



**EDUCACIÓN**  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA

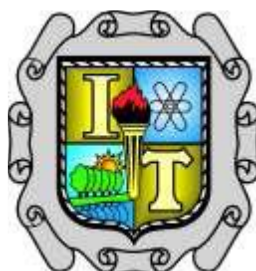


TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO®

Instituto Tecnológico de Saltillo

# **INSTITUTO TECNOLÓGICO DE SALTILLO**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**



**“PROCESAMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES  
COMPUESTOS DE MATRIZ DE MAGNESIO REFORZADOS CON  
PARTÍCULAS CERÁMICAS POR ALEADO MECÁNICO”**

## **TESIS**

QUE PRESENTA:

**ING. BRANDON OSVALDO VILLARREAL FUENTES**

PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN CIENCIAS DE LOS MATERIALES**

DIRIGIDA POR:

**Dr. Mario Rodríguez Reyes**  
Director

**Dr. Dagoberto Vázquez Obregón**  
Codirector

SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO.

6-DICIEMBRE-2021



Instituto Tecnológico de Saltillo

Saltillo, Coahuila, 15/Octubre/2021

**DR. JAIME ENRIQUE PÉREZ TERRAZAS  
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE  
POSGRADO E INVESTIGACIÓN  
PRESENTE.**

Los que suscribimos, integrantes del Comité Tutorial nombrados para dar seguimiento y examinar el manuscrito de la tesis titulada:

**"PROCESAMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ DE  
MAGNESIO REFORZADOS CON PARTÍCULAS CERÁMICAS POR ALEADO MECÁNICO"**

Que presenta el candidato al Grado de MAESTRO EN CIENCIAS DE LOS MATERIALES:

**"BRANDON OSVALDO VILLARREAL FUENTES"**

Reunidos para tal efecto, y después de intercambiar opiniones, manifestamos nuestra aceptación a dicho trabajo en virtud de que satisface los requerimientos técnicos, científicos y de redacción que requiere el nivel del grado a obtener, ya que se han realizado las correcciones que cada uno en particular consideró pertinentes.

Por tal motivo este Comité autoriza la presentación e impresión del manuscrito de tesis en mención.

**ATENTAMENTE  
"EL COMITÉ TUTORIAL DE TESIS"**

**DR. MARIO RODRÍGUEZ REYES  
DIRECTOR DE TESIS**

**DR. DAGOBERTO VAZQUEZ OBREGON  
CODIRECTOR DE TESIS**

**DR. JOSÉ ALONSO DÍAZ GUILLEN  
SINODAL**

**DRA. PERLA JANET RESENDIZ HERNANDEZ  
SINODAL**





Instituto Tecnológico de Saltillo

Saltillo, Coahuila, 15/Octubre/2021



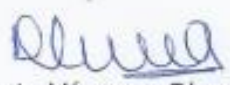
Asunto: Carta de cesión de derechos

**DR. JAÍME ENRIQUE PÉREZ TERRAZAS**  
**JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE**  
**POSGRADO E INVESTIGACIÓN**  
**PRESENTE.**

Por medio de la presente, quienes suscriben, Ing. Brandon Osvaldo Villarreal Fuentes, Dr. Mario Rodríguez Reyes y Dr. Dagoberto Vázquez Obregón, nos permitimos informarle que declaramos nuestra conformidad para ceder los derechos del documento de tesis, titulado "Procesamiento y caracterización de materiales compuestos de matriz de magnesio reforzados con partículas cerámicas por aleado mecánico", el cual certificamos es trabajo original, al Instituto Tecnológico de Saltillo.

Lo anterior con el fin de que sea dispuesto de manera pública por el Instituto Tecnológico de Saltillo, para su libre consulta y, de ser el caso, su contenido sea citado y referenciado por terceros.

Estando de acuerdo y conformes en lo establecido en la cesión de derechos, firmamos el documento para constancia y efectos legales necesarios.

Cedentes	
 <u>Ing. Brandon Osvaldo Villarreal Fuentes</u> Estudiante	 <u>Dr. Mario Rodríguez Reyes</u> Director de tesis
 <u>Dr. Dagoberto Vázquez Obregón</u> Codirector de tesis	







# EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de  
Saltillo

Saltillo, Coahuila, **26/octubre/2021**

OFICIO No. DEPI/086/2021

ING. BRANDON OSVALDO VILLARREAL FUENTES  
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LOS MATERIALES  
PRESENTE.

Por este conducto tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial nombrado para dar seguimiento a su trabajo de tesis titulado "Procesamiento y caracterización de materiales compuestos de matriz de magnesio reforzados con partículas cerámicas por aleado mecánico", ha informado a esta División de Estudios de Posgrado e Investigación, que su trabajo satisface los requerimientos necesarios para su presentación. Así mismo, se cuenta en esta División con las evidencias de que Usted cumple con los requisitos académicos necesarios para la presentación de este trabajo. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la Impresión Definitiva de su trabajo de tesis.

Esperando que el logro de sus metas sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

**A T E N T A M E N T E**  
Excelencia en Educación Tecnológica.

DR. JAIME ENRIQUE PÉREZ TERRAZAS  
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE  
POSGRADO E INVESTIGACIÓN

ccp. Archivo

JEPT/jept



Dvdi. Venustiano Carranza No. 2400, Col. Tecnológico,  
C.P. 25280, Saltillo, Coahuila, Tel/Fax: 846 402-08-40  
Rev. 16

[www.its.mx](http://www.its.mx)



## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a Dios por darme salud y fuerza para concluir con éxito mis estudios de posgrado logrando un objetivo más de vida.

Agradezco a mi querido Instituto Tecnológico de Saltillo y a la División de Estudios de Posgrado e Investigación (DEPI) por aceptarme y permitir desarrollar esta investigación en los laboratorios y equipos científicos.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la ayuda económica que me brindó durante mis estudios de posgrado.

Agradezco profundamente a mi director de tesis, Dr. Mario Rodríguez Reyes por brindarme todo su apoyo y sabiduría para poder culminar exitosamente mis estudios de maestría. De igual forma quiero agradecer a mi codirector, Dr. Dagoberto Vázquez Obregón y a mis sinodales, Dra. Perla Janet Reséndiz Hernández y Dr. José Alonso Díaz Guillen y por toda su atención, exigencias y sugerencias que me brindaron durante mis estudios.

Quiero agradecer a mis padres, a mi hermana, a mi compañera de vida y a mi hijo, por todo el apoyo que me proporcionaron durante esta etapa de mi vida. Este logro obtenido es también de ellos.

## INDICE

RESUMEN.....	i
ABSTRACT.....	ii
OBJETIVOS.....	iii
General:.....	iii
Específicos:.....	iii
PROBLEMÁTICA.....	iv
JUSTIFICACIÓN.....	v
HIPÓTESIS.....	vi
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. MARCO TEÓRICO.....	3
2.1    Magnesio.....	3
2.1.1    Propiedades del Magnesio.....	4
2.1.2    Aplicaciones del Magnesio.....	5
2.1.2.1    Sector aeroespacial y aeronáutico.....	5
2.1.2.2    Electrónica.....	6
2.1.2.3    Medicina.....	6
2.1.2.4    Sector automotriz.....	7
2.1.3    Compuestos con matriz de magnesio.....	8
2.2    Aplicación en la industria automotriz: cárter.....	9
2.3    Desecho de la fundición de hierro (DF).....	11
2.3.1    Wollastonita ( $\text{CaSiO}_3$ ).....	12
2.4    Materiales Compuestos.....	12
2.4.1    Propiedades de materiales compuestos.....	13
2.4.2    Métodos de obtención.....	14
2.4.3    Materiales compuestos de matriz metálica.....	15
2.4.4    Refuerzos.....	17
2.5    Molienda mecánica.....	18
2.6    Aleado mecánico.....	18
2.6.1    Fundamentos del aleado mecánico.....	18
2.6.2    Proceso de aleado mecánico.....	19
2.6.3    Materiales de inicio.....	20

2.6.4	Parámetros de Proceso .....	21
2.6.4.1	Tipo de molinos .....	21
2.6.4.2	Velocidad de molienda .....	21
2.6.4.3	Tiempo de molienda .....	22
2.6.4.4	Relación de carga.....	22
2.6.4.5	Agentes de control de proceso .....	22
2.6.4.6	Temperatura de molienda .....	23
2.6.4.7	Mecanismos del aleado mecánico.....	23
2.7	Técnicas de Caracterización .....	24
2.7.1	Espectroscopía de Absorción Atómica (AA) .....	24
2.7.2	Espectroscopía de Emisión Atómica (EEA).....	24
2.7.3	Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).....	25
2.7.4	Difracción de Rayos X (DRX).....	26
2.7.4.1	Ecuación Scherrer.....	27
2.7.5	Análisis Térmico.....	27
2.7.5.1	Análisis Termogravimétrico (ATG).....	28
2.7.5.2	Análisis Térmico Diferencial (ATD) .....	28
2.7.6	Distribución de tamaño de partícula por difracción láser (DTP).....	28
2.7.7	Microscopía Óptica (MO).....	29
2.8	Ensayos físicos y mecánicos.....	30
2.8.1	Medición de densidad .....	30
2.8.1.1	Principio de Arquímedes.....	31
2.8.2	Medición de porosidad .....	31
2.8.3	Ensayo de dureza Vickers.....	32
2.8.4	Ensayo de resistencia a la compresión .....	32
III.	METODOLOGÍA EXPERIMENTAL .....	33
3.1	Diagrama de procedimiento experimental.....	33
3.2	Matriz experimental.....	34
3.3	Acondicionamiento de la materia prima .....	34
3.4	Caracterización química, física y microestructural de los polvos de inicio.....	35
3.4.1	Análisis por Espectroscopía de Absorción (AA) y Emisión Atómica por Plasma (EEA).....	35
3.4.2	Análisis por Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) .....	35

3.4.3	Análisis por difracción de rayos x (DRX).....	35
3.4.4	Distribución de tamaño de partícula por difracción láser (DTP) .....	36
3.5	Aleado mecánico .....	36
3.6	Caracterización de los polvos aleados mecánicamente .....	36
3.6.1	Análisis Térmico Diferencial y Análisis Termogravimétrico (ATD/ATG)....	36
3.7	Compactación de polvos.....	37
3.8	Sinterización de probetas (polveros compactados).....	37
3.9	Microscopía Óptica (MO).....	37
3.10	Evaluación de propiedades físicas y mecánicas de las probetas sinterizadas	38
3.10.1	Evaluación de densidad .....	38
3.10.2	Análisis de la Porosidad.....	38
3.10.3	Ensayo de dureza Vickers.....	38
3.10.4	Ensayo de resistencia a la compresión .....	39
3.10.5	Análisis fractográfico .....	39
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	40
4.1	Acondicionamiento y caracterización de materia prima. ....	40
4.1.1	Polvos de Magnesio .....	40
4.1.2	Polvos de desecho de la fundición. ....	47
4.2	Aleado Mecánico .....	48
4.3	Evaluación de propiedades físicas y mecánicas.....	57
V.	CONCLUSIONES.....	67
VI.	REFERENCIAS .....	69
VII.	ANEXOS.....	77



## **Simbología utilizada**

DF: Desecho de fundición.

