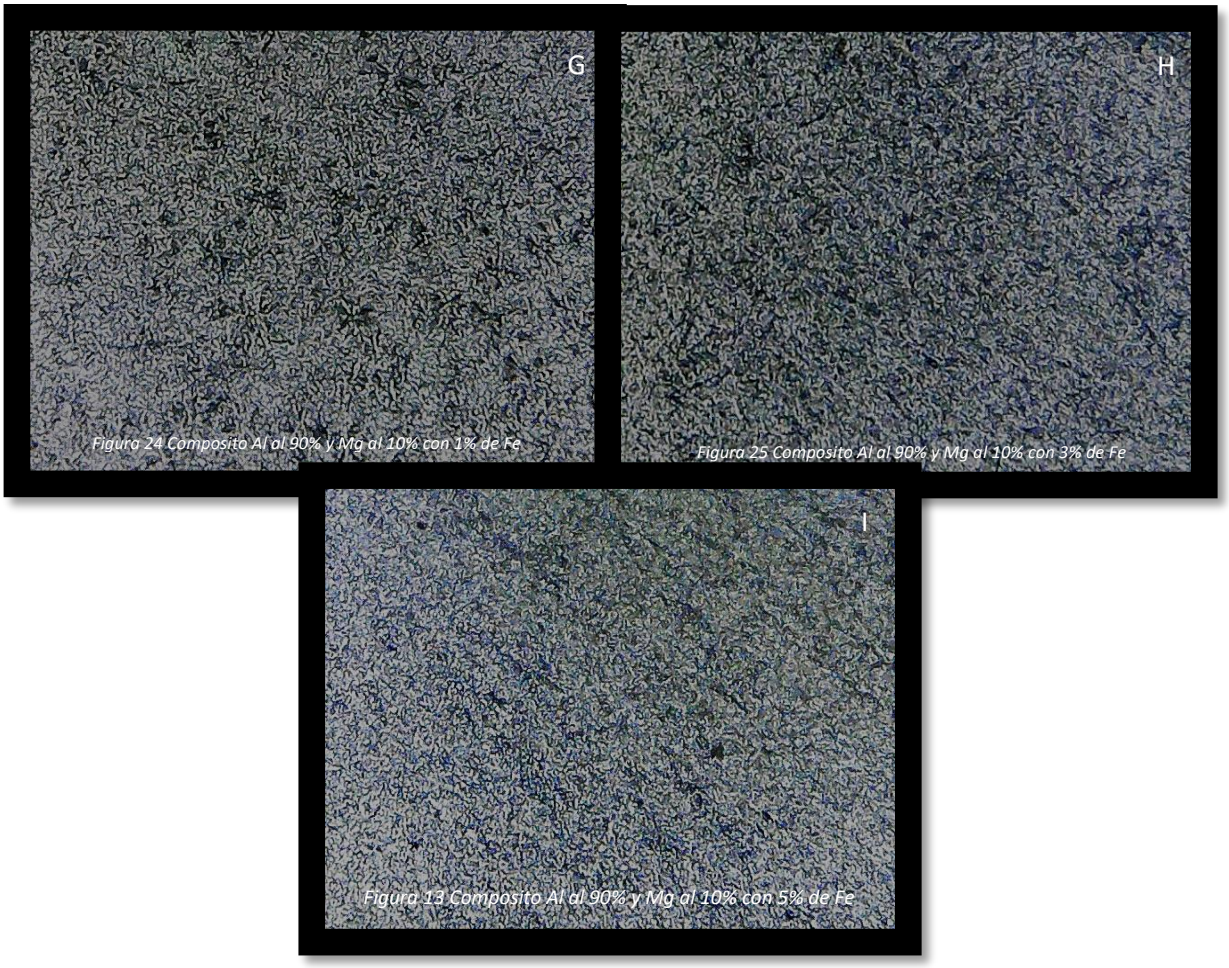


Figura 24 Composito Al al 90% y Mg al 10% con 1% de Fe

Figura 25 Composito Al al 90% y Mg al 10% con 3% de Fe

Figura 13 Composito Al al 90% y Mg al 10% con 5% de Fe

En la figuras 18 - 26 se observa la imagen microestructural de la superficie de la muestra de aleaciones binarias con polvos de Fe, atacada químicamente con el reactivo a base de agua e hidróxido de sodio al 10 %, en la figura se observa una sub-nucleación de granos finamente dispersos de aproximadamente 50µm. los pequeños granos observados poseen forma irregular y con una distribución no ordenada producida por la misma forma de estos, produciendo, inclusive la generación de espaciamiento entre ellos o huecos superficiales.

Hay evidentes grupos de partículas de Fe y ciertas áreas sin partículas antes mencionadas, la cantidad de partículas no cambia en la apariencia de las imágenes significativamente, además se muestra una distribución homogénea sobre el compuesto binario Al – Mg.

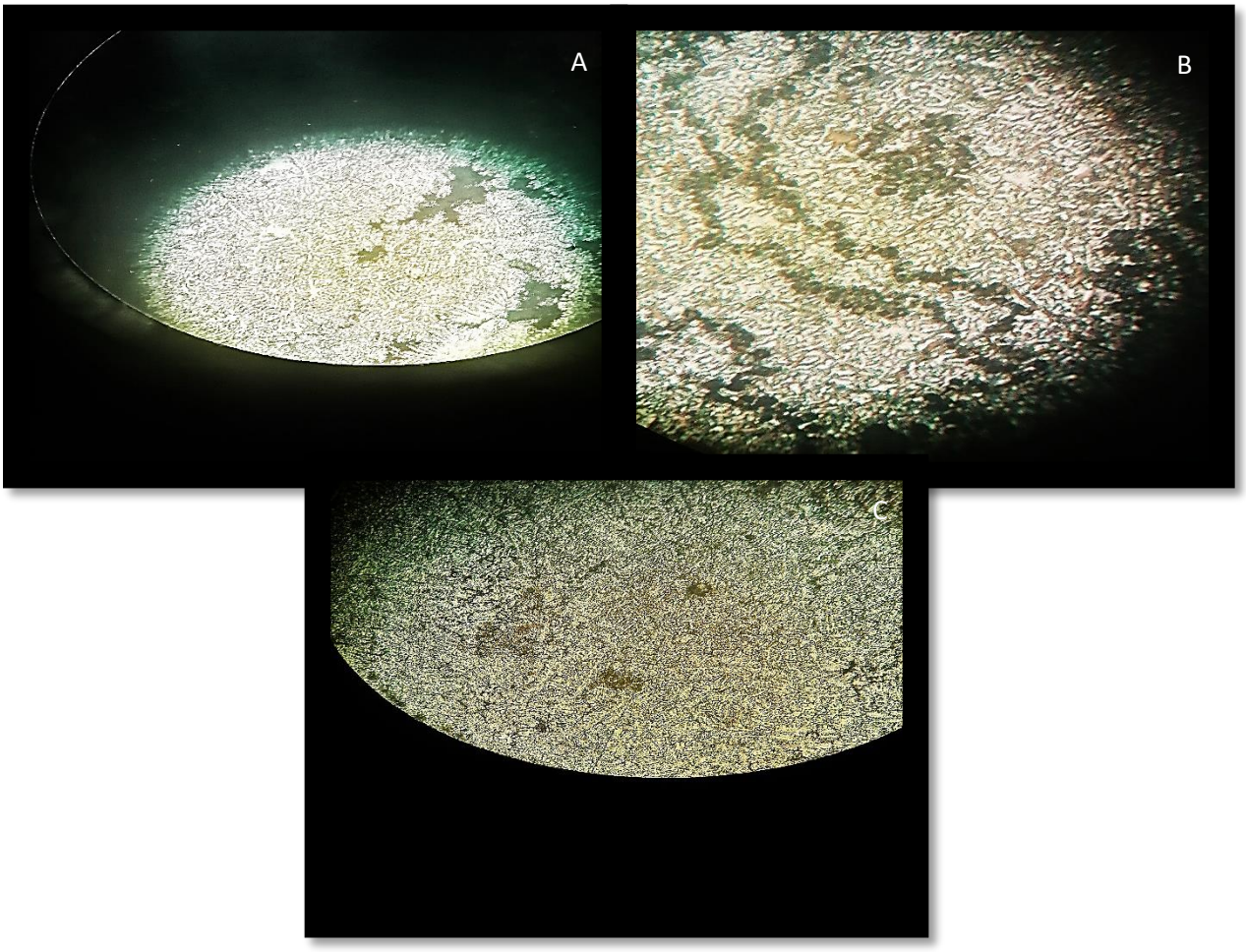


Figura 14 Composito vista del microscopio óptico

En las figuras se muestran los compositos a diferente concentración respectivamente a 80% - 20%, 85% - 15%, y 90% - 10% de Al - Mg. Con sus refuerzos de polvo de Fe. Se aprecia partículas de Fe en medio de la fase rica en aluminio, el vertido de los polvos fue de manera manual, así mismo fue la agitación antes de colar el molde.

Hay evidentes grupos de partículas de Fe y ciertas áreas sin partículas antes mencionadas, la cantidad de partículas no cambia en la apariencia de las imagenes significativamente, además se muestra una distribución homogénea sobre el compuesto binario Al – Mg.

La fase presente se nota una deformación plástica durante el proceso de procesamiento por agitación y fundición que podría proporcionar el efecto de activación mecánica, no está descartado que pudiera formarse compuestos Inter metálicos multicomponentes en la interfase principal y limites de grano, no se observan poros ni grietas

Resultados

Caracterización de la microoestructura de la interfaz

Propiedades mecánicas

Dureza Vickers

Se realizo análisis de dureza Vickers tanto a las aleaciones binarias como a las aleaciones reforzadas con Fe.

Se presenta la siguiente grafica de los promedios obtenidos de cada muestra de dureza de cada aleación; los puntos naranjas son las tres aleaciones binarias 80% - 20%, 85% - 15%, y 90% - 10% de Al – Mg. Como se ve se incrementa esta propiedad debido a que las partículas evitan la deformación plástica del material. Las segundas fases presentes podrían dificultar el movimiento de las dislocaciones, lo que podría mejorar aún más la resistencia de los materiales compuestos elaborados.

Sin embargo, también se produjeron algunas lecturas muy diferentes a las demás en la superficie, lo que implica que los productos de reacción de la interfaz frágil pueden ser el origen de las micro fisuras o microporos.

- Penetrador en forma de pirámide de base cuadrada
- Carga de 100 Kg/F.
- Se evalúa las dimensiones de la huella. (Por lo cual se requiere una preparación superficial plana)
- El tiempo de carga fue 15s.

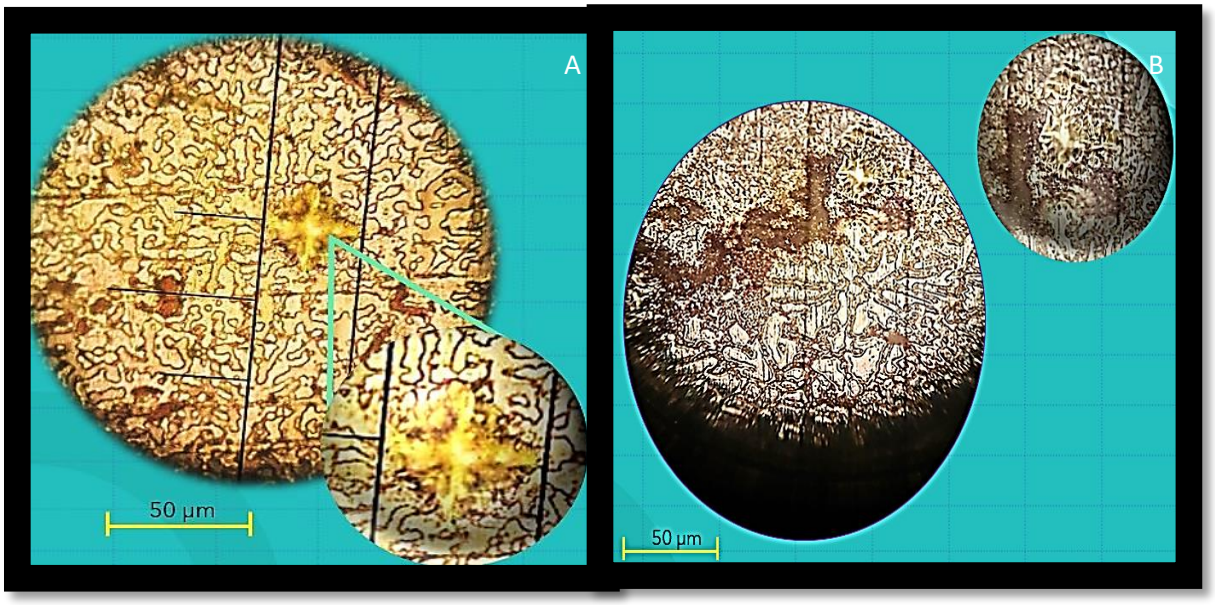
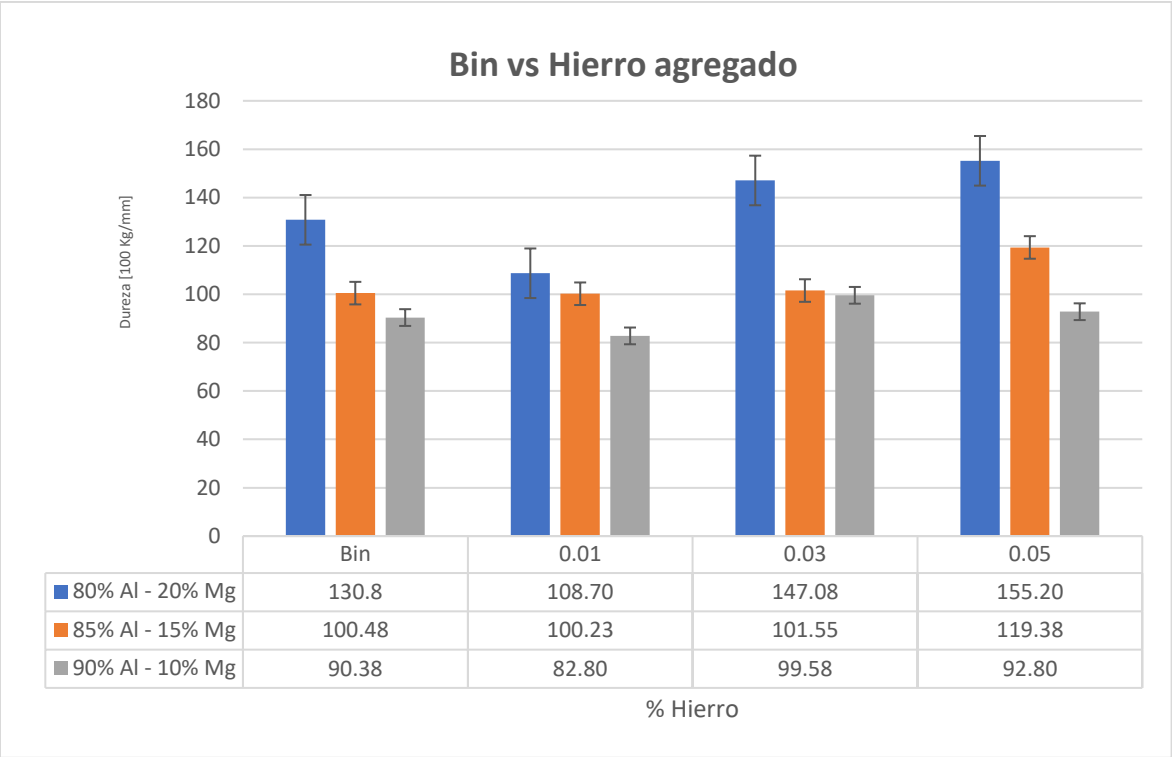


Figura 15 Huella de dentacionl del durómetro

Se muestra las micrografías de los indentaciones de dureza colocados en diferentes regiones de las muestras. En estas de estas micrografías que las longitudes diagonales de los indentaciones son menores cuando se colocan una primera fase (35 µm) en comparación con los colocados en las otras regiones (48 µm y 80 µm en esas regiones, respectivamente). La primera fase se comporta como laminados y promueven un comportamiento híbrido (combinación de dureza y tenacidad) como suele ocurrir en los materiales compuestos. Y estas aportan ciertas características en el mecanizado del material.

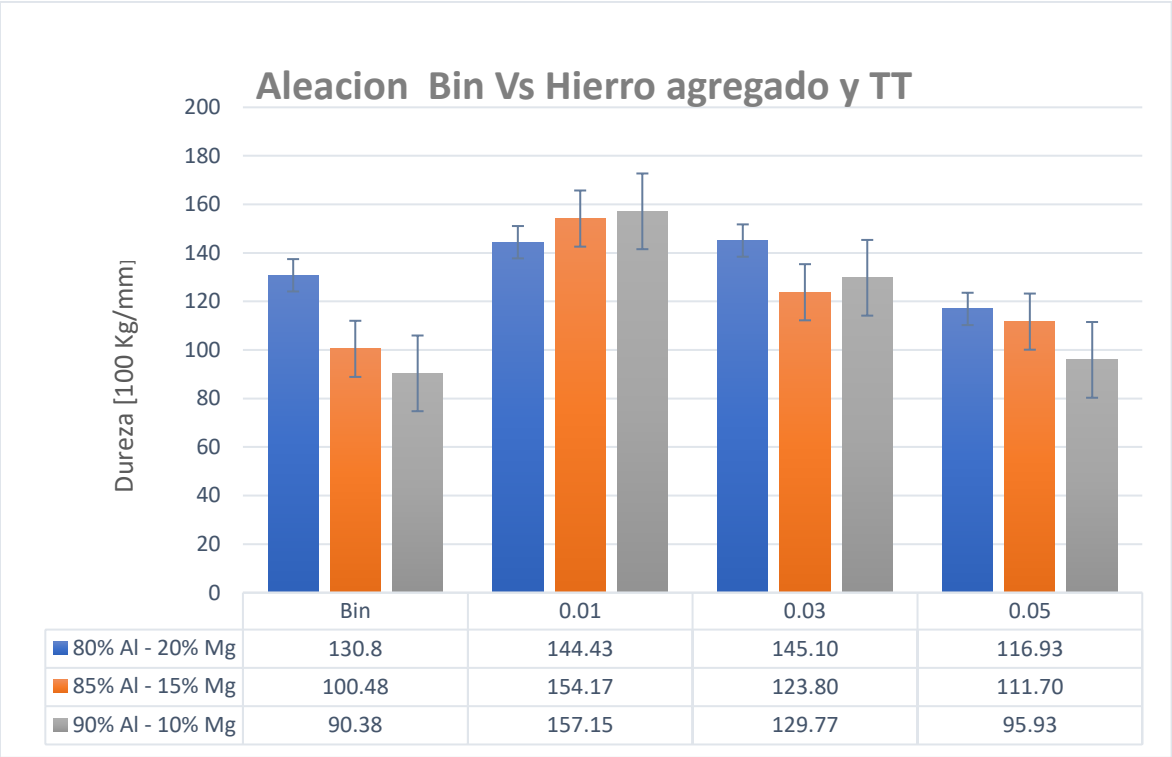


	Bin	0.01	0.03	0.05
80% Al - 20% Mg	130.8	108.70	147.08	155.20
85% Al - 15% Mg	100.48	100.23	101.55	119.38
90% Al - 10% Mg	90.38	82.80	99.58	92.80

Tabla 11 Datos y esquema grafico de Dureza de aleación binaria vs aleación binaria + Fe

En esta grafica representa los datos obtenidos promediados tanto de la aleación binaria como de los compuestos con adición de polvos de Fe, Se observa que la mayor dureza se aporta con la aleación binaria 80% Al – 20% Mg y disminuyendo conforme la adición de Mg es menor, por lo tanto, la de menor dureza es 90% Al – 10% Mg.

Se observa que con la adición de polvos de Fe la dureza es proporcional a la adición de este. Se observa también una caída de la dureza con 1% polvo de Fe añadido a la aleación 80% Al – 20% Mg, este comparado sin la adición de los polvos, sucedió lo mismo con 90% Al – 10% Mg, 1% Fe y 90% Al – 10% Mg, 5% Fe.



	Bin	0.01	0.03	0.05
80% Al - 20% Mg	130.8	144.43	145.10	116.93
85% Al - 15% Mg	100.48	154.17	123.80	111.70
90% Al - 10% Mg	90.38	157.15	129.77	95.93

Tabla 12 Datos y esquema grafico de Dureza de aleación binaria vs aleación binaria + Fe y tratamiento térmico

Esta grafica representa los datos de dureza con tratamiento térmico como se observa, la dureza es reciproca a la cantidad de polvos de Fe añadido, esto involucra roturas, grietas, tensiones y granulación debido al tratamiento térmico.

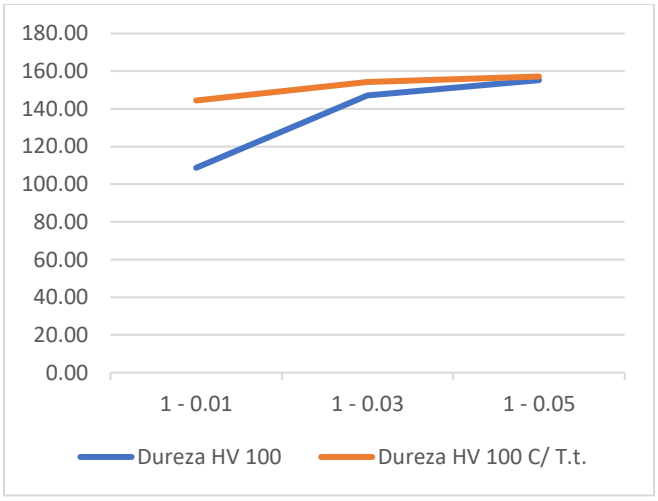


Figura 16 Grafica comparativa de dureza de composito sin tratamiento térmico vs tratamiento térmico Al 80% y Mg 20%

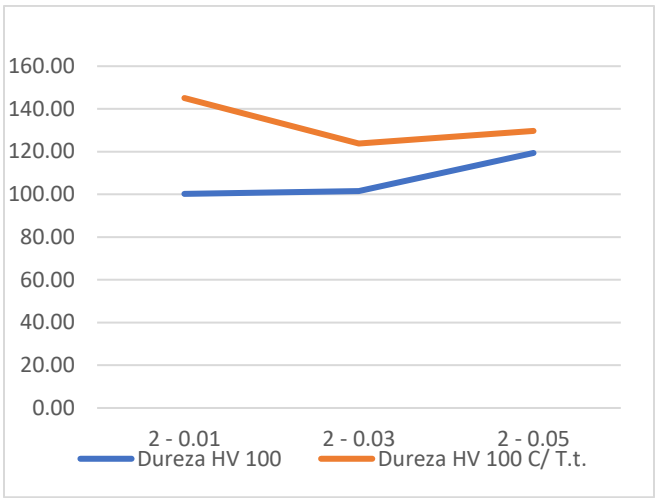


Figura 17 Grafica comparativa de dureza de composito sin tratamiento térmico vs tratamiento térmico Al 85% y Mg 15%