AA: Espectroscopía de Absorción Atómica.

EAA: Espectroscopía de Emisión Atómica.

MEB: Microscopía Electrónica de Barrido.

DRX: Difracción de Rayos X.

ATD: Análisis Térmico Diferencial.

MO: Microscopía Óptica.

DTP: Distribución de tamaño de partícula por difracción láser.

HV: Dureza Vickers.

R.C: Resistencia a la compresión.

$\sigma$ : Esfuerzo.

$\epsilon$ : Deformación.

EDX: Espectroscopía de energía dispersa de rayos X.

RPM: Revoluciones por minuto.

$\mu\text{m}$ : Micrómetros

h: Horas

95/5: Sistema con 95% de Mg, 5% de DF.

90/10: Sistema con 90% de Mg, 10% de DF.

85/15: Sistema con 85% de Mg, 15% de DF.

## RESUMEN

Hoy en día, se requieren de materiales ligeros y resistentes para utilizarse en componentes de diversas industrias como la aeroespacial y la automotriz, con el objetivo de disminuir el peso de las aeronaves y vehículos, eficientizando de esta manera su rendimiento. Las aleaciones de magnesio y compuestos de matriz de magnesio cumplen con las características densidad/resistencia que se buscan para posibles aplicaciones automotrices. Sin embargo, los procesos convencionales para la obtención de materiales base magnesio, requiere tomar exhaustivas precauciones, por lo que el proceso de pulvimetalurgia o metalurgia de polvos, es atractivo como nueva ruta de procesamiento de dichos materiales.

En la presente investigación, se desarrollaron y analizaron materiales compuestos de matriz de magnesio reforzados con desecho de la fundición de hierro (DF), los cuales fueron procesados por metalurgia de polvos, modificando el contenido del DF, hasta en un 15% e.p. Se sinterizaron a una temperatura de 450°C, la cual se determinó mediante un análisis térmico y se evaluaron diferentes tiempos de permanencia (30, 60 y 90 minutos). Los cambios morfológicos y químicos fueron caracterizados por MEB y EDX. Además, por medio de DRX se identificaron las fases presentes (Mg,  $\text{CaSiO}_3$  y MgO). La microestructura fue analizada por microscopía óptica, donde se observó una disminución del tamaño de grano con el incremento del material de refuerzo (DF). La densidad y porosidad de los materiales experimentó un comportamiento contrario al tamaño de grano, pues dichas propiedades se incrementaron con el refuerzo adicionado (DF), alcanzando valores en la densidad de 1.95 g/cm<sup>3</sup> y un porcentaje de porosidad 3.76% para el sistema con 15% e.p de DF. Las propiedades mecánicas de dureza Vickers (HV) y resistencia a la compresión aumentaron significativamente con el contenido de DF, alcanzando valores de 91-92 HV y 347-393 MPa, respectivamente. En el análisis fractográfico se identificó que tanto el Mg y los compuestos Mg/DF presentaron fractura frágil.

## ABSTRACT

Nowadays, light and resistant materials are required to be used in components of various industries such as aerospace and automotive, with the aim of reducing the weight of aircraft and vehicles, making their performance more efficient. Magnesium alloys and magnesium matrix compounds meet the density/resistance characteristics that are sought for possible automotive applications. However, conventional processes for obtaining magnesium-based materials require taking exhaustive precautions, so the powder metallurgy process is attractive as a new processing route for such materials.

In the present investigation, magnesium matrix composite materials reinforced with cast iron waste (CIW) were developed and analyzed, which were processed by powder metallurgy, modifying the CIW content, up to 15 wt.%. They were sintered at a temperature of 450°C, which was determined by thermal analysis and different permanence times were evaluated (30, 60 and 90 minutes). The morphology and chemical composition was then determined using SEM and EDX. In addition, samples were used for XRD determinations of the present phases (Mg, CaSiO<sub>3</sub> and MgO). The microstructure was analyzed by optical microscopy, where a decrease of grain size was observed with the increase of the reinforcement material (CIW). The density and porosity of the materials underwent a behavior contrary to the grain size, since these properties increased with the added reinforcement (CIW), reaching density values of 1.95 g/cm<sup>3</sup> and a porosity 3.76% for the system with 15 wt. % of CIW. The Vickers hardness (HV) and compressive strength increased significantly with the DF content, reaching values of 91-92 HV and 347-393 MPa respectively. Fractographic analysis was identified that both the Mg and the Mg/CIW compounds presented brittle fracture.

## **OBJETIVOS**

### **General:**

Desarrollar materiales compuestos con matriz de magnesio y reforzamiento cerámico de desecho de la fundición de hierro, por medio de la ruta de aleado mecánico y su caracterización química, física, mecánica y microestructural.

### **Específicos:**

- Acondicionar la materia prima para obtener polvos de magnesio con tamaño de partícula menores a 100  $\mu\text{m}$  mediante molienda mecánica, así como su caracterización mediante las técnicas de Espectroscopía de Absorción Atómica (AA), Espectroscopía de Emisión Atómica (EEA), Difracción de Rayos X (DRX), Análisis Térmico Diferencial (ATD) y Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).
- Desarrollar materiales compuestos a través del aleado mecánico de los polvos de magnesio con 5, 10 y 15% de refuerzo (desecho de fundición hierro, DF).
- Obtener productos consolidados de los materiales compuestos, mediante compactación axial y sinterización a una temperatura de 450°C con tiempos de permanencia de 30, 60 y 90 minutos.
- Evaluar las propiedades físicas (densidad y porosidad), mecánicas (dureza y resistencia a la compresión), estructurales (DRX) y microestructurales (MEB y MO) de los compuestos resultantes metal/cerámico.

## **PROBLEMÁTICA**

La contaminación ambiental es una de las grandes preocupaciones de la sociedad dado que en las últimas décadas ha ido creciendo exponencialmente, por lo que se ha convertido en una prioridad para diversos sectores, modificar sus productos y procesos para minimizar el problema ambiental. Tal es el caso de la industria automotriz, que busca nuevos materiales que sean más ligeros y resistentes, para reducir el peso de los vehículos y disminuir el consumo de combustibles fósiles, lo cual trae consigo menor generación de gases de efecto invernadero (GEI).

Se han desarrollado diferentes rutas para la fabricación de materiales compuestos de matriz metálica con reforzamiento cerámico, donde se involucra el metal en estado líquido y en estado semisólido; se identifican diversos problemas asociados al proceso tales como reacción entre las fases presentes, falta de homogeneidad del refuerzo cerámico en la fase metálica y la presencia de porosidad; lo cual trae consigo un efecto negativo en las propiedades mecánicas del material compuesto.



## JUSTIFICACIÓN

El interés por los materiales ligeros en diversos sectores donde destaca la industria automotriz ha ido en aumento, por lo que las aleaciones de magnesio y compuestos de matriz metálica de magnesio tienen gran potencial para cubrir la necesidad que se requiere, debido a la relación densidad/resistencia que presentan. Sin embargo, el proceso convencional para la obtención de materiales base magnesio es por fundición, por lo que es necesario someter dicho proceso en una atmósfera inerte dado que el magnesio en estado líquido, es altamente reactivo con el oxígeno provocando grandes reacciones exotérmicas que pueden llegar a ser explosivos. Además, la incorporación de materiales cerámicos de refuerzo es más compleja, ya que, en ocasiones, no se logra homogenizar bien por fundición, provocando defectos por formación de partículas aglomeradas (clústers) y la generación de porosidad, los cuales afectan negativamente la resistencia del material. Debido a lo anterior, la ciencia e ingeniería de materiales se ha dado a la tarea de utilizar nuevas rutas de procesamiento, siendo la metalurgia de polvos una de las opciones más viables, en ésta se busca reducir la porosidad del material compuesto y distribuir el refuerzo cerámico de una forma más homogénea en la matriz metálica.

En particular las aleaciones de magnesio resultan atractivas debido a su disposición para aceptar diferentes tipos de refuerzo que modifican positivamente la resistencia mecánica del material haciéndolo a la vez más ligero que los compuestos matriz metálica base aluminio.

En este trabajo se pretende reforzar una matriz de magnesio con partículas cerámicas de desecho de la fundición de hierro (DF) por la ruta de aleado mecánico, lo cual requiere de un análisis microestructural y de la evaluación de propiedades físicas y mecánicas.

## **HIPÓTESIS**

Uno de los principales problemas en el desarrollo de un material metal/cerámico, es la incorporación del refuerzo cerámico en la matriz metálica de forma homogénea afectando la resistencia del material debido a la presencia de fases indeseables provocada por el metal líquido con la fase cerámica y a la distribución no homogénea del refuerzo en la matriz metálica.

Por medio de la ruta de aleado mecánico se pretende obtener un material compuesto con una distribución homogénea de la fase cerámica, que incremente la dureza, la resistencia a la compresión y que sea ligero para una posible aplicación para piezas automotrices como el cárter.

Se espera que conforme se aumente la cantidad del material refuerzo (para este trabajo es un desecho de la fundición de hierro) aumente la resistencia mecánica a un valor superior de 270 MPa y a una dureza superior a 77 HV, además que cuente con una densidad inferior a 2.8 g/cm<sup>3</sup>.

## I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, diversas industrias como la automotriz requieren de materiales ligeros y resistentes, tal es el caso de materiales compuestos de matriz metálica reforzados con partículas cerámicas. En particular se ha incrementado la demanda del magnesio en el sector automotriz, aeroespacial y en aplicaciones biomédicas, debido a su relación de resistencia/densidad, pero debido a su módulo de elasticidad bajo entre otras propiedades, surge la necesidad de incorporar fases de refuerzo para incrementar sus propiedades mecánicas con cerámicos tales como  $Al_2O_3$ , SiC,  $B_4C$ , grafeno, etc. [1-4]

Así mismo, se ha encontrado que la ruta por aleado mecánico ayuda a mejorar las propiedades de los materiales compuestos metal/cerámico debido a que se reduce el tamaño de partícula y por la deformación se produce endurecimiento de la matriz metálica, lo cual se ve reflejado en una mayor dureza y resistencia al desgaste. [5] Para llevar a cabo el aleado mecánico es necesario determinar un tamaño de partícula adecuado, lo cual se da por diferentes parámetros de procesamiento, tales como: el tipo de molino, la relación carga/bolas, el medio de molienda (tamaño de las bolas), la velocidad del proceso, atmósfera de proceso, etc. [2,6-7]

Debido a lo anterior los compuestos de matriz metálica de magnesio son considerados como materiales de gran potencial para competir con los compuestos de matriz de aluminio debido a sus propiedades. Sin embargo, el costo de producción de los compuestos es mayor comparado con los compuestos base aluminio, por lo cual se requiere utilizar materias primas naturales o materiales de desecho industrial que deban ser adaptados como refuerzo para mejorar las propiedades de la matriz de magnesio, tal es el caso del empleo de ceniza volante como reforzante del magnesio. [6-8]

Con base en la necesidad de utilizar otros materiales, se propone para esta investigación la utilización de desecho industrial de la industria de la fundición de hierro como una alternativa viable para reforzar la matriz de magnesio, ya que está formada principalmente por  $\text{CaSiO}_3$ . Para este trabajo se utilizará el método de aleado mecánico por medio de un molino atricionador para producir compuestos de matriz de magnesio reforzados con cerámicos de desechos de la fundición, y determinar el papel que juega el desecho industrial sobre las características microestructurales y propiedades mecánicas y físicas de los compuestos resultantes.