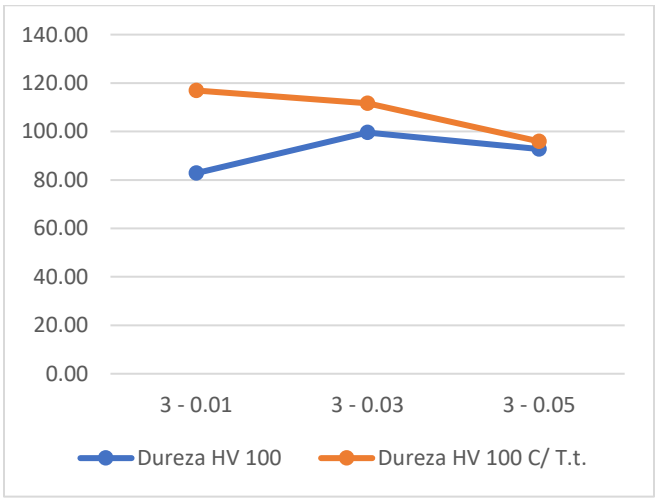
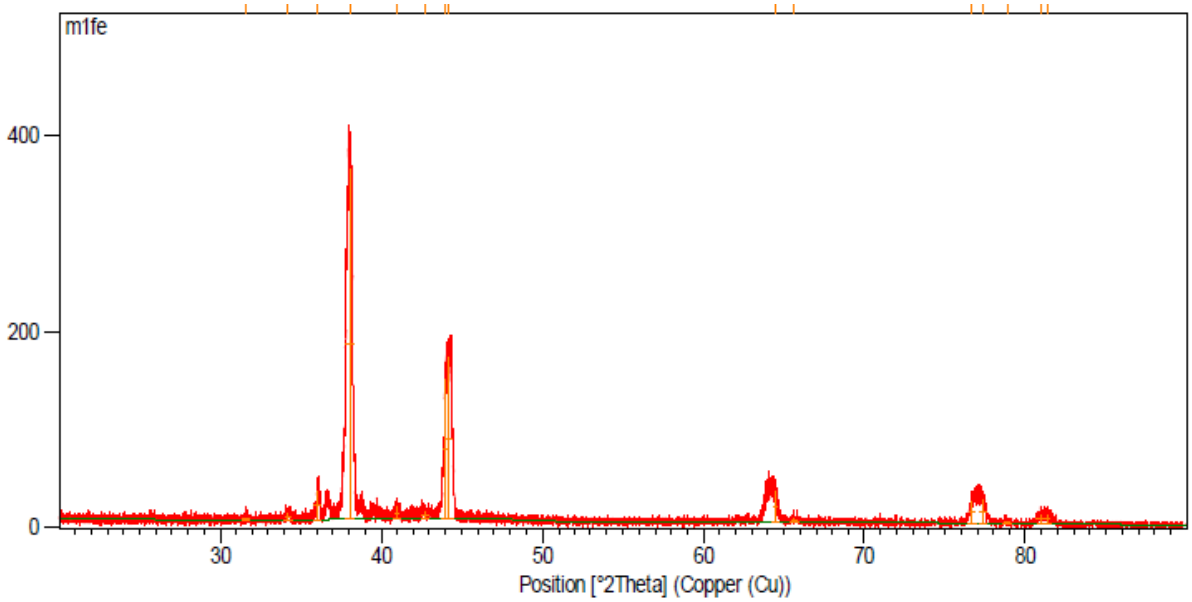


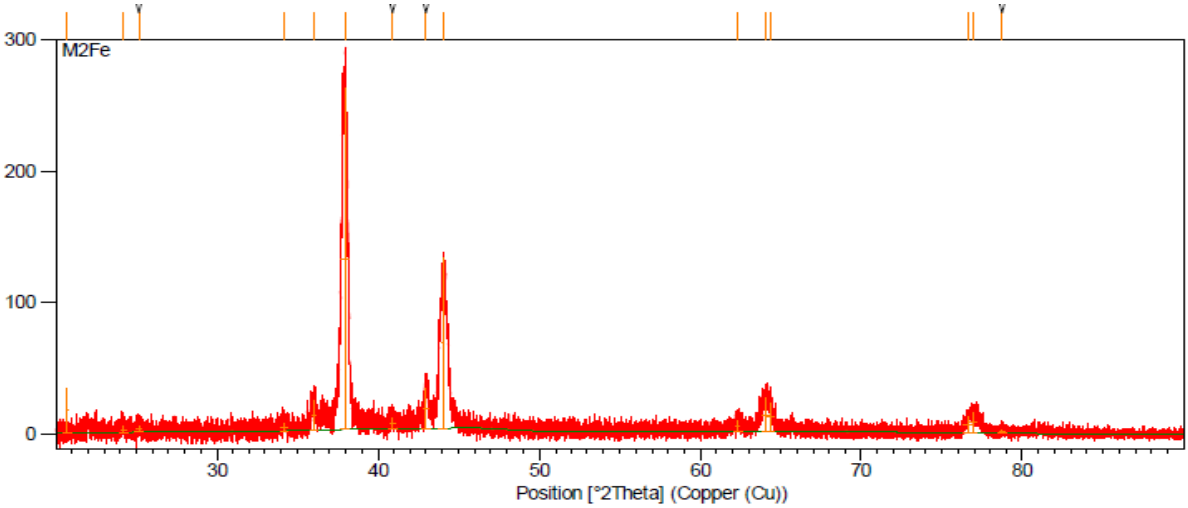
Figura 18 Grafica comparativa de dureza de composito sin tratamiento térmico vs tratamiento térmico Al 90% y Mg 10%

En las Fig., 27, 28 y 29 muestra las aleaciones binarias vs adición de Fe y tratamiento térmico, donde las muestras que se agregó Fe y tratamiento térmico tiende a la dureza de las aleaciones binarias conforme aumenta el porcentaje de Fe.



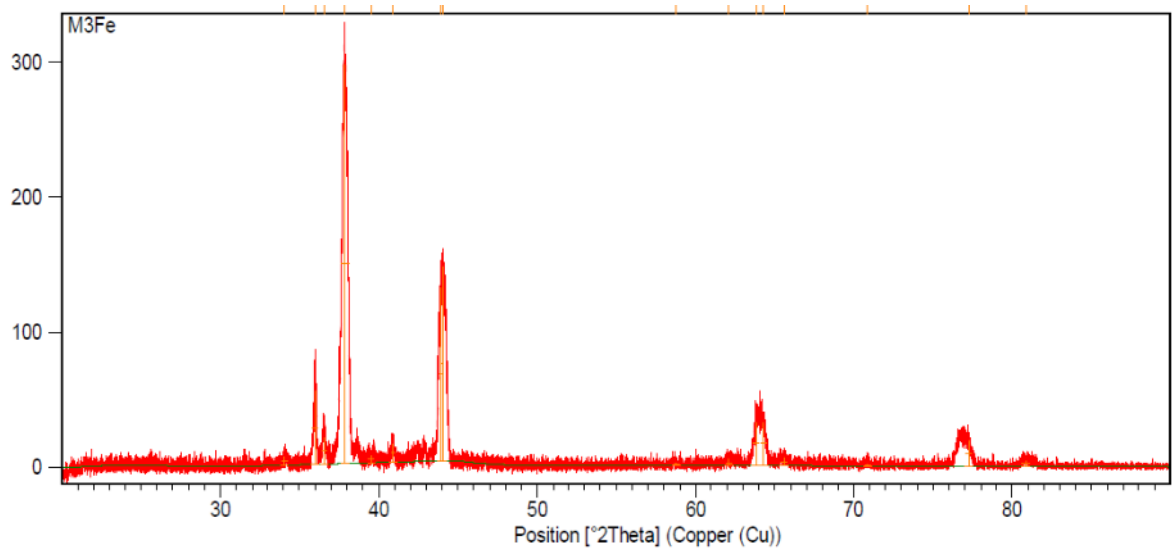
Ref. Code	Compound Name	Chemical Formula	Score	Scale Factor
00-033-0020	Aluminum Iron	Al Fe	30	0.438
01-073-1148	Aluminum Magnesium	Al12 Mg17	9	0.080
00-029-0048	Aluminum Magnesium	Al3 Mg2	9	0.051
00-004-0787	Aluminum	Al	15	0.696
01-087-0721	Iron	Fe	29	0.391

Figura 19 Difracto grama de composito Al al 80% y Mg al 20%, Fe 1%



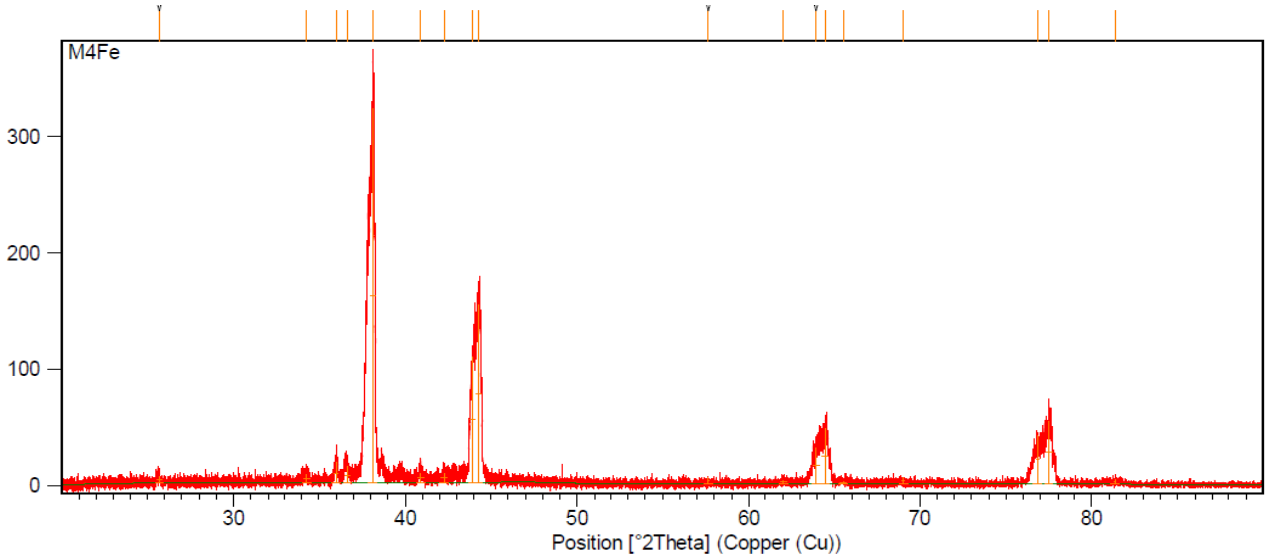
Ref. Code	Compound Name	Chemical Formula	Score	Scale Factor
01-073-1148	Aluminum Magnesium	Al12 Mg17	5	0.092
00-033-0020	Aluminum Iron	Al Fe	23	0.377
00-006-0696	Iron	Fe	24	0.391
00-004-0787	Aluminum	Al	20	0.828

Figura 20 Difracto grama de composito Al al 80% y Mg al 20%, Fe 3%



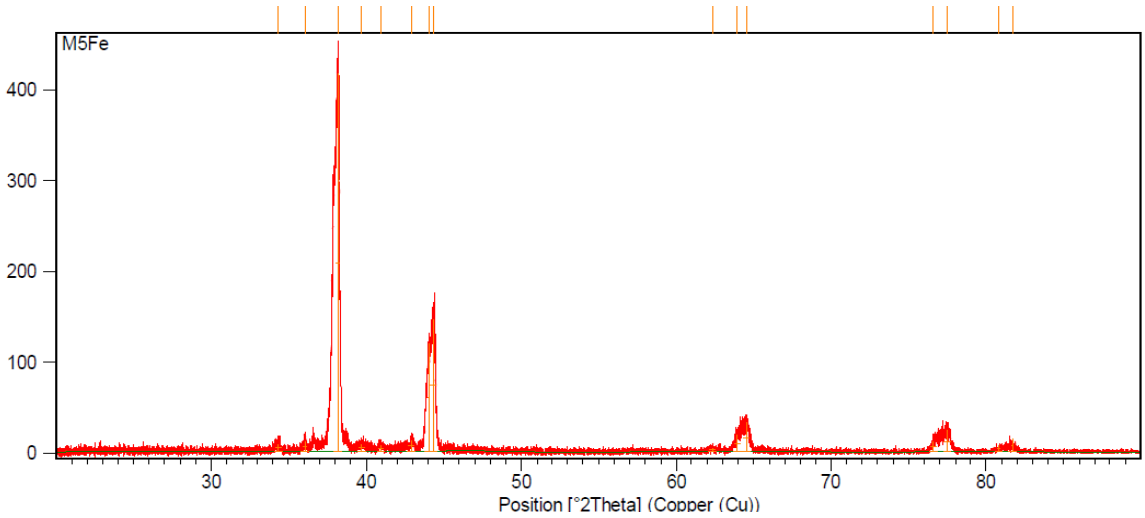
Ref. Code	Compound Name	Chemical Formula	Score	Scale Factor
00-029-0048	Aluminum Magnesium	Al3 Mg2	22	0.186
00-033-0020	Aluminum Iron	Al Fe	23	0.474
01-073-1148	Aluminum Magnesium	Al12 Mg17	13	0.234
01-085-1410	Iron	Fe	26	0.450
00-004-0787	Aluminum	Al	26	0.850

Figura 21 Difracto grama de composito Al al 80% y Mg al 20%, Fe 5%



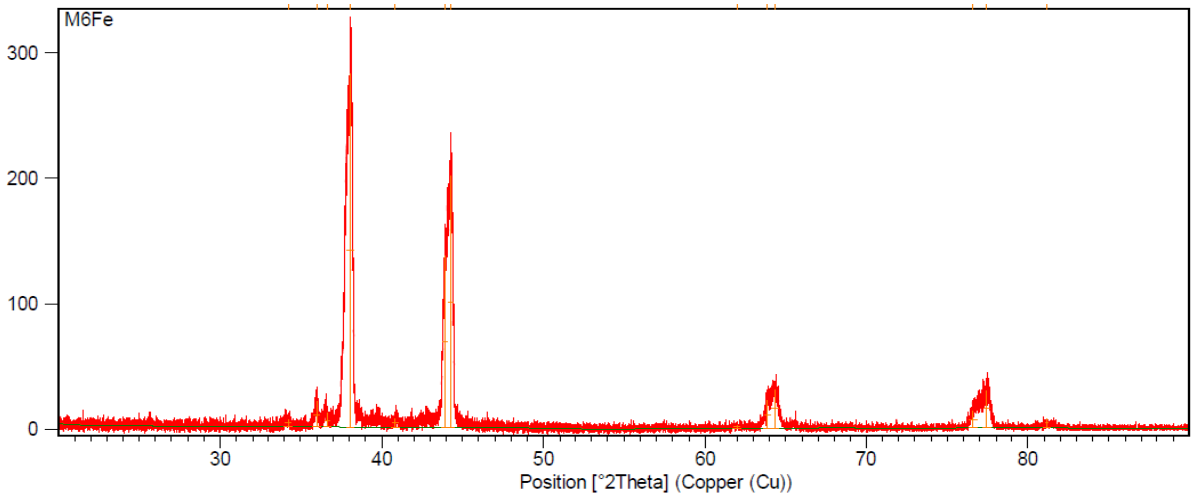
Ref. Code	Compound Name	Chemical Formula	Score	Scale Factor
01-073-1148	Aluminum Magnesium	Al12 Mg17	3	1.581
00-029-0048	Aluminum Magnesium	Al3 Mg2	15	0.082
00-033-0020	Aluminum Iron	Al Fe	23	0.372
00-004-0787	Aluminum	Al	28	0.725
00-006-0696	Iron	Fe	21	0.378

Figura 22 Difracto grama de composito Al al 85% y Mg al 15%, Fe 1%



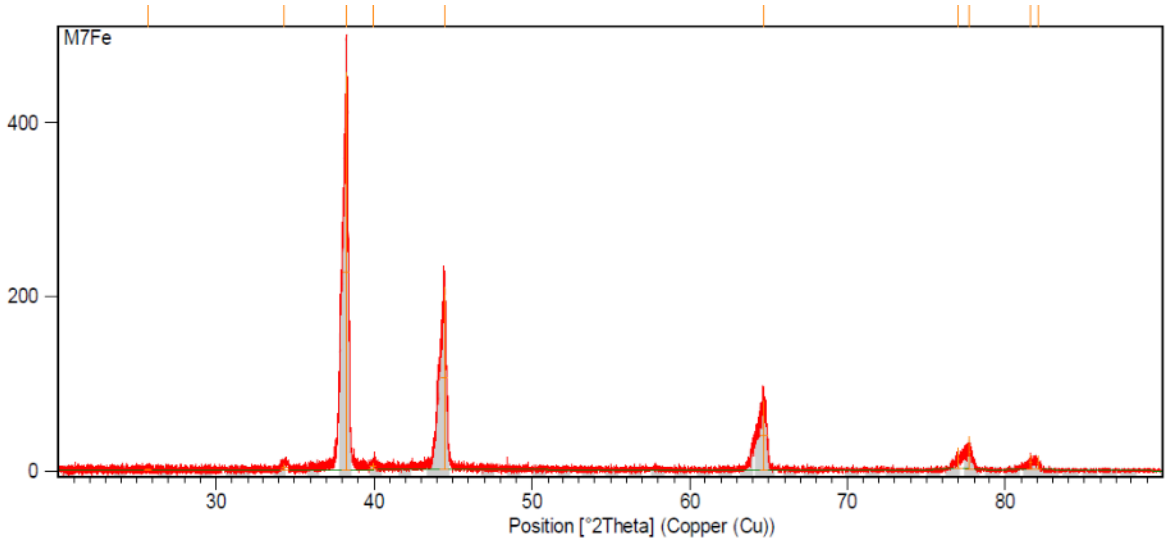
Ref. Code	Compound Name	Chemical Formula	Score	Scale Factor
01-073-1148	Aluminum Magnesium	Al12 Mg17	8	0.025
00-029-0042	Aluminum Iron	Al13 Fe4	9	0.178
00-033-0020	Aluminum Iron	Al Fe	25	0.304
00-035-0821	Magnesium	Mg	5	0.025
01-085-1410	Iron	Fe	31	0.310

Figura 23 Difracto grama de composito Al al 85% y Mg al 15%, Fe 3%



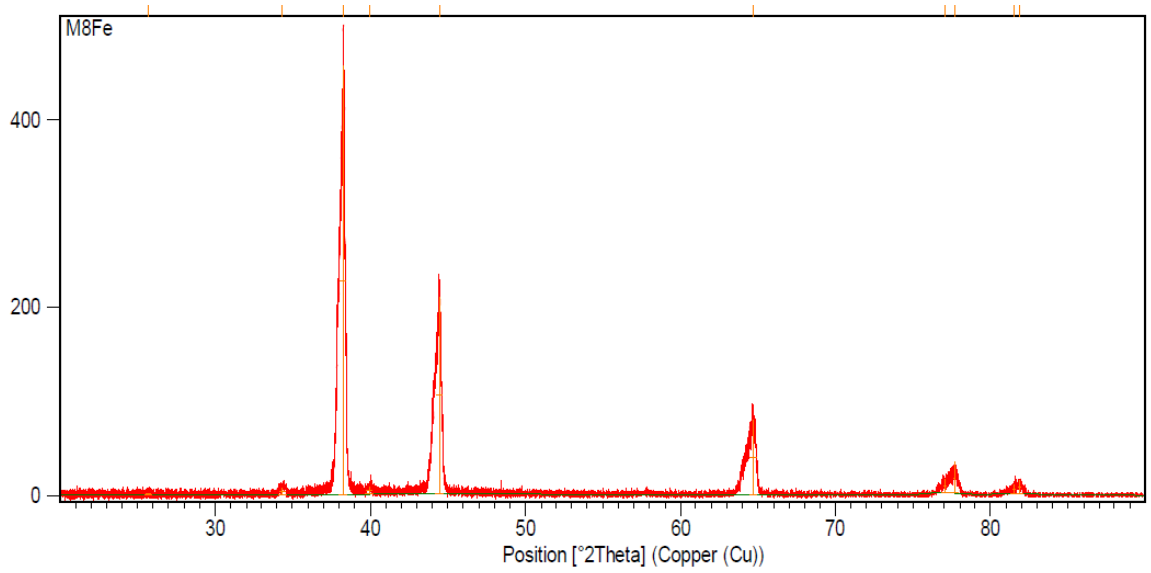
Ref. Code	Compound Name	Chemical Formula	Score	Scale Factor
01-073-1148	Aluminum Magnesium	Al12 Mg17	10	0.059
00-029-0048	Aluminum Magnesium	Al3 Mg2	13	0.075
00-033-0020	Aluminum Iron	Al Fe	29	0.509
01-087-0721	Iron	Fe	27	0.490
01-085-1327	Aluminum	Al	38	0.776

Figura 24 Difracto grama de composito Al al 85% y Mg al 15%, Fe 5%



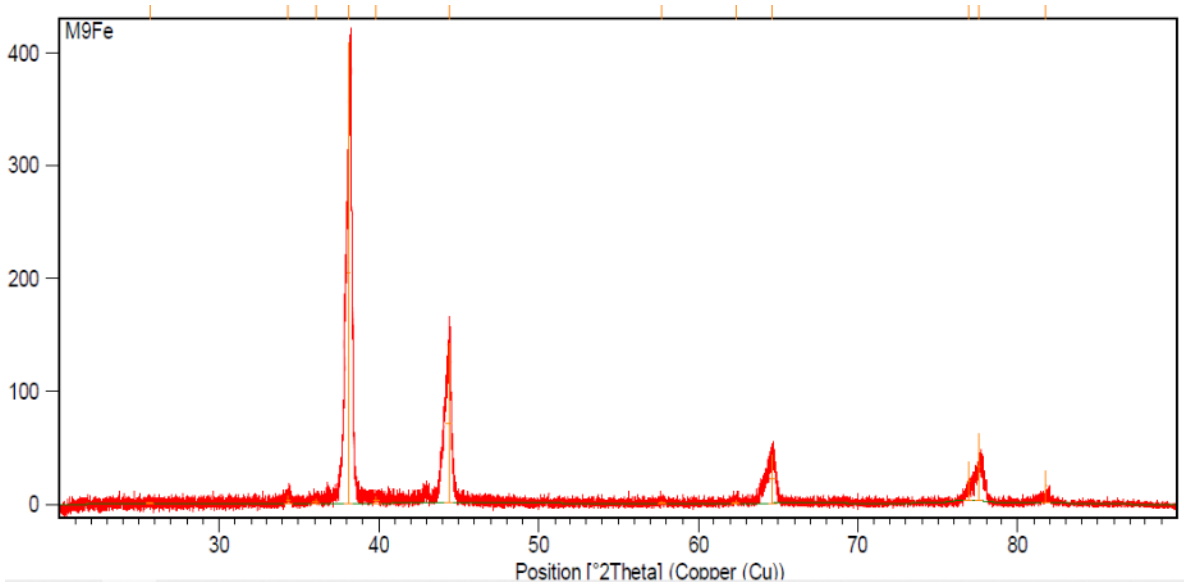
Ref. Code	Compound Name	Chemical Formula	Score	Scale Factor
01-073-1148	Aluminum Magnesium	Al12 Mg17	2	0.376
00-033-0020	Aluminum Iron	Al Fe	31	0.366
01-085-1327	Aluminum	Al	52	0.754
01-087-0721	Iron	Fe	32	0.384