## II. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Magnesio.

El químico escocés Joseph Black fue el primer científico en estar en contacto con el magnesio en el año 1775, ya que descubrió que el  $Mg(OH)_2$  contenía un nuevo elemento, sin embargo, se le dificultó aislar dicho elemento. Fue hasta el año de 1808 que el magnesio pudo ser aislado por el químico Sir Humphrey Davy, quien logró la descomposición del sulfato de magnesio ( $MgSO_4$ ) por electrólisis utilizando un cátodo de mercurio y una celda voltaica. El magnesio tenía limitadas aplicaciones estructurales y tenía mayor relevancia en productos químicos y pirotécnicos además de ser utilizado como desoxidación de los aceros gracias a su gran electronegatividad con los átomos de oxígeno. [9]

El magnesio es de los elementos más abundantes del planeta constituyendo el 2% de la totalidad de la corteza terrestre y no se encuentra en estado puro, sino combinado, es decir, enlazado químicamente con otros elementos. El agua marina contiene 0.13% de Mg lo que equivale a 1300 ppm, siendo el tercer mineral más abundante que se encuentra disuelto en el mar, así como también es posible encontrar el Mg en diversos minerales que se presentan en la tabla 2.1

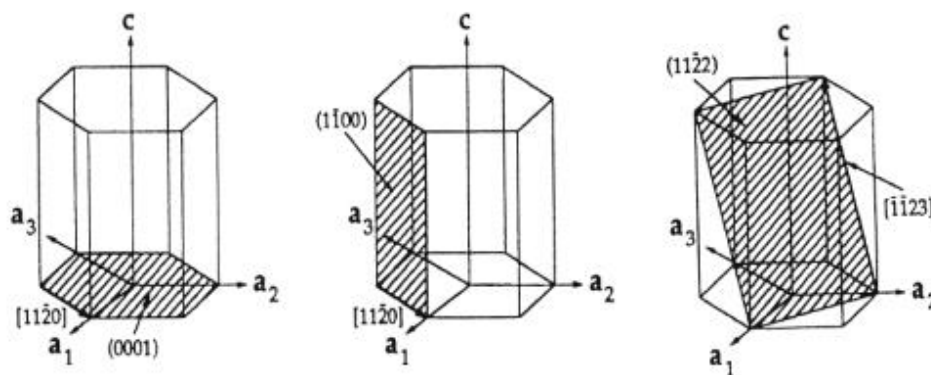
**Tabla 2.1** Principales minerales donde se encuentra el Mg

Nombre de mineral	Fórmula molecular	% de Mg
Carnalita	$KCl MgCl_2 \cdot 6H_2O$	8
Dolomita	$MgCO_3 \cdot CaCO_3$	13
Magnesita	$MgCO_3$	27

Existen dos formas diferentes para obtener el Mg, una de ellas es por el proceso de electrólisis, el cual primero se obtiene una cloruración del mineral y posteriormente se hace la electrolisis a 700°C del cloruro fundido. El otro método consta de hacer una reducción del mineral en hornos eléctricos con carburos de calcio. [10]



La estructura cristalina del magnesio es una estructura hexagonal compacta (HC), lo que es muy difícil de deformar a temperatura ambiente dado que solo tiene tres sistemas de deslizamiento como se muestra en la figura 2.1, por lo que su ductilidad es muy baja. Dado que la configuración electrónica del Mg es  $1s^2, 2s^2, 2p^6, 3s^2$  tiende a formar fácilmente soluciones sólidas con varios elementos en donde destaca el oxígeno, ya que sede dos electrones del último nivel y esto provoca una gran dificultad al momento de ser moldeado en caliente ya que la temperatura acelera la reacción con el oxígeno. [10]



**Figura 2.1** Celdas unitarias con planos y direcciones principales del Magnesio. [10]

Como se ha mencionado anteriormente, el Mg reacciona muy fácilmente con el oxígeno, formando MgO en una reacción muy exotérmica por la liberación de grandes cantidades de energía lo que puede llegar ser muy peligroso durante la fundición y el mecanizado ya que se corre el riesgo de alguna explosión. Cuando el magnesio se encuentra en forma de polvo, este puede ser aún más reactivo. [11]

### 2.1.1 Propiedades del Magnesio.

En la tabla 2.2 se muestran algunas propiedades que presenta el magnesio, y resalta su relativa baja densidad cuando se compara con el Al y el hierro de uso ingenieril, lo cual lo hace atractivo como matriz en materiales compuestos para reducir el peso de los componentes. [12]

**Tabla 2.2** Tabla comparativa de propiedades del Magnesio, Aluminio y Hierro. <sup>[13]</sup>

Propiedades	Mg	Al	Fe
Densidad, d (g/cm <sup>3</sup> ) (20°C)	1.7	2.7	7.9
Módulo de Young (GPa)	45	70	211
Limite elástico (MPa)	69 – 100	35 -170	120 – 150
Dureza Vickers (HV)	30 – 45	35 - 45	
Temperatura de fusión (°C)	650 °C	660°C	1535°C
Calor latente de fusión (KJ/Kg)	195	322-394	293
Coefficiente de expansión lineal (K <sup>-1</sup> )	26x10 <sup>-6</sup>	24 * 10 <sup>-6</sup>	12.1x10 <sup>-6</sup>
Conductividad eléctrica específica (S/m)	22.4x10 <sup>6</sup>	37.8 * 10 <sup>6</sup>	15.3x10 <sup>6</sup>

### 2.1.2 Aplicaciones del Magnesio.

La primera y segunda guerra mundial fueron responsables del incremento en la demanda y creación de nuevas aleaciones de magnesio, ya que dicho elemento fue utilizado mayormente en la industria nuclear y en la aviación militar. En la década de los 40's se consumieron 228,000 toneladas de magnesio, lo que trajo como consecuencia, la búsqueda de nuevos yacimientos de minerales de magnesio. <sup>[14]</sup>

En la actualidad, el magnesio continúa siendo muy demandante, sobre todo donde la densidad juega un papel importante y se requieran de buenas propiedades mecánicas. Es por eso que ha aumentado el interés de grandes empresas de diversos sectores como la electrónica, médica, aeroespacial y automotriz donde algunas de las propiedades con las que tiene que contar el producto son: alta resistencia mecánica, mayor durabilidad y poseer bajas densidades. <sup>[9]</sup>

#### 2.1.2.1 Sector aeroespacial y aeronáutico

Para transportar equipamiento necesario para el mantenimiento de satélites o para investigación espacial se necesita de una gran cantidad de energía para lograr salir del planeta, por lo que la industria aeroespacial requiere de componentes que cuenten con densidades lo más bajas posibles, por lo que hay una necesidad de disminuir el peso de componentes de aeronaves generando un ahorro considerable de energía y

por tanto se reducirían los costos de transportación, por lo que las aleaciones de magnesio son una opción para cumplir con ese objetivo. En cuanto a la industria aeronáutica militar, las aleaciones de magnesio tuvieron un mayor impacto en la primera y segunda guerra mundial, en donde las aeronaves militares de los portaviones tenían piezas de estas aleaciones para aligerar y optimizar el rendimiento de combustible. Hoy en día, diversas piezas de aviones y helicópteros, tanto militares como civiles, se fabrican de aleaciones de magnesio como por ejemplo la estructura de los parabrisas y cajas de engranajes. Así mismo, los materiales compuestos, han incrementado su participación en este campo, principalmente los de matriz metálica de aluminio, titanio o magnesio, debido a su ligereza y resistencia, y se encuentran en constante estudio para sustituir diversas piezas metálicas por materiales compuestos con densidades bajas. [15, 16, 17]

### **2.1.2.2 Electrónica**

El incremento en la demanda de los equipos electrónicos como cámaras fotográficas, cámaras digitales, teléfonos móviles, etc. ha producido un impacto en el empleo de magnesio ya que su baja densidad, conductividad térmica y su buena resistencia lo hace un material muy atractivo para los equipos electrónicos. [18]

### **2.1.2.3 Medicina**

Las aleaciones de magnesio han ganado gran interés en la industria médica ya que tienen un gran potencial para aplicaciones como prótesis, implantes, fijadores ortopédicos entre otras. Dado que el magnesio tiene relativa baja resistencia a la corrosión, puede ser considerado para ser un material absorbible dentro del organismo humano, dando funciones como prótesis temporales para soportar huesos fracturados hasta la recuperación total del hueso. Actualmente, la velocidad a la que se degrada los implantes se puede controlar aleando el magnesio con paladio para desplazar el potencial de corrosión y aumentar dicha propiedad. [15, 19, 20]

#### **2.1.2.4 Sector automotriz**

La industria automotriz constantemente se encuentra estudiando y desarrollando nuevos procesos y materiales para mejorar los vehículos. La reducción de peso en los vehículos es un factor importante para el ahorro de combustible y para mejorar la potencia que puede dar el motor. Para lograr este objetivo es necesario utilizar nuevas aleaciones ligeras, polímeros y materiales compuestos. <sup>[21]</sup>

Las aleaciones de magnesio gracias a su baja densidad y excelentes propiedades mecánicas han incrementado su demanda de la industria automotriz en ciertas piezas estructurales que aligeran el peso del vehículo generando una disminución en el consumo de combustible, ya que de acuerdo con G.Ballerini <sup>[13]</sup>, se ahorra hasta un 5% de combustible por cada 100kg de peso que se logra reducir del vehículo.