Figura 25 Difracto grama de composito Al al 90% y Mg al 10%, Fe 1%



Ref. Code	Compound Name	Chemical Formula	Score	Scale Factor
01-073-1148	Aluminum Magnesium	Al12 Mg17	2	0.368
00-033-0020	Aluminum Iron	Al Fe	30	0.365
00-004-0787	Aluminum	Al	50	0.700
01-087-0721	Iron	Fe	32	0.366

Figura 26 Difracto grama de composito Al al 90% y Mg al 10%, Fe 3%



Ref. Code	Compound Name	Chemical Formula	Score	Scale Factor
01-073-1148	Aluminum Magnesium	Al12 Mg17	5	0.024
00-033-0020	Aluminum Iron	Al Fe	27	0.292
00-004-0787	Aluminum	Al	47	0.665
01-085-1410	Iron	Fe	34	0.323

Figura 27 Difracto grama de composito Al al 90% y Mg al 10%, Fe 5%

En las figuras 30-38, se presenta el difracto grama de las muestras del composito en la figura se puede observar la formación de compuestos como el Al_{12} Mg_{17}, Sin embargo, en el pico principales (con mayor intensidad) se observa la formación del compuesto Al_3Mg_2. Se puede apreciar que la formación de los compuestos corresponde a la cantidad de elementos adicionados de acuerdo con el diagrama de fases binario, así como también se pueden identificar compuestos entre el Al y Fe.

Propiedades mecánicas

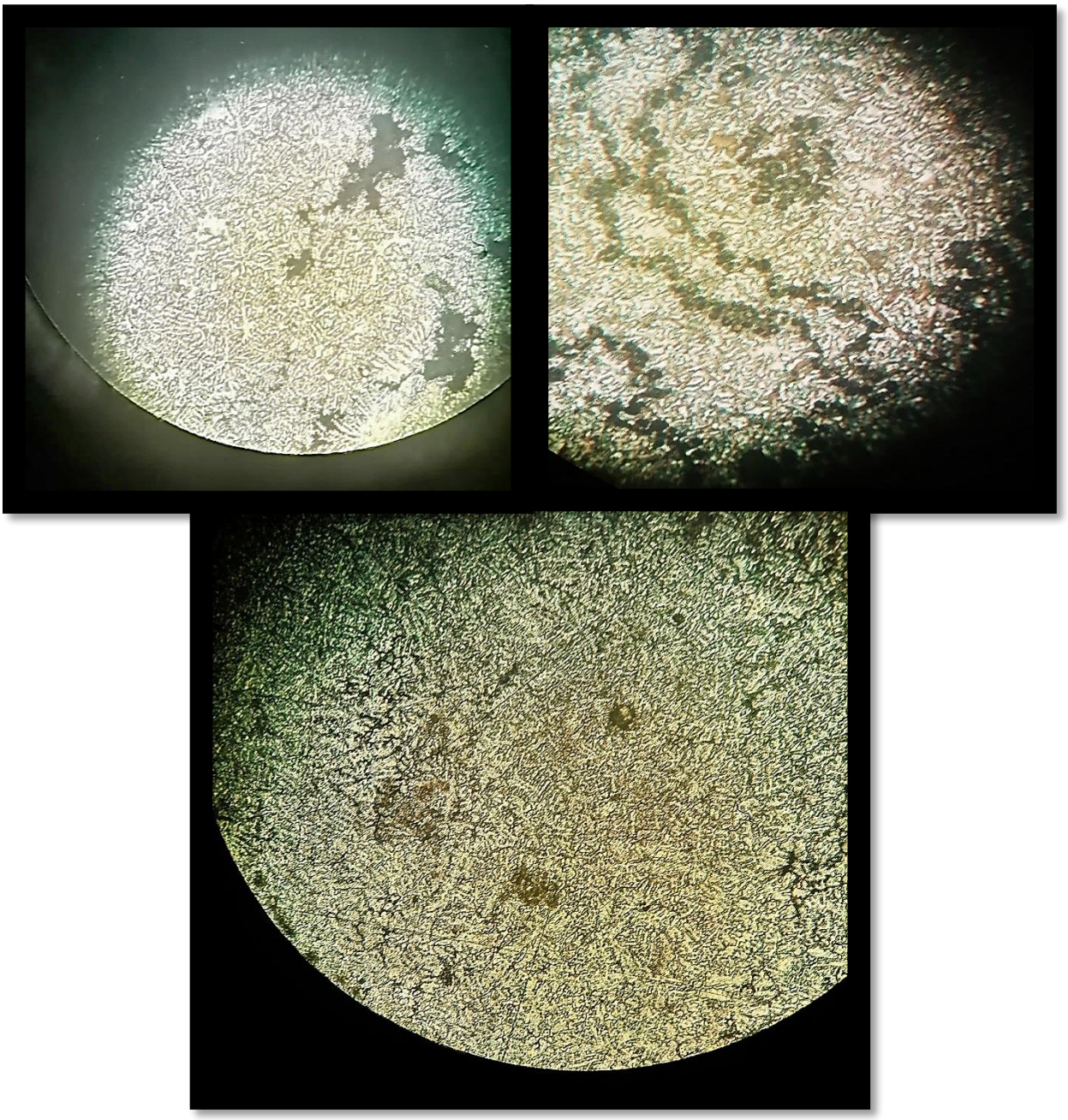


Figura 28 Superficie vista por microscopio óptico de composito

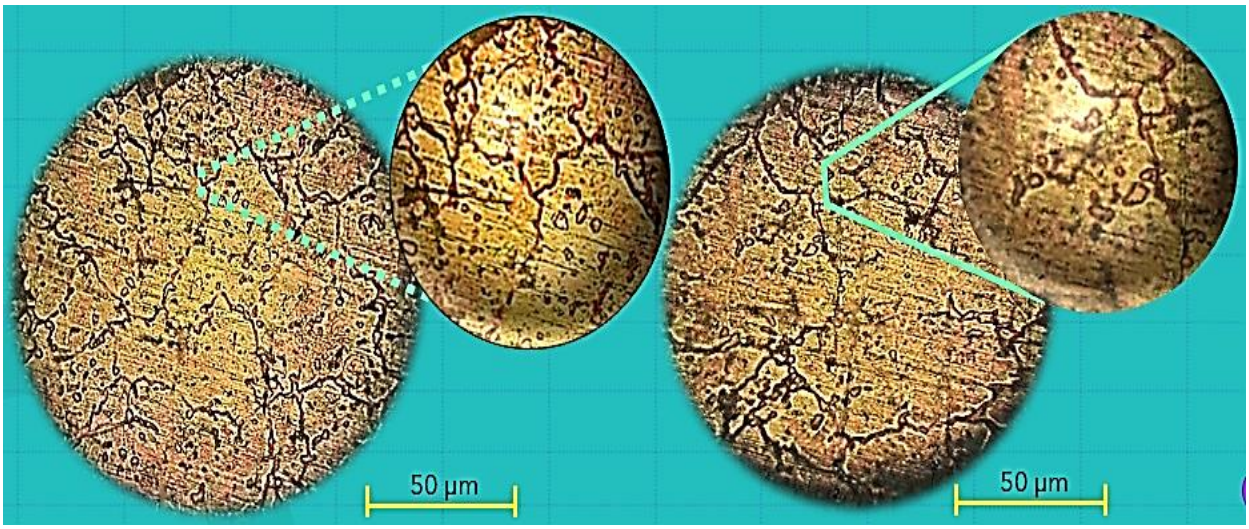


Figura 29 Frontera de granos a través del microscopio óptico

Después del tratamiento térmico vemos la precipitación de fase dentro de los granos, así mismo se observan compuestos en ciertas interfases de grano, haciendo más resistente a la deformación plástica del material.