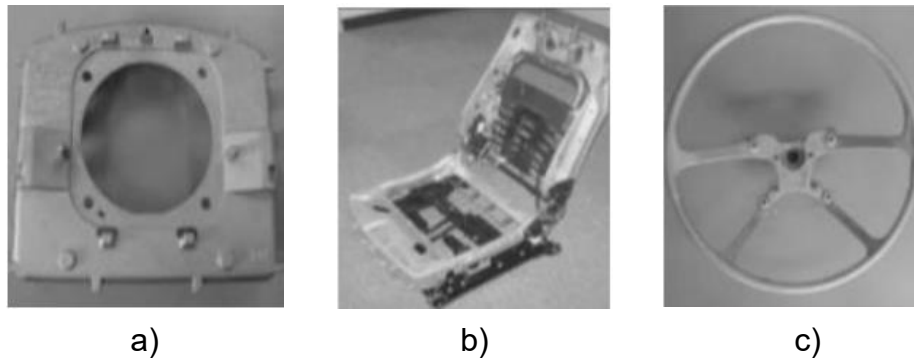
En la industria automotriz las empresas como Volkswagen y Audi han incorporado en algunos de sus vehículos componentes de magnesio como la caja de cambios que reduce hasta el 25% el peso de este componente con respecto a los fabricados de aluminio. <sup>[17]</sup>

El impacto del magnesio en la industria automotriz es tan grande, que compañías de gran renombre como Ford, General Motors y Volkswagen, han realizado diversas inversiones en empresas de magnesio en países como Australia e Israel. <sup>[18]</sup>

Algunas de las piezas de aleaciones de magnesio que se aplican en los vehículos son:

- Estructura de alojamiento de bolsas de aire
- Marco de asientos
- Esqueleto de volante
- Carcasa de caja de cambios
- Soporte de frenos de mano
- Rejillas de entrada de aire
- Paneles de la carrocería
- Carburadores
- Engranajes

En la figura 2.2 se pueden observar algunos componentes fabricados con aleaciones de magnesio.



**Figura 2.2.** Componentes representativos de aleaciones de magnesio, a) Estructura de alojamiento de bolsa de aire, b) marco de asiento, c) esqueleto de volante. [22]

### 2.1.3 Compuestos con matriz de magnesio.

El desarrollo de compuestos con matriz de magnesio ha logrado algunas mejoras en las propiedades mecánicas. Se han utilizado diversos refuerzos de morfología en forma de partículas (con un tamaño de partícula comúnmente de 100  $\mu\text{m}$ ), fibras cortas o fibras largas. Los materiales que más se utilizan como material de refuerzo son los cerámicos y en la tabla 2.3 se presentan los de mayor aplicación. [23]

**Tabla 2.3.** Cerámicos más utilizados como refuerzo en un material compuesto. [23]

Nombre	Fórmula molecular
Ceria	$\text{CeO}_2$
Carburo de titanio	$\text{TiC}$
Itria	$\text{Y}_2\text{O}_3$
Carburo de silicio	$\text{SiC}$
Alúmina	$\text{Al}_2\text{O}_3$



Algunas de las propiedades más destacables de los compuestos de matriz metálica de magnesio son:

- Alta resistencia al desgaste
- Alta resistencia mecánica
- Alta resistencia a la termofluencia
- Baja densidad

Las propiedades que se deseen obtener en un material compuesto de matriz de magnesio para cierta aplicación, dependerá de diversos factores como tipo, forma, distribución y tamaño del refuerzo. Las partículas desempeñan un rol importante en el comportamiento del magnesio, pues mejoran significativamente la resistencia mecánica y la dureza. [23]

La mayor desventaja de los materiales base magnesio es el costo, pues es alto en comparación con otros materiales como el aluminio. Sin embargo, una oportunidad para compensar dicho problema es la gran variedad de métodos por los que se pueden procesar los materiales compuestos de matriz de magnesio reforzados con partículas como la fundición agitada, metalurgia de polvos, etc. [24]

## **2.2 Aplicación en la industria automotriz: cárter**

El cárter es un componente que por lo general tiene un aspecto de cubeta como se muestra en la figura 2.3, que, a pesar de su simplicidad, cumple con funciones básicas pero de gran importancia: [25]

- Sirve de tapa protectora que cierra el bloque del motor protegiendo algunos componentes importantes como son el cigüeñal, bielas y pistones, de contaminación que pueda entrar del exterior.
- Sirve como depósito del aceite de motor
- Permite que la bomba de aceite pueda succionar la cantidad necesaria para lubricar el motor de manera eficiente.

Dado que el cárter es uno de los componentes de mayor tamaño que conforma el motor, se ha trabajado en la idea de disminuir su peso para conseguir una reducción en el peso total del vehículo y así obtener algunos beneficios en donde destaca, un mejor rendimiento en el consumo de combustible.

Las propiedades de los materiales como la densidad y la resistencia juegan un papel importante para la fabricación de dicha pieza automotriz. Inicialmente, el cárter se fabricaba de acero, sin embargo la gran desventaja de este material es su alta densidad, por lo que las aleaciones de aluminio surgieron para competir con el acero para ser el material electo, dado que la resistencia que aportan las aleaciones de aluminio es suficiente para cubrir la función del cárter; sin embargo su densidad, está muy por debajo que la del acero, siendo esta propiedad la más ventajosa y atractiva para la fabricación del cárter. [25-28]

En la tabla 2.4 se comparan las propiedades de más importancia de los materiales para el cárter.

Actualmente se ha ampliado el estudio de materiales más ligeros para reducir aún más el peso del cárter, por lo que las aleaciones de magnesio son muy atractivas para dicha pieza automotriz dado que el magnesio cuenta con una densidad ( $1.7 \text{ g/cm}^3$ ) inferior a la del aluminio.



**Figura 2.3** Imagen de un cárter de motor.

**Tabla 2.4** Comparación de las principales propiedades de los materiales aplicados para el cárter de motor. [27-28]

Propiedad	Unidad	Material	
		Acero AISI 304	Aluminio 7075
Densidad	g/cm <sup>3</sup>	7.9	2.8
Resistencia	MPa	540	276
Microdureza	HV	149	77

### 2.3 Desecho de la fundición de hierro (DF)

El desecho de la fundición de hierro es un subproducto cerámico que se obtiene a partir de diversas reacciones que ocurren dentro de un horno metalúrgico en la fusión de hierro. El desecho del horno de cubilote está principalmente constituido por CaSiO<sub>3</sub> ocupando el 84.7% en peso de su composición química como se muestra en la tabla 2.5. [29,30]

**Tabla 2.5.** Composición química de la escoria.

Compuesto	CaSiO <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	TiO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	ZrO <sub>2</sub>
%	84.7	9.03	0.93	0.81	0.77	0.46	0.32	0.32	0.19	0.10

En el año 2002 se produjo alrededor de 81.5 millones de toneladas a nivel mundial generando 23.5 millones de toneladas de escoria metalúrgica. Actualmente, solo en Australia se estima una producción de 900 millones de toneladas generando cantidades estratosféricas de escoria, lo que resulta en un aumento en el costo de transportación y almacenaje para la industria de la fundición, y además, generando un gran problema de contaminación a nivel mundial. [29,30]

Dado a este gran problema de contaminación, se han realizado estudios para dar uso al desecho metalúrgico. Dado que dicho desecho contiene diversos cerámico, es posible elaborar espumas cerámicas que pueden tener diferentes aplicaciones tecnológicos como filtros, membranas, sustratos catalíticos, aislantes térmico, así como también puede utilizarse como refuerzo para materiales compuestos. [29,30]

### 2.3.1 Wollastonita (CaSiO<sub>3</sub>)

La wollastonita es un silicato de calcio de estructura triclinica el cual presenta dos polimorfos; el polimorfo de alta temperatura se conoce como pseudowollastonita ( $\alpha$ -CaSiO<sub>3</sub>), mientras que el polimorfo de baja temperatura se llama parawollastonita ( $\beta$ -CaSiO<sub>3</sub>). [31]

La wollastonita incrementó su empleo en la cerámica ya que proporciona uniformidad de dimensiones, baja contracción y buena resistencia. Algunas características de la wollastonita se muestran en la tabla 2.6. Las principales aplicaciones de la wollastonita son en la cerámica, metalurgia y pinturas. [31-32]

**Tabla 2.6.** Características de la wollastonita [31]

Composición	48.3% CaO; 51.7% SiO <sub>2</sub>
Masa molecular	116 g/mol
Densidad	2.8-2.9 g/cm <sup>3</sup>
Punto de fusión	1544°C
Solubilidad en H <sub>2</sub> O	0.0095 g/cm <sup>3</sup> a 20°C
Índice de refracción	1.616-1.631
Dureza (Mohs)	4-5

### 2.4 Materiales Compuestos.

Cuando dos o más materiales con diferentes propiedades se combinan, forman una nueva clasificación de material denominado, material compuesto. Los materiales compuestos, están conformados principalmente por dos fases, la fase matriz y la fase dispersa denominada refuerzo. Estas dos fases se encuentran separadas por una interfase de la cual dependen las propiedades resultantes de esta combinación, si la interfase no es lo suficientemente fuerte, no será adecuada la transferencia de carga de la matriz al refuerzo y podría ocurrir una falla mecánica. Un factor importante que determina las propiedades finales, son las características de los constituyentes, sus cantidades relativas, la geometría del refuerzo y distribución en la matriz. [33]

Los materiales de refuerzo se pueden clasificar en:

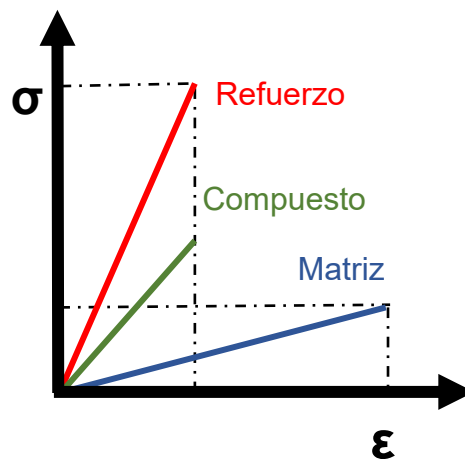
- Fibras largas o continuas
- Fibras cortas o discontinuas
- Partículas o Particulados

Otra forma de clasificación es dependiendo de la naturaleza de los constituyentes, ya que pueden poseer distinta matriz ya sea orgánica (polímeros), metálica (aleaciones de aluminio, titanio y magnesio) o cerámica. [34]

### 2.4.1 Propiedades de materiales compuestos

Dado a que los materiales compuestos están conformado por dos materiales distintos, las propiedades resultantes serán diferentes a las propiedades que tienen los constituyentes por separado, ya que ocurre una fusión de las propiedades de ambos materiales como se muestra en la figura 2.4.

Por ejemplo, los refuerzos cerámicos en forma de fibras cortas de alto módulo de elasticidad, que se agregan a matrices metálicas, incrementan la rigidez del compuesto comparación del material metálico por separado. El contenido de refuerzo sobre la matriz también es un factor que contribuye en las propiedades finales junto con el método de producción del material compuesto. [35]



**Figura 2.4** Gráfica esfuerzo-deformación para la matriz, refuerzo y material compuesto. [35]

Los materiales compuestos normalmente se producen para lograr combinaciones inusuales y mejorar las propiedades como resistencia a la corrosión, resistencia mecánica, dureza, entre otras propiedades que un material cerámico, metálico o polimérico no podrían dar por separado. [35]

#### **2.4.2 Métodos de obtención.**

Existen diversos métodos para obtener materiales compuestos de matriz metálica, uno de estos procesos en estado líquido, el cual consiste en fabricar una preforma del material cerámico, para luego ser colocada en una matriz y después se adiciona el metal líquido para inmediatamente después aplicársele presión para que se infiltre en la preforma. [36]

Otro método de obtención es en estado semisólido, el cual implica reforzar con partículas una matriz metálica parcialmente fundida o semisólida, mediante la acción de mezclado, favoreciendo de esta manera la mojabilidad y contacto entre la matriz y las partículas de refuerzo. [36]

La metalurgia de polvos, es un método que contempla la mezcla en estado sólido de la matriz metálica y el refuerzo en forma de polvos, seguido de la compactación de los polvos resultantes y la consolidación de la pieza final que normalmente se da mediante un sinterizado. En este método se encuentra la molienda mecánica que consiste en disminuir el tamaño de partícula mediante un molino de alta energía con impactos de un medio molidor como pueden ser bolas de acero que se encuentran en constante colisión y el aleado mecánico que se refiere a la mezcla de diferentes polvos metálicos en frío mediante molienda de alta energía para formar una aleación homogénea. La gran ventaja que presenta este método de procesamiento, es que no requiere de altas temperaturas para la preparación de los materiales compuestos, ya se trabaja en estado sólido y no se requiere de temperaturas de fusión. Un factor importante en este proceso es la distribución del refuerzo y la matriz, ya que debe estar distribuidas lo más homogéneamente posible en la mezcla. [36]

### **2.4.3 Materiales compuestos de matriz metálica.**

Los materiales compuestos de matriz metálica tienen diversas funciones en donde destacan las aplicaciones estructurales en la industria automotriz o aeroespacial en donde se requiere de materiales resistentes y ligeros (Mg, Al, Ti). [37]

En las últimas décadas, se han hecho estudios para el procesamiento de nuevos materiales compuestos matriz metálica por las propiedades que estas ofrecen. En un material compuesto se puede modificar algunas propiedades como el módulo de Young, resistencia a la compresión, resistencia al desgaste, resistencia térmica y a la fatiga entre otras, dependiendo de la matriz y tipo de refuerzo que se utiliza, siempre teniendo en cuenta la aplicación que se le desea dar al material.

El concepto de los materiales compuestos con matriz metálica está basado en usar las mejores características de dos diferentes materiales, como la ductilidad y dureza de las matrices metálicas y el alto módulo y resistencia de los reforzantes cerámicos. Las propiedades finales del material compuesto, dependerán de las propiedades de sus constituyentes y de su interfase. [34]

En la tabla 2.7 se pueden observar las características físicas, térmicas, eléctricas y mecánicas de 3 matrices metálicas comúnmente usadas para formar compuestos.

**Tabla 2.7** Propiedades de algunos materiales metálicos empleados como matriz en materiales compuestos. <sup>[36]</sup>

	Al	Mg	Ti		
No atómico	13	12	22		
Estructura cristalina	FCC	HCP	HCP → 882°C BCC		
Propiedades físicas					
Punto de ebullición (°C)	2467	1090	3287		
Punto de fusión (°C)	660	650	1660		
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	2.7	1.7	4.5		
Propiedades eléctricas					
Conductividad eléctrica (%IACS)	64	38	4		
Resistividad eléctrica (μΩ cm)	2.67	4.2	42		
Propiedades térmicas					
Calor latente de fusión (J/g)	388	362	365		
Calor específico a 25°C (J/K kg)	900	1020	523		
Conductividad térmica (0-100°C)	237	156	21.9		
Propiedades mecánicas					
Tipo de material	Blando	Duro	Blando	Duro	Recocido
Dureza (HV)	21	35-48	30-35	35-45	60
Coeficiente de Poisson	0.345		0.291		0.361
Resistencia a la tracción (MPa)	50-90	130-195	185	232	230-460
Módulo elástico (GPa)	70.6		44.7		120.2



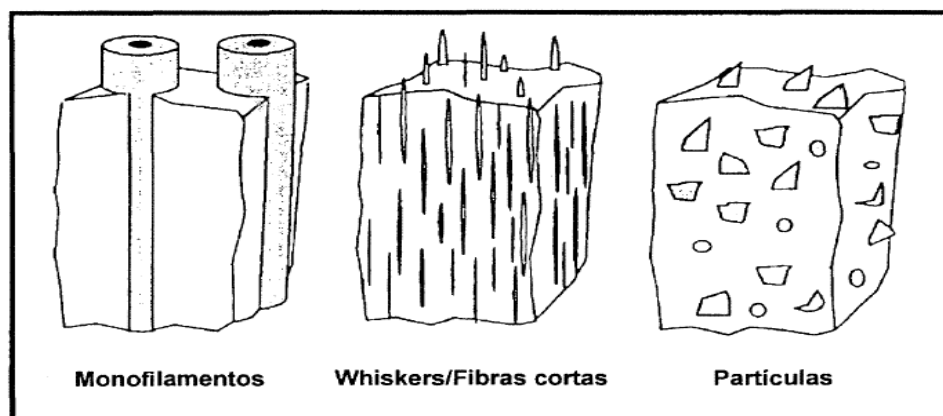
#### 2.4.4 Refuerzos.

Los materiales reforzantes o refuerzos más utilizados en la fabricación de materiales compuestos de matriz de magnesio son de naturaleza cerámica debido a que es posible disminuir el tamaño de las partículas mediante el aleado mecánico, aleando la matriz metálica con las partículas del cerámico, elevando la resistencia mecánica y la dureza. [37]

Los refuerzos en un material compuesto, tienen como objetivo diversas funciones tales como:

- Elevar las propiedades mecánicas de la matriz como la resistencia a la compresión, dureza, etc.
- Resistir las cargas de tensión o compresión que pueda estar sometido el material compuesto
- Reducir las posibles fallas que puedan generarse con el ascenso de la temperatura en caso de que el material este sometido a ésta.
- Contener el desarrollo y propagación de posibles grietas en el material compuesto.

Los refuerzos se clasifican en tres diferentes categorías; fibras largas o continuas (en algunos casos se les conoce también como monofilamentos), fibras cortas o discontinuas (también conocidas como whiskers), y partículas o particulados. En la figura 2.5 se muestra un esquema de las diferentes clasificaciones de los refuerzos.



**Figura 2.5.** Clasificación de las diferentes morfologías que presentan los refuerzo en un material compuesto. [37]

## **2.5 Molienda mecánica**

La molienda mecánica es un proceso que se efectúa en equipos conocidos como molinos de bolas de alta energía, en el cual se deposita polvo de composición uniforme, como lo son metales puros, intermetálicos o polvos pre-aleados y son molidos con continuos impactos de alta energía por el medio de molienda, donde las partículas son fracturadas lo que da como resultado la reducción del tamaño de las partículas.

La molienda mecánica puede reducir el tamaño de partícula o de grano e incrementar el área superficial si se muelen materiales intermetálicos o metales puros. Una consecuencia de someter el polvo a este proceso es la modificación de su morfología, lo que da lugar a soldaduras frías y formación de nuevas partículas por la unión de los polvos iniciales. [38, 39]

## **2.6 Aleado mecánico.**

El aleado mecánico es una técnica metalúrgica en la cual se procesan polvos metálicos en frío mediante molienda de alta energía, en donde ocurre deformación, fractura y soldadura de los polvos. Con esta técnica es posible obtener partículas menores a 10 $\mu$ m. A lo largo del proceso, los polvos metálicos de diferentes elementos son mezclados con la finalidad de formar una aleación homogénea, la cual va a depender de las variables de procesamiento. Mediante esta técnica es posible procesar una gran variedad de materiales con fases metaestables y de sistema fuera de equilibrio. [39,40]

### **2.6.1 Fundamentos del aleado mecánico.**

El aleado mecánico es un proceso en el cual se realizan mezclas de polvos (de diferentes metales y cerámicos), se someten a continuos impactos de alta energía del medio de molienda, causando con esto una deformación y ruptura de las partículas reduciendo el tamaño de partícula. Por ejemplo, si dos metales distintos son molidos juntos para formar una solución sólida, intermetálica o amorfa, el proceso es referido al aleado mecánico, además de que implica la transferencia de masa para obtener una aleación homogénea. [38,39]

### 2.6.2 Proceso de aleado mecánico

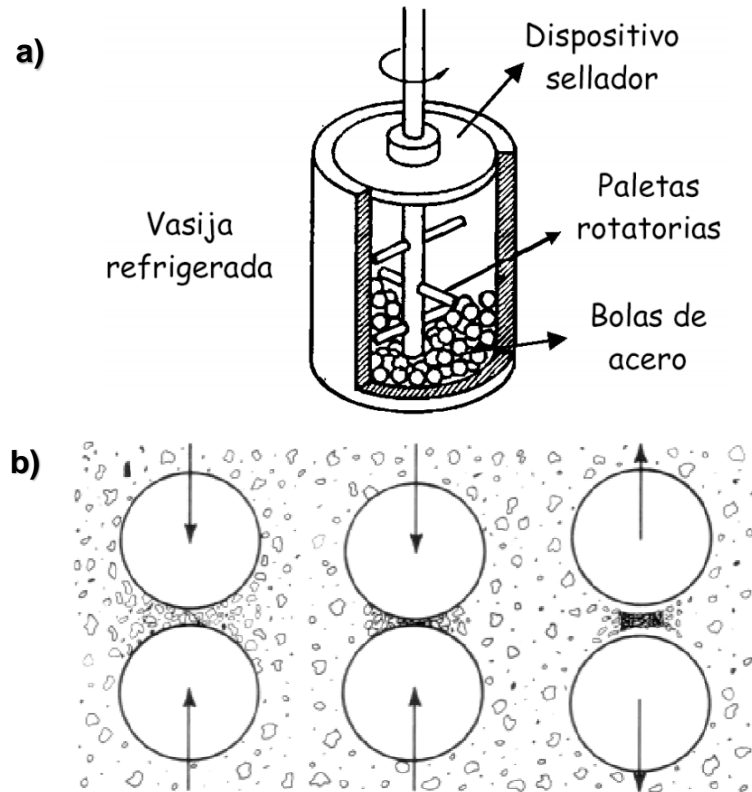
Para dar inicio con el proceso de aleado mecánico, es necesario seleccionar los polvos que se van a mezclar, además de definir la proporción con la que se va a trabajar, para así obtener la carga de polvo que se va a introducir en el recipiente junto con el medio de molienda que por lo general son bolas de acero recubiertas con cromo duro. Se prosigue con el aleado de polvos dentro del molino a una velocidad determinada hasta lograr que todas las partículas sean homogéneas.

Este proceso se divide en 5 etapas principales. [39,41]

- Etapa 1: Las partículas de polvo son aplastadas por el medio de molienda en donde los materiales dúctiles son deformados y los frágiles se fracturan.
- Etapa 2: Al momento de seguir siendo aplastadas las partículas de polvo unas con otras, éstas se van soldando unas con otras.
- Etapa 3: Las partículas van aumentando su tamaño por la soldadura entre ellas, formando superficies laminares y partículas equiaxiales.
- Etapa 4: Al momento de que las partículas formadas se vuelven a fracturar y a soldar con otras se incrementa la dureza.
- Etapa 5: En esta etapa se homogeneiza la estructura interna del polvo.