Pruebas de desgaste

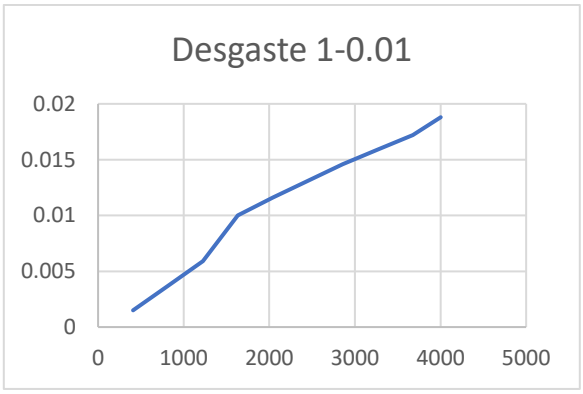


Figura 43 Pérdida de peso vs Distancia recorrida Al 80% y Mg 20%, Fe 1%

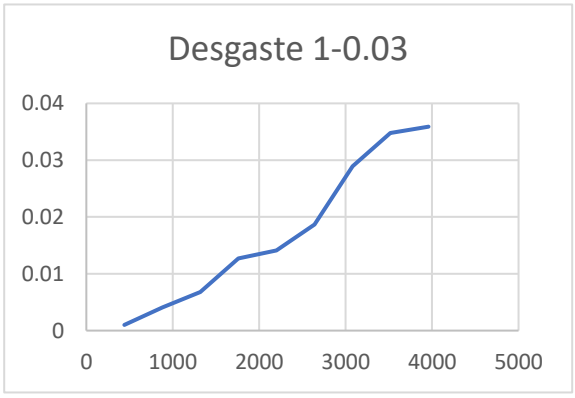


Figura 44 Pérdida de peso vs Distancia recorrida Al 80% y Mg 20%, Fe 3%

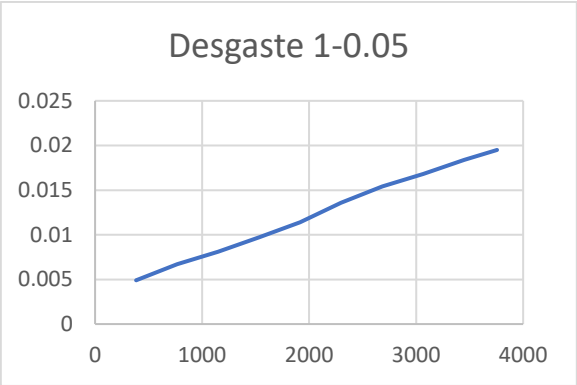


Figura 45 Pérdida de peso vs Distancia recorrida Al 80% y Mg 20%, Fe 5%

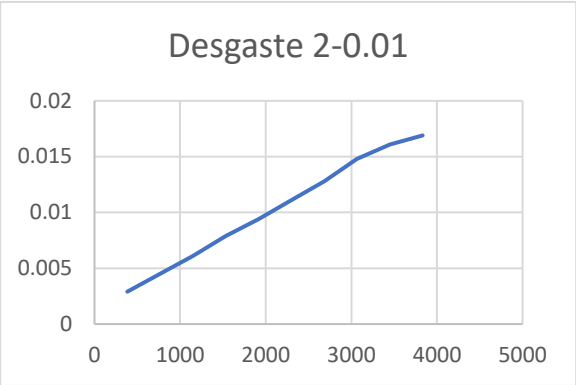


Figura 46 Pérdida de peso vs Distancia recorrida Al 85% y Mg 15%, Fe 1%

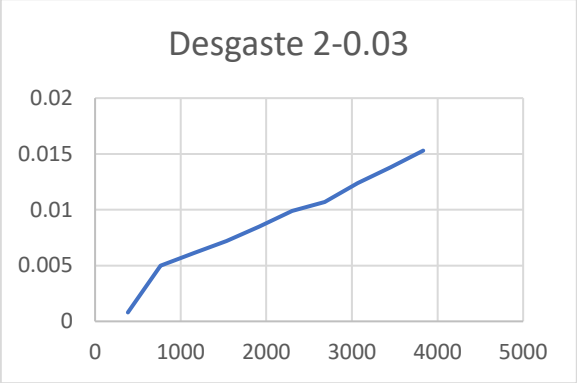


Figura 47 Pérdida de peso vs Distancia recorrida Al 85% y Mg 15%, Fe 3%

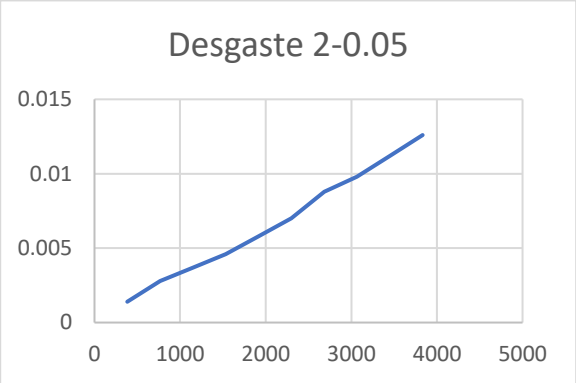


Figura 48 Pérdida de peso vs Distancia recorrida Al 85% y Mg 15%, Fe 5%

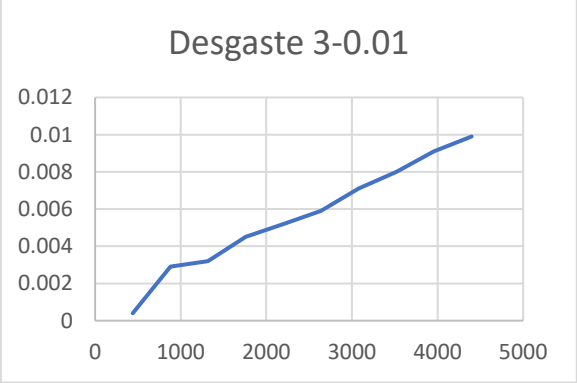


Figura 49 Pérdida de peso vs Distancia recorrida Al 90% y Mg 10%, Fe 1%

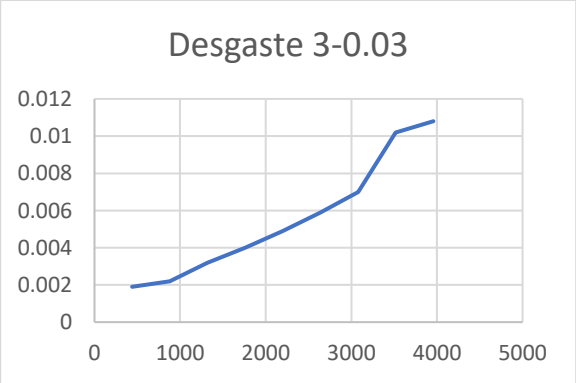


Figura 50 Pérdida de peso vs Distancia recorrida Al 90% y Mg 10%, Fe 3%

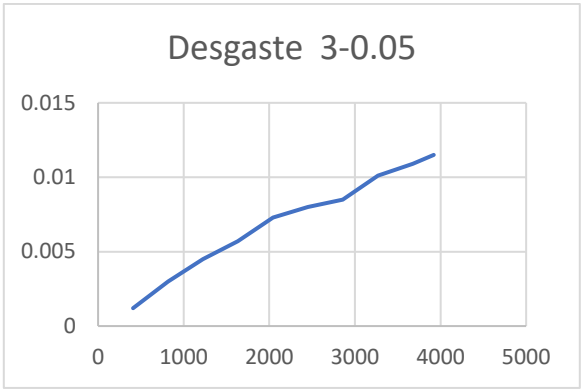


Figura 51 Pérdida de peso vs Distancia recorrida Al 90% y Mg 10%, Fe 5%

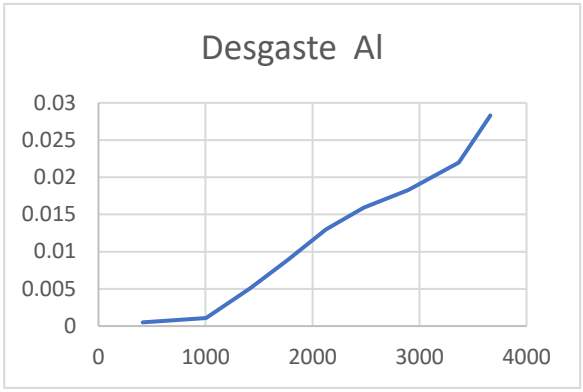


Figura 52 Pérdida de peso vs Distancia recorrida Aluminio.

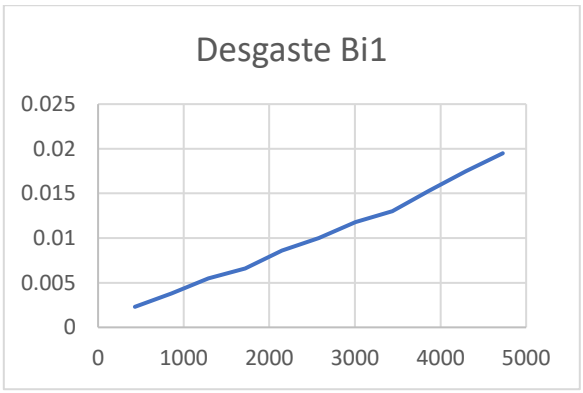


Figura 53 Pérdida de peso vs Distancia recorrida aleación Binaria 1 Al 80% y Mg 20%.

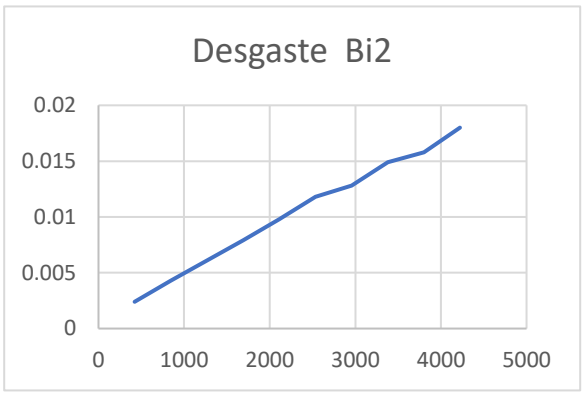


Figura 54 Pérdida de peso vs Distancia recorrida aleación Binaria 2 Al 85% y Mg 15%.

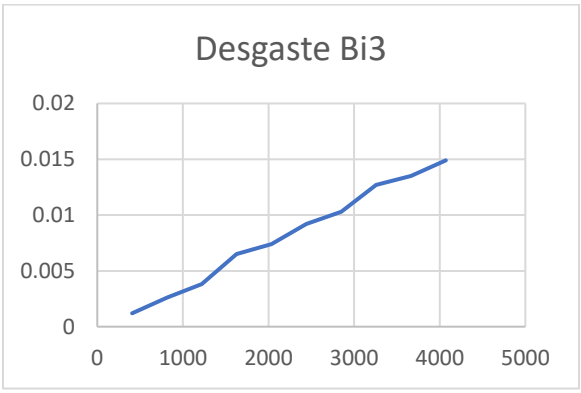


Figura 30 Pérdida de peso vs Distancia recorrida aleación Binaria 3 Al 90% y Mg 10%.

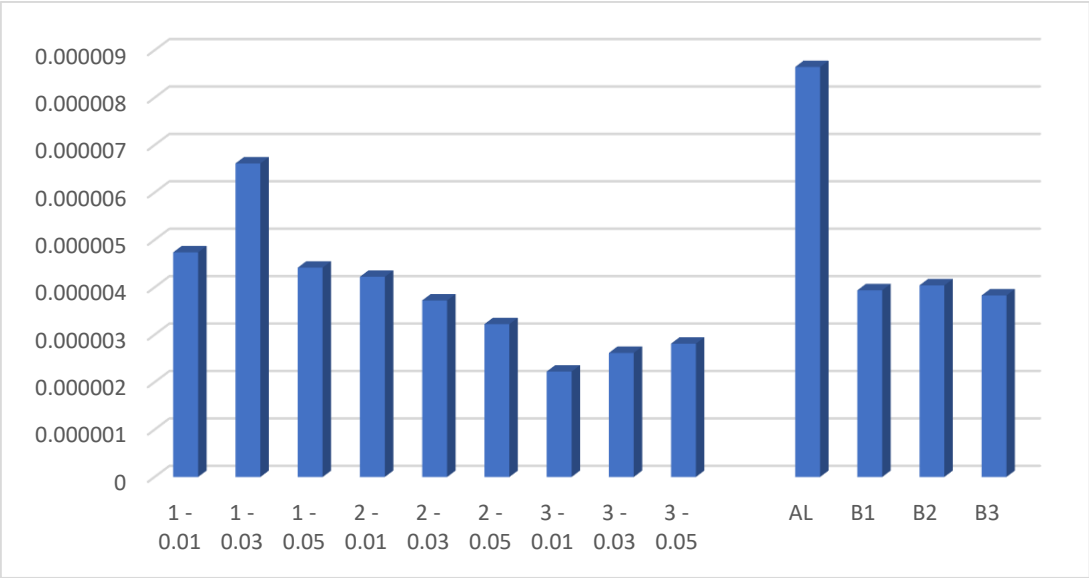


Figura 31 Pendientes de desgaste

Las ilustraciones 52 – 63 son graficas que representan el desgaste (Pérdida de peso vs Distancia recorrida) de probetas de las aleaciones reforzadas, Aluminio y aleaciones binarias. La ilustración 63 nos muestra las pendientes de cada una de ellas, entre mayor sea la pendiente el material recibe mayor desgaste, como se observa en en la gráfica de pendientes el aluminio en su pureza, recibí mayor desgaste, le siguen los materiales binarios (B1, B2, B3). Sin embargo, las aleaciones reforzadas con Fe tienen una fluctuación, las primeras aleaciones representadas por el numero uno (Al 80% y Mg 20%), presentan mayor desgaste, mientras las que tienen menor desgaste son las muestras represadas por el número tres (Al 90% y Mg 10%). Incluso la muestra con mayor resistencia al desgaste es la aleación 3 – 0.01 (Al 90% y Mg 10%, Fe 1%).

Discusión

Se ha visto que al agregar Magnesio a la matriz de Aluminio aumenta ligeramente sus propiedades a la fluencia incluso mucho mejor que cuando se le agrega la Fe como elemento reforzador posiblemente se deba a que cuando se le agrega el Hierro (Fe) la fase $Mg_{17}Al_{12}$ se ve considerablemente afectado por las nuevas fundiciones formadas. El compuesto que mejoro notablemente a las sus propiedades fue Al 90% y Mg 10%, Fe 1%, en la literatura de igual manera en los ensayos de nanoidetación en las fases de $Mg_{17}Al_{12}$ presentan una dureza de 3.39 y mientras que la matriz caso aluminio entre 1.10 MPa y 1,19 MPa. De tal caso con solo agregar Mg la dureza aumenta hasta el doble

Conclusiones

El magnesio brinda una gran resistencia al aluminio aun sin tratamiento térmico.

Al agregar los polvos de hierro se observan ciertos compuestos adentro de los granos, haciendo más resistente a la deformación plástica del material.