Los materiales compuestos obtenidos son compactados y sinterizados para poder evaluar sus propiedades mecánicas. Entonces los componentes importantes del aleado mecánico son los materiales iniciales, el molino y las variables de proceso.

La figura 2.6 a), muestra una representación de los componentes de un molino atricionador de bolas, utilizado para realizar el aleado mecánico y en la figura 2.6 b), se puede observar el efecto que tienen las bolas sobre el material dentro del molino.



**Figura 2.6** a) Molino atricionador de bolas y b). Efecto de las bolas sobre el polvo durante el aleado mecánico.

### 2.6.3 Materiales de inicio.

Los materiales de inicio utilizados para el aleado mecánico tienen tamaño de partícula del orden de micrómetros, donde se recomienda trabajar con tamaños  $<100 \mu\text{m}$ , ya que, entre menor tamaño de partícula, existe una mayor área superficial de contacto entre las partículas, favoreciendo la síntesis de la nueva aleación.

El contenido de oxígeno en los metales puros oscila entre 0.05 y 2% en peso, por lo que para el estudio de las transformaciones de fases en los polvos son necesarios polvos de alta pureza bajo una atmósfera inerte, que evita un mayor contenido de oxígeno, ya que este tiende a reaccionar rápidamente con cualquier material a altas temperaturas, formando óxidos que pueden ser perjudiciales para la aleación. <sup>[38,39]</sup>

## **2.6.4 Parámetros de Proceso.**

El aleado mecánico involucra diferentes variables durante su proceso, esto es para lograr una fase deseada o una microestructura en especial. Algunos de los parámetros más importantes que se pueden modificar para obtener distinto efecto en el polvo final se describen a continuación.

### **2.6.4.1 Tipo de molinos.**

Existe una gran variedad de equipos para moler, como lo son los trituradores, molinos, agitadores y los molinos convencionales de bolas que son usados en el proceso de molienda mecánica. Estos molinos hacen que las partículas del polvo tengan una deformación plástica o que inicien la fractura con una energía mínima. La diferencia entre los diversos tipos de molinos radica en la energía suministrada al polvo. [39,42]

### **2.6.4.2 Velocidad de molienda.**

Este parámetro describe la velocidad con la que el molino realiza la tarea de mover el medio de molienda para moler el polvo introducido; dependiendo del tipo de molino la velocidad óptima será diferente, por ejemplo en un molino convencional, si se sobrepasa la velocidad crítica con la que trabaja el molino, el medio de molienda (bolas) se quedará pegado a las paredes del recipiente por la acción de la fuerza centrífuga y bajará considerablemente su eficiencia de molienda, ya que este molino trabaja por impactos de las bolas al caer por gravedad y golpear al material.

En molinos como los SPEX que corresponden a molinos vibratorios en el cuál su movimiento es en forma de “8”, al aumentar la velocidad de molienda los impactos del medio de molienda con el material se incrementarían, y como consecuencia incrementa la temperatura en el recipiente y por consiguiente en el polvo que se desea moler. [39, 40,42, 44]

#### **2.6.4.3 Tiempo de molienda.**

Este parámetro es de suma importancia en el aleado mecánico, normalmente se escoge para poder lograr una estabilidad entre la fractura y la soldadura en frío de las partículas que se están moliendo. El tiempo depende del tipo de molino usado y la velocidad de molienda aplicada, la relación carga–bola y la temperatura que se alcanza en la molienda. Cabe mencionar que el tiempo de molienda es diferente para cada tipo de sistema. [39, 40,42, 43]

#### **2.6.4.4 Relación de carga.**

La relación de carga da referencia a la relación entre el peso de las bolas de molienda y el peso de polvo que se va a moler, este parámetro puede ir variando en función de lo que se busca obtener.

Esta relación implica un gran impacto en el tiempo que se necesita para formar una fase deseada en el polvo que es molido. Esto es debido a que en una relación de carga alta, el número de impactos por unidad de tiempo entre las bolas de molienda incrementará, y por lo tanto, aumentará la energía que se transfiere de las bolas al polvo, aleando el material de manera más rápida. Otra consecuencia de elevar la relación es el incremento de la temperatura, lo que podría generar cambios en la constitución del polvo. [39, 42,43]

#### **2.6.4.5 Agentes de control de proceso.**

Los agentes de control de proceso (también llamados lubricantes o surfactantes) son adicionados a los polvos durante la molienda para reducir el efecto de la soldadura en frío que se produce, esto es consiguiendo un balance crítico entre la fractura y la soldadura en frío para mejorar la eficiencia del proceso. [43, 44]

#### **2.6.4.6 Temperatura de molienda.**

Este parámetro afecta de manera considerable la morfología final del polvo, ya que la temperatura alcanzada al momento de ser molido juega un papel importante pudiéndose formar fases intermetálicas, nanoestructurales e incluso llegar hasta a la amorfización del mismo. [43,44]

#### **2.6.4.7 Mecanismos del aleado mecánico**

Durante la molienda, las partículas de polvo son impactadas por el medio de molienda, provocando con esto que se aplanen, se suelden en frío para luego fracturarse y volverse a soldar. El efecto de estas colisiones es deformar plásticamente las partículas de polvo, lo que conduce al endurecimiento por deformación y a la fractura.

Las nuevas superficies de los polvos favorecen la soldadura con otra partícula similar, incrementando con esto el tamaño de partícula. En sistemas en donde las partículas son suaves, (sistema dúctil-dúctil), la probabilidad de que las partículas se suelden es alta en relación con un sistema frágil-frágil. Al someter a molienda dos especies diferentes, el producto final involucrará la formación de una o más fases entre ellos. Por lo tanto, la reactividad está influenciada por el área de contacto inicial y la difusión de las especies a través de las fases producidas.

Debido al constante impacto de las bolas de molienda, la estructura de las partículas es refinada, pero también se introducen grandes deformaciones que se manifiestan en defectos cristalinos como dislocaciones, vacancias, defectos de apilamiento e incremento del número de fronteras de grano. [38,43, 44]

El aleado mecánico permite obtener materiales que difícilmente se podrían producir por otros métodos convencionales como fusión, dopaje, etc., debido a problemas entre los componentes. Con base a lo anterior, es posible la incorporación de partículas cerámicas dentro de cada partícula metálica, ya que mientras la matriz metálica se deforma, se endurece, se fractura y las partículas metálicas van reduciendo su tamaño al mismo tiempo que el material cerámico se va introduciendo dentro de la matriz metálica. [38,43, 44]

## **2.7 Técnicas de Caracterización**

Las diversas técnicas de análisis son métodos fundamentales para el entendimiento de los materiales en diferentes campos tales como la mineralogía, la geología, la física, la química, la biología y en las ciencias de los materiales. A continuación se presenten las características de algunas técnicas que son utilizadas para la caracterización de los materiales.

### **2.7.1 Espectroscopía de Absorción Atómica (AA)**

Esta técnica de caracterización, consiste en medir la energía de radiación absorbida por átomos de un elemento (analito) que se encuentran en estado basal a una determinada longitud de onda. Al aumentar el número de átomos del elemento presente en la muestra dentro del rango de medición, se incrementará la radiación absorbida por los átomos y se podrá cuantificar el analito. Esta técnica es muy utilizada para el análisis de diversos materiales como muestras geológicas, petróleo, aguas y metales. <sup>[45]</sup>

### **2.7.2 Espectroscopía de Emisión Atómica (EEA)**

En esta técnica de caracterización, se excitan a los átomos del elemento por medio de energía que usualmente es suministrada por láser, una flama, o por plasma, provocando que los átomos pasen de un estado basal a un estado energético mayor momentáneamente. Pasado el tiempo de excitación, los átomos se relajan volviendo a su estado inicial (estado basal), ocasionando, una liberación de energía en forma de radiación ultravioleta. Esta técnica se utiliza normalmente para determinar la concentración de un elemento metálico en una muestra. <sup>[45]</sup>



### 2.7.3 Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

En el microscopio electrónico de barrido, un cátodo de tungsteno, emite un haz de electrones que viajan a través de una columna que se encuentra en una atmósfera al vacío. El haz de electrones llega a unas lentes electromagnéticas (condensadora y objetivo; con un diámetro inicial estimado de entre 25.000-50.000 nm hasta un diámetro final de aproximadamente 10 nm) que hacen incidirlos sobre la muestra haciendo un barrido (movimiento en zig-zag). Un sistema de bobinas es la encargada de realizar dicho movimiento del haz y se encuentran en la columna del equipo posterior a las lentes objetivo. Al interactuar el haz de electrones con la superficie de la muestra que se encuentra en estudio, se producirán electrones que serán captados por un detector, creando una imagen de la superficie de la muestra, concediendo información topográfica, morfológica y química. [46, 47]

Se pueden detectar diversas señales que son captadas por los detectores, las cuales se describirán a continuación:

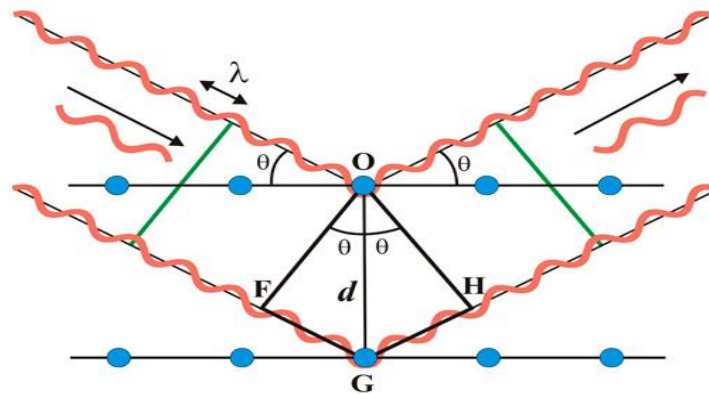
- **Electrones secundarios:** cuando un electrón proveniente del haz de electrones emitido del cátodo de tungsteno, pasa cerca del núcleo de un átomo de la muestra, proporcionará energía para que un electrón de dicho átomo salga emitido hacia afuera y sea identificado por el detector. Mediante esta señal, es posible ver morfología de la muestra.
- **Electrones retrodispersados:** cuando un electrón proveniente del haz de electrones emitido del cátodo de tungsteno, se impacta con el núcleo de un átomo de la muestra, el electrón será rechazado fuera de la muestra. La intensidad de la repulsión será diferente de acuerdo al número atómico de la muestra. Por tal motivo, esta señal permite identificar composición química elemental que hay en la superficie de la muestra.
- **Rayos X:** Los átomos de la muestra son excitados por los electrones del haz electrónico, provocando la emisión de rayos x, a cierta intensidad de acuerdo a los elementos que se encuentren presentes en la muestra.

#### 2.7.4 Difracción de Rayos X (DRX)

Los rayos X se encuentran en una longitud de onda de 0.01-10 nm. Sin embargo las longitudes de onda que presentan los rayos X en difracción se encuentran en el rango de 0.5 y 2.5 Å. La difracción se produce cuando los rayos x interactúan con la estructura cristalina de la muestra.

La ley de Bragg proporciona una manera relativamente sencilla de comprender las condiciones para las cuales se produce este fenómeno de difracción, donde los rayos X que inciden a un cierto ángulo sobre una red cristalina son difractados. Este hecho implica un fenómeno de los rayos X, que es máxima para ciertas condiciones.

En la figura 2.7 se puede apreciar un esquema de la difracción de rayos X en sólidos cristalinos. [48]



**Figura 2.7** Esquema de la difracción de rayos X. [37]

Así, la ley de Bragg establece dicha condición, que es función de la distancia entre familias de planos atómicos ( $hkl$ ), a través de la ecuación 2.1.

$$n\lambda = 2d_{hkl} \sin \theta_{hkl} \quad 2.1$$

Donde  $n$  es orden de difracción que toma números enteros,  $\lambda$  es la longitud de onda de los rayos X,  $d_{hkl}$  es la distancia interplanar y  $\theta_{hkl}$  es el ángulo que forman los rayos incidentes con los planos atómicos. [48]

### 2.7.4.1 Ecuación Scherrer

La ecuación de Scherrer es aplicada para estimar el tamaño promedio de partícula, normalmente para partículas de escala nanométricas, ya que para partículas a mayor escala, se pierde precisión en el cálculo. Scherrer identificó que la anchura del pico de difracción tiene relación con el tamaño de partícula de la muestra, de acuerdo a la ecuación 2.2:

$$\beta = K \lambda / L \cos \theta \quad 2.2$$

Donde  $\beta$  es la anchura a la mitad de la altura de la reflexión, K es la constante de Scherrer que depende de la forma del cristalito,  $\lambda$  es la longitud de onda, L es el tamaño aparente de la partícula que corresponde a la altura de la reflexión promediada en volumen y  $\theta$  es el ángulo de Bragg. <sup>[49]</sup>

### 2.7.5 Análisis Térmico

El análisis térmico, se basa en la medición de alguna propiedad en función de la temperatura. Este tipo de análisis abarca diversas técnicas de caracterización. De acuerdo con la propiedad que se desee evaluar, será el método térmico que se utilizará, por ejemplo, el análisis termogravimétrico indicará si hay ganancia o pérdida de peso conforme aumenta la temperatura mientras que el análisis térmico diferencial mostrará si un cambio físico o si una reacción es endotérmica o exotérmica. <sup>[50]</sup> En la tabla 2.8 se mencionan los principales métodos térmicos que existen.

**Tabla 2.8** Principales métodos de análisis térmico. <sup>[51]</sup>

Técnica	Abreviación Español / Ingles	Propiedad
Análisis Termogravimétrico	ATG / TGA	Masa
Análisis Térmico Diferencial	ATD / DTA	Temperatura
Calorimetría Diferencial de Barrido	CDB / DSC	Entalpía
Análisis Termomecánico	TMA	Propiedades mecánicas
Termomagnetometría	TM	Propiedades magnéticas
Termoelectrometría		Propiedades eléctricas

### **2.7.5.1 Análisis Termogravimétrico (ATG)**

El ATG, es una técnica que registra la masa de una muestra de manera continua en función de la temperatura. Cuando se encuentra en función de la temperatura, se conoce como experimento dinámico y cuando está en función al tiempo, la temperatura es constante y se le llama experimento isoterma. [51, 52].

El peso o porcentaje en peso de la muestra analizada en función de la temperatura se representa en una gráfica llamada termograma o curva de descomposición térmica. Este método térmico de análisis se encuentra limitado por las reacciones de oxidación y descomposición, así como también los procesos de sublimación, desorción y vaporación. [51, 52].

### **2.7.5.2 Análisis Térmico Diferencial (ATD)**

El ATD, es una técnica térmica que se utiliza para medir las transiciones endotérmicas y exotérmicas en función a la temperatura, esto ayuda a conocer a que temperatura ocurren reacciones químicas o cambio de fases.

Cuando ocurre un aumento en la entalpía del sistema, el pico del termograma apuntará hacia abajo resultado de un proceso endotérmico (normalmente por un cambio de fase), mientras que, si el pico apunta hacia arriba, el proceso será exotérmico, dado que la entalpía del sistema disminuirá (normalmente por una reacción de oxidación o degradación). [51, 52]

### **2.7.6 Distribución de tamaño de partícula por difracción láser (DTP).**

Mediante DTP es posible medir partículas de 50 nanómetros a 3 milímetros. La teoría en la difracción láser es que una partícula dispersará la luz en un ángulo determinado por el tamaño de esa partícula, es decir, si una partícula es muy pequeña, la luz se dispersará en ángulos grandes, pero si la partícula es muy grande, la luz se dispersará en ángulos pequeños. [53]

Un conjunto de partículas, producirá un cierto patrón de luz dispersa por la intensidad, y el ángulo se puede transformar en un resultado de distribución de tamaño de partícula. [53]

### **2.7.7 Microscopía Óptica (MO)**

La microscopía óptica ayuda a estudiar microscópicamente algunas características microestructurales de los materiales, ya que es posible determinar el tamaño de grano, la distribución y forma de las fases, ya que estas características físicas tienen un gran impacto sobre las propiedades mecánicas, además de deducir en ocasiones que tratamiento térmico pudo haberse sometido el objeto sometido a estudio. [54, 55] Para analizar un material por medio de microscopía óptica, se requiere de una preparación previa la cual se le conoce como metalografía en caso de que la muestra sea metálica o materialografía en caso de que sea de otra naturaleza. La metalografía o materialografía en general consiste en obtener una superficie plana y pulida de la muestra mediante lijas abrasivas de carburo de silicio de diferente granulometría para posteriormente darle un pulido fino con un paño que normalmente se le añade un abrasivo como  $Al_2O_3$ , pasta de diamante o sílice coloidal. Una vez terminado el pulido, se obtiene un acabado espejo donde la muestra puede observarse directamente en el microscopio o puede someterse a un ataque químico para hacer visible las características microestructurales como tamaño de grano, distribución y forma de las fases del material, así como también imperfecciones que pueden modificar sus propiedades mecánicas. [56]

Normalmente los reactivos que se utilizan para ataque químico están compuestos de ácidos inorgánicos o se encuentran disueltos en disolventes adecuados como agua o alcohol, de acuerdo con lo que se busca revelar, es el reactivo que se utilizará para la materialografía. [56]

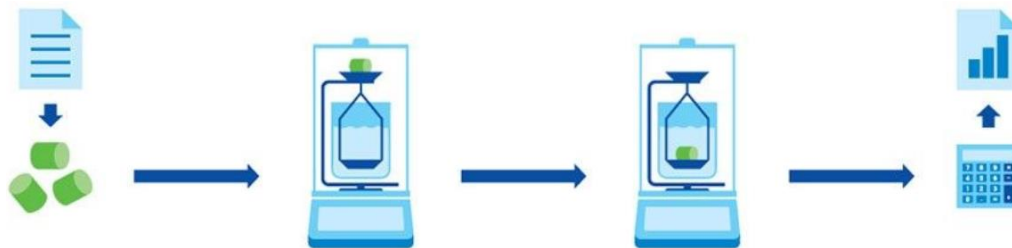
## 2.8 Ensayos físicos y mecánicos

### 2.8.1 Medición de densidad

La densidad es la relación de la masa de un producto con su volumen. La medición de la densidad es un factor importante ya que una variación en la densidad de la materia prima para algún producto final podría traer consecuencias perjudiciales en la calidad, ya que, con este método, es posible confirmar si la materia prima no ha sido alterada con otras sustancias. Otro factor de suma importancia hoy en día es la búsqueda de nuevos materiales que sean ligeros para aplicaciones estructurales por lo que la densidad es una propiedad que juega un papel muy importante para dicho objetivo. [57]

Existen múltiples métodos para medir la densidad las cuales son: el principio del desplazamiento, el método por picnometría y la técnica de empuje de Arquímedes, siendo esta última la apropiada para medición en sólidos. [57]

En la figura 2.8 se puede observar un esquema de la metodología para la medición de la densidad utilizando la técnica de empuje de Arquímedes, la cual consta en pesar el sólido en el aire y posteriormente en el líquido auxiliar con una densidad conocida.



**Figura 2.8** Metodología para la medición de la densidad utilizando la técnica de empuje de Arquímedes.

### 2.8.1.1 Principio de Arquímedes

Uno de los descubrimientos más destacables que brindó la cultura griega y continúa siendo de gran aporte para el estudio de los materiales, es el principio de Arquímedes. Arquímedes era un físico – matemático, quien estudió el empuje de manera vertical hacia la superficie ejercido por fluidos y determinó; “todo cuerpo sumergido dentro de un fluido experimenta una fuerza ascendente llamada empuje, equivalente al peso del fluido desalojado por el cuerpo”. [58] La densidad del sólido puede calcularse con la ecuación 2.3:

$$\rho = \frac{m_A}{m_A - m_B} (\rho_l - \rho_a) + \rho_a \quad 2.3$$

Donde  $\rho$  es la densidad de la muestra,  $m_A$  es la masa de la muestra en el aire,  $m_B$  es la masa de la muestra que entró al líquido,  $\rho_l$  es la densidad del líquido y  $\rho_a$  es la densidad del aire. [58]

### 2.8.2 Medición de porosidad.

La porosidad como propiedad física de los materiales indica el porcentaje de huecos o espacios vacíos que están presentes en el material. Pueden existir dos clases de porosidad, porosidad abierta y porosidad cerrada. Se conoce como porosidad abierta a las cavidades o poros que se encuentran conectados entre sí, mientras que la porosidad cerrada, es lo contrario a la abierta, no hay accesibilidad entre poros.

Para determinar la porosidad total, es necesario tener en cuenta todas las cavidades vacías que están presentes en el material ya sean abiertas y cerradas, por lo que es complicado obtener de forma experimental dado que es difícil saber con exactitud el porcentaje de porosidad cerrado que presenta el material, es por eso que la determinación de la porosidad total se realiza de forma indirecta a partir de la densidad teórica y la densidad experimental como se puede observar en la ecuación 2.4. [59]

$$\text{Porosidad } \% = \left(1 - \frac{\rho_E}{\rho_T}\right) * 100 \quad 2.4$$

Donde  $\rho_E$  y  $\rho_T$  son la densidad experimental y la densidad teórica respectivamente.