Al agregar el metal reforzador mejoro la resistencia a la dureza de las aleaciones binarias, como también su resistencia al desgaste.

Sin embargo, el tratamiento térmico afecto considerablemente en la dureza del compuesto reforzado principalmente aquellos con 3% y 5% de Fe.

Recomendaciones

i. Tener un ambiente controlado para las fundiciones y tratatamiento térmico.
ii. Hacer pruebas de impacto.
iii. Seguir trabajando en compositos Al – Mg con adiciones menores del 1 % de Fe.
iv. Investigar el efecto de fases presentes de cada aleacion.

Referencia

Akhtar S. Khan, Y. S. (2006). Nanocrystalline aluminum and iron: Mechanical behavior at quasi-static and high strain rates, and. *International Journal of Plasticity, 22*(2), 195-209. doi:https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2004.07.008

Amandine Duchaussoy, X. S. (2019). Structure and mechanical behavior of ultrafine-grained aluminum-iron alloy stabilized by nanoscaled intermetallic particles. *Acta Materialia, 167*, 89-102. doi:https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.01.027

Bowles, A. a. (01 de 2001). Ductility and the skin effect in high pressure die cast Mg-Al alloys. *TMS Annual Meeting*, 161-168. doi:10.1002/9781118805497.ch29

C. Hu, F. L. (2014). 8 - Developments in hot pressing (HP) and hot isostatic pressing (HIP) of ceramic matrix. (I. Low, Ed.) *Advances in Ceramic Matrix Composites*, 164-189. doi:https://doi.org/10.1533/9780857098825.1.164

Dahle, A. K. (2002). Eutectic solidification in hypoeutectic Al-Si alloys and its effect on porosity. *Advances in Aluminum Casting Technology II*, 1-10.

Gan LI, W.-y. Q.-g.-g.-q.-x. (2021). *Semi-solid processing of aluminum and magnesium alloys: Status, opportunity, and challenge in China,* (11 ed., Vol. 31). doi:doi.org/10.1016/S1003-6326(21)65729-1

Gokhale, A. a. (2001). Origins of Variability in the Mechanical Properties of AM60 Magnesium Alloy Castings. En L. John Wiley & Sons, *Magnesium Technology 2001* (págs. 195-199}). doi:https://doi.org/10.1002/9781118805497.ch34

Hall, E. O. (1951). *The Deformation and Ageing of Mild Steel: III Discussion of Results* (9 ed., Vol. 64). Proceedings of the Physical Society. Section B. doi:10.1088/0370-1301/64/9/303

Hiromi NAGAUMI, K. T. (2002). *Effects of Mg contents on porosity formation in Al–Mg alloy DC slabs* (7 ed., Vol. Volume 52). Journal of Japan Institute of Light Metals. Obtenido de https://doi.org/10.2464/jilm.52.293, https://www.jstage.jst.go.jp/article/jilm/52/7/52_7_293/_article/-char/en

I. Chung, A. B. (2012). *A study on semisolid processing of A356 aluminum alloy through vacuum-assisted electromagnetic stirring* (Vol. 58). Materials Science, Chemistry. doi:10.1007/S00170-011-3376-5

Ian Polmear, D. S.-F. (2017). 4 - Wrought Aluminium Alloys, Editor(s): Ian Polmear, David StJohn, Jian-Feng Nie, Ma Qian,. *Butterworth-Heinemann*, 157-263. doi:https://doi.org/10.1016/B978-0-08-099431-4.00004-X

Ian Polmear, D. S.-F. (2017). Wrought Aluminium Alloys. (D. S.-F. Ian Polmear, Ed.) *Light Alloys*, 157-263.

Jaswinder Singh, A. C. (2016). Characterization of hybrid aluminum matrix composites for advanced applications – A review. *Journal of Materials Research and Technology, 5*(2), 159-169. doi:https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2015.05.004.

Jeong, G. a.-E. (2015). *The Effect Of Grain Size On The Mechanical Properties Of Aluminum.* Archives of Metallurgy and Materials. doi:10.1515/amm-2015-0115

Khisheh, K. K. (2021). Influences of roughness and heat treatment on high-cycle bending fatigue properties of A380. *Materials Chemistry and Physics, 264*. doi:https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.124475

Lei Wu, Z. Y. (2021). Microstructure and tensile properties of aluminum powder metallurgy alloy prepared by a novel low-pressure sintering. *Journal of Materials Research and Technology, 14*, 1419-1429. doi:https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.07.074

Li, G. a. (2020). *Current Progress in Rheoforming of Wrought Aluminum Alloys: A Review* (Vol. 10). Metals. doi:10.3390/met10020238

Oleg D. Neikov, S. S. (2019). *Handbook of Non-Ferrous Metal Powders* (Second Edition ed.). Elsevier. doi:https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100543-9.00016-6

Polmear, I., StJohn, D., Nie, J.-F., & Qian, M. (2017). *Light Alloys: Metallurgy of the Light Metals/Ian Polmear* (5th ed ed.). Oxford, UK: Butterworth-Heinemann.

Rethwisch, C. D. (s.f.). *Ciencia e ingeniería de materiales* (10ª edición ed.).

Ridvan GECU, S. A. (2018). Influence of T6 heat treatment on A356 and A380 aluminium alloys manufactured by thixoforging. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 28*(3), 385-392. doi:https://doi.org/10.1016/S1003-6326(18)64672-2

S. Barbagallo, H. L. (2004). Divorced eutectic in a HPDC magnesium–aluminum alloy. *Journal of Alloys and Compounds, 378*(1–2), 226-232. doi:doi.org/10.1016/j.jallcom.2003.11.174

S. Billard, J. F. (2006). Macroscopic and microscopic aspects of the deformation and fracture mechanisms of ultrafine grained. *Acta Materialia, 54*(2), 411-421. doi:https://doi.org/10.1016/j.actamat.2005.09.012

S.C. Deevi, V. S. (1996). Nickel and iron aluminides: an overview on properties, processing, and applications. 357-375.

S.C. Deevi, V. S. (1996). Nickel and iron aluminides: an overview on properties, processing, and applications,. *4*(5), 357-375. doi:0966-9795(95)00056-9

Sandeep Khelge, V. K. (2021). Effect of reinforcement particles on the mechanical and wear properties of aluminium alloy. *Materials Today: Proceedings,*. doi:https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.525

Sharma, N. a. (1 de 2013). Production of AMC by stir casting – An Overview. *International journal of contemporary sociology, 2*, 23-46.

Society of automotive engineers, I. (1977). *part 1 materials parts and components* (Vol. 11). sae handbook.

Sumesh Narayan, A. R. (2017). Hardness, tensile and impact behaviour of hot forged aluminium metal matrix composites. *Journal of Materials Research and Technology, 6*(3), 213-219. doi:https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2016.09.006

T. Friemuth, J. W. (1999). Adv. Eng. Mater. 183-186.

T.B. Massalski, H. O. (1990). *Binary Alloy Phase Diagrams* (Vol. 1). ASM International.

Takahiro Kimura, T. N. (2021). Microstructures and mechanical properties of aluminum-transition metal binary alloys (Al-Fe, Al-Mn, and Al-Cr) processed

by laser powder bed fusion. *Journal of Alloys and Compounds, 872*. doi:https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.159680.

Tönshoff, H. a. (2006). Machining, magnesium technology, metallurgy, design data, applications. *Verlag Berlin Heidelberg: Springer, 398*.

V. Romanova, O. Z. (2021). Effects of the grain shape and crystallographic texture on the grain-scale mechanical behavior of additively manufactured aluminum alloys. *Additive Manufacturing, 48*(Part A). doi:https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102415

Vidžaja Knap, I. Š. (2021). Influence of iron content on SDAS factor, Al5FeSi intermetallic phases and porosity of the secondary aluminum alloy AlSi7Mg0.6 used in the automotive industry. *Transportation Research Procedia, 55*, 814-820. doi:https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.07.049

X.D. Zhang, G. S. (1995). Analysis of relationships between cohesive energy, elastic moduli and lattice parameter of some high temperature intermetallics,. *Intermetallics, 3*(2), 137-140. doi:0966-9795(95)92678-S.

X.L. Ma, S. E. (2019). *Dynamic precipitation and recrystallization in Mg-9wt.%Al during equal-channel angular extrusion: A comparative study to conventional aging* (Vols. 185-199). Acta Materialia. doi:doi.org/10.1016/j.actamat.2019.04.046.

Zhanwei Yuan, W. T. (2020). Effect of heat treatment on the interface of high-entropy alloy particles reinforced aluminum. *Journal of Alloys and Compounds,, 822*. doi:https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.153658

Zhu, Q. a. (2010). *Semi-solid moulding: Competition to cast and machine from forging in making automotive complex components.* Transactions of Nonferrous Metals Society of China. doi:10.1016/S1003-6326(10)60628-0

Anexos

Calculo de aleaciones

								75g			
		80-20			alloy 1 %	Fe %		Alloy 1	Fe		
I	I	99	1		0.975024	0.02497632	1%	9.750	0.250	10.000	0.09750237
	II	97	3		0.927271	0.07272853	3%	9.273	0.727	10.000	0.27818144
	III	95	5		0.882244	0.11775611	5%	7.058	0.942	8.000	0.35289756
		75-25									
II	I	99	1		0.976342	0.02365771	1%	8.787	0.237	9.024	0.08787081
	II	97	3		0.930933	0.06906746	3%	8.378	0.691	9.069	0.25135179
	III	95	5		0.887898	0.11210242	5%	7.991	1.121	9.112	0.39955391
		70-30									
III	I	99	1		0.977517	0.02248261	1%	9.775	0.225	10.000	0.09775174
	II	97	3		0.934211	0.06578881	3%	9.342	0.658	10.000	0.28026336
	III	95	5		0.892984	0.10701574	5%	8.930	1.070	10.000	0.44649213

Bin vs Hierro agregado

	Bin	0.01	0.03	0.05
80% Al - 20% Mg	130.8	108.70	147.08	155.20
85% Al - 15% Mg	100.48	100.23	101.55	119.38
90% Al - 10% Mg	90.38	82.80	99.58	92.80

Aleacion Bin Vs Hierro agregado y TT

	Bin	0.01	0.03	0.05
80% Al - 20% Mg	130.8	144.43	145.10	116.93
85% Al - 15% Mg	100.48	154.17	123.80	111.70
90% Al - 10% Mg	90.38	157.15	129.77	95.93

Datos de desgaste

1-0.05	24.899	0	1	Distancia	Desgaste	1-0.1	24.9008			Distancia	Desgaste	1-0.15	24.9354			Distancia	Desgaste
0.063	24.8975	5	1	408.407045	0.0015	0.07	24.8998	5	1	439.822972	0.001	0.061	24.9305	5	1	383.274304	0.0049
0.067	24.8953	10	2	816.81409	0.0037		24.8967	10	2	879.645943	0.0041		24.9287	10	2	766.548607	0.0067
	24.8931	15	3	1225.22113	0.0059	1.46607657	24.894	15	3	1319.46891	0.0068		24.9273	15	3	1149.82291	0.0081
0.065	24.889	20	4	1633.62818	0.01		24.8881	20	4	1759.29189	0.0127	1.27758101	24.9257	20	4	1533.09721	0.0097
1.361356817	24.8874	25	5	2042.03522	0.0116		24.8867	25	5	2199.11486	0.0141		24.924	25	5	1916.37152	0.0114
	24.8859	30	6	2450.44227	0.0131		24.8821	30	6	2638.93783	0.0187		24.9218	30	6	2299.64582	0.0136
	24.8844	35	7	2858.84931	0.0146		24.8719	35	7	3078.7608	0.0289		24.92	35	7	2682.92013	0.0154
	24.8831	40	8	3267.25636	0.0159		24.866	40	8	3518.58377	0.0348		24.9186	40	8	3066.19443	0.0168
	24.8818	45	9	3675.6634	0.0172		24.8649	45	9	3958.40674	0.0359		24.917	45	9	3449.46873	0.0184
	24.8802	49	10	4002.38904	0.0188			49	10				24.9159	49	10	3756.08818	0.0195
2- 0.05	24.8717			Distancia	Desgaste	2 - 0.1	25.0062			Distancia	Desgaste	2 - 0.15	24.9497			Distancia	Desgaste
0.061	24.8688	5	1	383.274304	0.0029	0.061	25.0054	5	1	383.274304	0.0008	0.061	24.9483	5	1	383.274304	0.0014
	24.8672	10	2	766.548607	0.0045		25.0012	10	2	766.548607	0.005		24.9469	10	2	766.548607	0.0028
	24.8656	15	3	1149.82291	0.0061	1.27758101	25.0001	15	3	1149.82291	0.0061		24.946	15	3	1149.82291	0.0037
	24.8638	20	4	1533.09721	0.0079		24.999	20	4	1533.09721	0.0072	1.27758101	24.9451	20	4	1533.09721	0.0046
1.277581012	24.8623	25	5	1916.37152	0.0094		24.9977	25	5	1916.37152	0.0085		24.9439	25	5	1916.37152	0.0058
	24.8606	30	6	2299.64582	0.0111		24.9963	30	6	2299.64582	0.0099		24.9427	30	6	2299.64582	0.007
	24.8589	35	7	2682.92013	0.0128		24.9955	35	7	2682.92013	0.0107		24.9409	35	7	2682.92013	0.0088
	24.8569	40	8	3066.19443	0.0148		24.9938	40	8	3066.19443	0.0124		24.9399	40	8	3066.19443	0.0098
	24.8556	45	9	3449.46873	0.0161		24.9924	45	9	3449.46873	0.0138		24.9385	45	9	3449.46873	0.0112
	24.8548	50	10	3832.74304	0.0169		24.9909	50	10	3832.74304	0.0153		24.9371	50	10	3832.74304	0.0126

3 - 0.05	25.0092			Distancia	Desgaste	3 - 0.1	24.9158			Distancia	Desgaste	3 - 0.15	24.9921			Distancia	Desgaste
0.07	25.0088	5	1	439.822972	0.0004	0.07	24.9139	5	1	439.822972	0.0019	0.065	24.9909	5	1	408.407045	0.0012
	25.0063	10	2	879.645943	0.0029		24.9136	10	2	879.645943	0.0022		24.9891	10	2	816.81409	0.003
	25.006	15	3	1319.46891	0.0032	1.46607657	24.9126	15	3	1319.46891	0.0032		24.9876	15	3	1225.22113	0.0045
1.466076572	25.0047	20	4	1759.29189	0.0045		24.9118	20	4	1759.29189	0.004	1.36135682	24.9864	20	4	1633.62818	0.0057
	25.004	25	5	2199.11486	0.0052		24.9109	25	5	2199.11486	0.0049		24.9848	25	5	2042.03522	0.0073
	25.0033	30	6	2638.93783	0.0059		24.9099	30	6	2638.93783	0.0059		24.9841	30	6	2450.44227	0.008
	25.0021	35	7	3078.7608	0.0071		24.9088	35	7	3078.7608	0.007		24.9836	35	7	2858.84931	0.0085
	25.0012	40	8	3518.58377	0.008		24.9056	40	8	3518.58377	0.0102		24.982	40	8	3267.25636	0.0101
	25.0001	45	9	3958.40674	0.0091		24.905	45	9	3958.40674	0.0108		24.9812	45	9	3675.6634	0.0109
	24.9993	50	10	4398.22972	0.0099			50	10				24.9806	48	10	3920.70763	0.0115

Aluminio	25.0477			Distancia	Desgaste
0.047	25.0472	7	1	413.433593	0.0005
	25.0466	17	2	1004.05301	0.0011
0.984365698	25.0426	24	3	1417.48661	0.0051
	25.0388	30	4	1771.85826	0.0089
	25.0347	36	5	2126.22991	0.013
	25.0318	42	6	2480.60156	0.0159
	25.0294	49	7	2894.03515	0.0183
	25.0257	57	8	3366.53069	0.022
	25.0194	62	9	3661.8404	0.0283

bi1	24.9008		Distancia	Desgaste
0.057	24.8985	6	429.769875	0.0023
	24.897	12	859.53975	0.0038
1.19380521	24.8953	18	1289.30963	0.0055
	24.8942	24	1719.0795	0.0066
	24.8922	30	2148.84938	0.0086
	24.8908	36	2578.61925	0.01
	24.889	42	3008.38913	0.0118
	24.8878	48	3438.159	0.013
	24.8855	54	3867.92888	0.0153
	24.8833	60	4297.69875	0.0175
	24.8813	66	4727.46863	0.0195

b2	24.7942			Desgaste
0.056	24.7918	6	422.230053	0.0024
	24.7899	12	844.460105	0.0043
1.17286126	24.7881	18	1266.69016	0.0061
	24.7863	24	1688.92021	0.0079
	24.7844	30	2111.15026	0.0098
	24.7824	36	2533.38032	0.0118
	24.7814	42	2955.61037	0.0128
	24.7793	48	3377.84042	0.0149
	24.7784	54	3800.07047	0.0158
	24.7762	60	4222.30053	0.018

b3	24.8738		Distancia	Desgaste
0.054	24.8726	6	407.150408	0.0012
	24.8712	12	814.300816	0.0026
1.130973355	24.87	18	1221.45122	0.0038
	24.8673	24	1628.60163	0.0065
	24.8664	30	2035.75204	0.0074
	24.8646	36	2442.90245	0.0092
	24.8635	42	2850.05286	0.0103
	24.8611	48	3257.20326	0.0127
	24.8603	54	3664.35367	0.0135
	24.8589	60	4071.50408	0.0149

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

Instituto de Investigación en Ciencias Básicas y Aplicadas

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS

JEFATURA DE POSGRADO EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

Cuernavaca, Morelos, 19 de septiembre de 2024.

DR. ARTURO MOLINA OCAMPO
COORDINADOR DEL POSGRADO
EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
P R E S E N T E

Atendiendo a la solicitud para emitir DICTAMEN sobre la revisión de la TESIS titulada: **Diseño, Síntesis y caracterización de compositos base Al-Mg con adición de polvos de Fe**, que presenta el alumno **Gabriel Tapia Manrra**, para obtener el título de **Maestría en Ingeniería y Ciencias Aplicadas.**

Nos permitimos informarle que nuestro voto es **APROBATORIO.**

Atentamente
Por una humanidad culta

DR. JOSÉ GONZALO GONZÁLEZ RODRÍGUEZ
DR. RENE GUARDIAN TAPIA
DRA. ABIGAIL PARRA PARRA
DR. ROY LÓPEZ SESENES
DR. ISAÍ ROSALES CADENA

Se adiciona efirma UAEM

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

ROY LOPEZ SESENES | Fecha:2024-09-19 16:08:00 | FIRMANTE

c7RPKzrnKmyJyYPkuIhHZvmRmoaU2T36uLOIKTEJ65R/QrsSezSERkhh8k5pp6trXnnxtQf6eqKi5aCUIr6t9SkEbMH8qva0k42qScbc7y3nmw8ST95o0X9PDKsa6fLOP9NT5zyfkxGJDKy3RAExlitEzf/sknrGoqBWmJ0CayTGzMGiR2vCIJDJAEHZJLvkm7wvRlVIh14gwsIK7zwtnp+k7KMxmt8bnu0am9vJVVEqgOz74BGA0O6oVVI9EZwke4zOCgHDNrmQ82S7qE3EnbW/1T/MEHypd+YEyVGVeewqnVQgkFvZOhFVX9PErABpab9ADfvr+hxu3hbHUSt78g==

JOSE GONZALO GONZALEZ RODRIGUEZ | Fecha:2024-09-30 11:14:19 | FIRMANTE

Qo6CjnIbSO7wGvHLCiKp006YxbIxodgmzFPO10iLyHRTv58mjfOrSGJHThHQt0n0ZkGzRUVX9Qkr54D31gAg3SJSwJqEH51Jp/x8Cn5jT+LSIj54/FsfejUreEoGlK3g2iYFKk5gIoLsf74TVVkGhN6E32arACUgNM9plKQcPe225T22aWGsEVV4utx1dD5fAESk5ELl2E90mUFFz7cEcgAAycWChK4wYziUlQn59o8q53mbHX5oOqUv3uRJeRk+LNArPq1YZJ7J6VzyFCUoEdTYudtBvAoV0CrnY/NMul/4JZ+LE5XOyNe/yfxecMY4Njwb1ZwLdHGEAPi26+JRug==

ISAI ROSALES CADENA | Fecha:2024-10-03 07:59:51 | FIRMANTE

MCt9F4+si9KgkNbYaCTUYBm/NVw8hHZsD9JISMydfOiNsvIrdH20HU6fgFyYa9QtSoQyjlVbNN9EEC4skblqlQ9lsaAo3gCdLR17Sqq4AtbEOVbBsbpPS+msfPkRN+vFCSsqZAlRSrMPGInitmSPA33kmjLFrcmILsAl1T7znCqstHieeSDmat9ymfXhImHW6bAsj1/oUrr+nFpTnGCUSQkl6Senfi/ZNhxo0vaaopg+sEiCM/J51e+u6qJywa4Ig93nASVGeHaPBIe8oyVqrg0QfWs5qaXSQL5ao3rvepLKtIaNFF8YR+Tv37R7Ao7XYHGbkOvJWazssc/fv2smGA==

RENE GUARDIAN TAPIA | Fecha:2024-10-17 07:30:02 | FIRMANTE

utEtVXfC0Fig9yCfsx7s7nzZkQ1z8LwmsITZI7PK+M2xzNelD0oCC0zNf+IeHWMV+CKFgIOCZdD59rnM88xth5IyqzwotDZdW/YLqBUPcWbONSWl8r6u9URoFFydxuSUil8DvxWUFGz/CIXXBihh0fJmDMYB4aDRE0v/Nzyn8Vcyr4zoYQwiT1B8l7HY0cZI+99Jydgyk7ffnAucpgX0TdgdrR9guLFK/ipQhKOPCZAE+BB+rjJAVdwRAGmeccmsxL2IkJwhb/xduQR3VPGEublEK71/AbYs60u7+I7lEKxbNwywDCBksBQUIWLc1eaOB8OFzr4+rAJPVZNmeLnkzA==

ABIGAIL PARRA PARRA | Fecha:2024-10-22 14:12:27 | FIRMANTE

AMGt2BWjnkQI18ogqvC5aJ3G1B9kLomJkU1T+NbRoXvj1UAKbaGxTVtBoiE2+cmhx1NILdO4h+nCgsDH7dFpUTXF7Y8tzfr5c3YHJUtjn2bLzPy/10+B5TxojRvUg/ZZISDpKHdhwLHOExv7MWcMqGc2eb8lB9LrGxhBUiAMJvC1ZOZZz48Le693OE+78KaB6MdSPIXf9Xgl8lQFCkaTMb6VcyvPJwirjLLobZPpZMZ5+cPbX0q6BVIOll8fMYTrW9s0D0pxykB7nszO7xXtupVX583HFO6o/c/LIDfGe4IwhjCFNtrT0DW62fKT2PI4iCzFlZYvtf81LiGNXx6A1A==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:

g9xI1mQdl

https://efirma.uaem.mx/noRepudio/tkJ5TAr8ayy5fzmmA2TO9vsdZmTSL4ek