### 2.8.3 Ensayo de dureza Vickers

El ensayo de dureza Vickers (HV), es una prueba que se le hace a los materiales para determinar cuan tan duro es, mediante la penetración de la superficie del material bajo carga. La penetración se lleva a cabo mediante un durómetro, quien ejerce una carga uniáxial (1 a 100 kgf), dejando una huella por la penetración del indentador. El penetrador o indentador es de diamante y tiene forma de pirámide rómbica con ángulos de 136°. Para la determinación de la dureza HV, se relaciona la carga aplicada y el área de la huella que dejó el indentador. La fórmula para obtener el resultado del ensayo Vickers se presenta en la ecuación 2.5. [60]

$$HV = 1.8544 \frac{P}{d^2} \quad 2.5$$

Donde HV es el número de dureza Vickers, P es la carga aplicada en Kgf o N y d es la diagonal promedio de la huella en mm.

### 2.8.4 Ensayo de resistencia a la compresión

El ensayo de compresión, es utilizado para investigar el comportamiento de un material que se encuentra sometido a una carga o fuerza de compresión. Este tipo de ensayo, se aplica en materiales que presentan muy poca o nada de deformación al ser sometidas a tensión o bien en casos específicos donde el material a evaluar va a estar sometido directamente a esfuerzos de compresión.

Este ensayo consta de someter una probeta de geometría cilíndrica o prismática, a una carga de compresión o carga aplastante de forma constante hasta que se deformen y fracturen en un equipo universal de pruebas mecánicas que se encargará de realizar las mediciones correspondientes. [60]



### III. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

#### 3.1 Diagrama de procedimiento experimental

En la figura 3 se presenta el diagrama experimental para la realización del proyecto, que consiste en el acondicionamiento de materia prima, la síntesis y caracterización de los materiales de inicio y del compuesto de matriz Mg reforzado con partículas cerámicas de desecho de fundición.

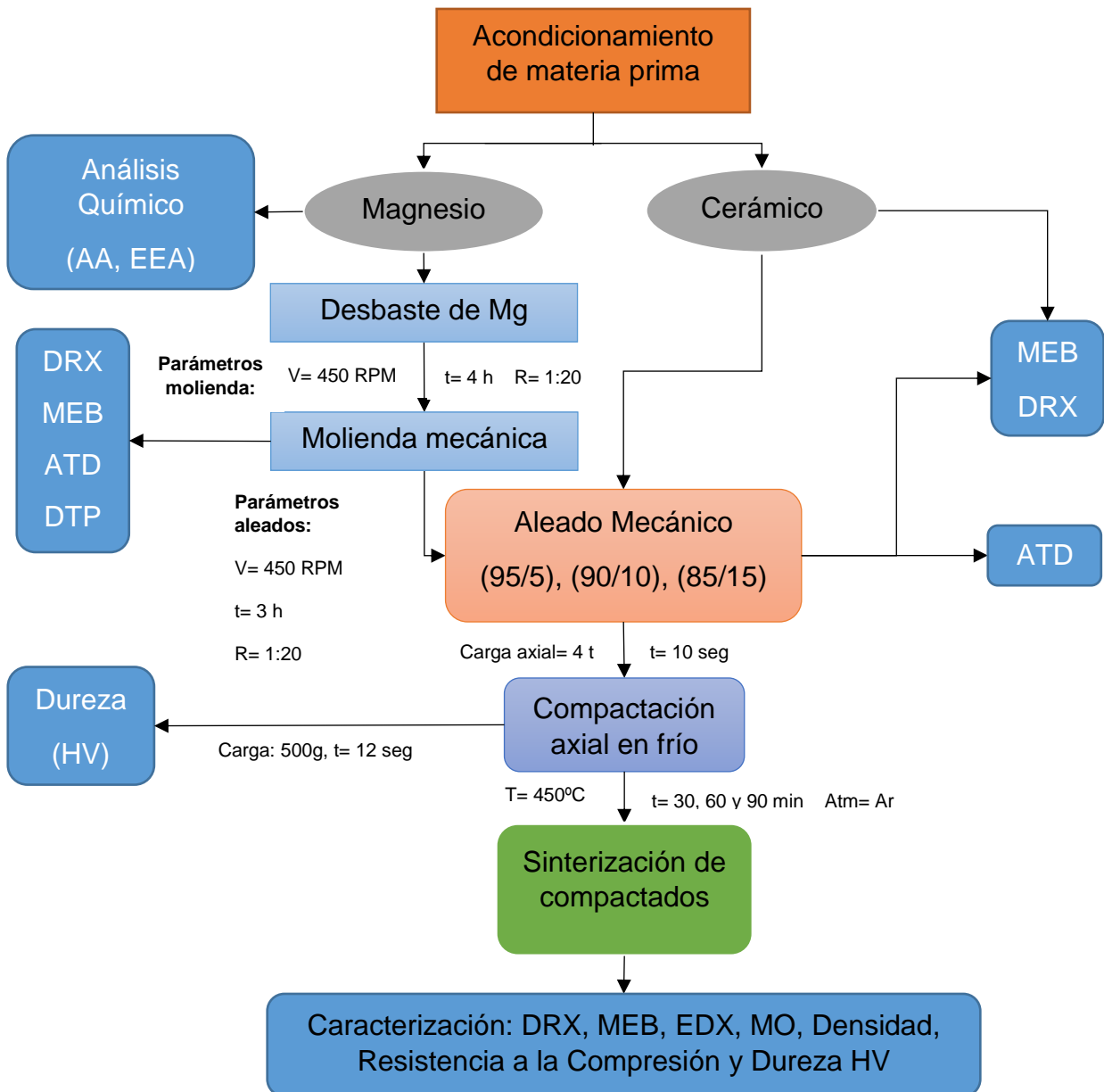


Fig. 3.1 Diagrama de procedimiento experimental

### 3.2 Matriz experimental

En la tabla 3.1 se presenta la matriz experimental del magnesio y del material compuesto metal/cerámico donde se indican la propiedades que se evaluarán en los diferentes sistemas de estudio.

**Tabla 3.1** Matriz experimental

Sistema	Propiedades a evaluar								
	Químicas		Microestructural	Estructurales	Físicas			Mecánicas	
Mg – DF (%)	AA, EEA	MEB	MEB y MO	DRX	Densidad	DTP	Porosidad	R. C	Dureza (HV)
100 – 0	X	X	X	X	X	X	X	X	X
95 – 5		X	X	X	X		X	X	X
90 – 10		X	X	X	X		X	X	X
85 – 15		X	X	X	X		X	X	X

### 3.3 Acondicionamiento de la materia prima

La materia prima que se utilizó en la investigación para la preparación de los compuestos metal/cerámico fueron polvos de desecho de la fundición de hierro previamente acondicionados con tamaño de partícula menor a 100  $\mu\text{m}$ . [29,30]

Para el caso de la matriz, se obtuvieron polvos por el desbaste de un lingote de fundición de Mg y posteriormente se realizó molienda mecánica en un molino atricionador marca Szegvari Attritor System tipo B, con una relación carga/bolas de 1:20, a una velocidad y tiempo de molienda de 450 rpm y 4 horas respectivamente, esto último con pausas de 10 minutos por cada hora en una atmósfera de aire para obtener tamaños de partícula menores a 100  $\mu\text{m}$ , donde el medio de molienda fueron bolas de acero inoxidable de 9.16 mm de diámetro.

### **3.4 Caracterización química, física y microestructural de los polvos de inicio**

Las condiciones y técnicas de caracterización que a continuación se mencionan, fueron utilizadas para el análisis de los polvos de inicio previamente acondicionados.

#### **3.4.1 Análisis por Espectroscopía de Absorción (AA) y Emisión Atómica por Plasma (EEA).**

Se realizó el análisis químico al Mg para determinar el grado de pureza, mediante un equipo de absorción atómica marca THERMO SCIENTIFIC modelo ICE 3300 y/o un espectrómetro y emisión por plasma marca PERQUIN ELMER modelo OPTIMA 8300.

#### **3.4.2 Análisis por Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)**

Los polvos fueron analizados por Microscopía Electrónica de Barrido para evaluar el tamaño de partícula y morfología después de la molienda mecánica. También se realizó un microanálisis por EDX de los polvos para cuantificar y cualificar los elementos presentes en los polvos. También se hizo un mapeo de área para ver la distribución elemental en las partículas de polvo. El análisis se realizó en un equipo JEOL JSM 6610LV, utilizando un filamento de tungsteno, alto vacío y un voltaje de 20kV. Los polvos se montaron en cinta de grafito.

#### **3.4.3 Análisis por difracción de rayos x (DRX)**

Los polvos de inicio se caracterizaron por difracción de rayos X por medio de un equipo Rigaku Modelo ULTIMA IV, en un rango de barrido de 10 a 80° en  $2\theta$ , a una velocidad de 0.02°/s, con una radiación de tipo  $\text{CuK}\alpha$ , para conocer las fases presentes en el material.

#### **3.4.4 Distribución de tamaño de partícula por difracción láser (DTP)**

Se midió distribución y tamaño de partícula de los polvos de inicio por difracción láser en un equipo marca, LA-950 VZ HORIBA para verificar que el tamaño de partícula sea el requerido ( $< 100\mu\text{m}$ ).

#### **3.5 Aleado mecánico**

Se definieron para el aleado mecánico, diferentes sistemas de trabajo donde se incorporó la fase cerámica en diferentes porcentajes (5, 10 y 15 % e.p.) con respecto a la matriz de Mg. Se utilizó un molino atricionador marca Szegvari Attritor System tipo B, el cual, el medio de molienda que se usó fueron bolas de acero inoxidable de 9.16 mm de diámetro. La relación de carga/bolas fue de 1:20, a una velocidad de 450 rpm y un tiempo de 3 horas con pausas de 10 minutos por cada hora en una atmósfera de aire.

#### **3.6 Caracterización de los polvos aleados mecánicamente**

Los polvos resultantes del aleado mecánico se caracterizaron también por diferentes técnicas, descritas ya en los apartados anteriores: Difracción de Rayos X (DRX) y Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) Asimismo, se sometieron a un Análisis Térmico Diferencial y Análisis Termogravimétrico (ATD/ATG).

##### **3.6.1 Análisis Térmico Diferencial y Análisis Termogravimétrico (ATD/ATG)**

Para determinar la temperatura de sinterización se llevó a cabo un ATD y ATG de los polvos, los cuales fueron analizados en un equipo TA Instruments Q600 SDT, con un calentamiento de 15 y 30°C/min en un rango de temperatura de 25°C a 800°C bajo atmósferas de aire y argón.

### **3.7 Compactación de polvos**

La compactación de los polvos obtenidos por aleado mecánico de los diferentes sistemas Metal/Cerámico de acuerdo a la matriz experimental, se llevó a cabo de forma axial en frío para obtener probetas cilíndricas con un diámetro de 7.7 mm y longitud de 6.5 mm (relación 0.8 de acuerdo con la norma ASTM E9-09) utilizando una prensa marca TRUPER y presión de 4 toneladas a un tiempo de prensado de 10s.

### **3.8 Sinterización de probetas (povos compactados)**

Las probetas compactadas se sinterizaron en un horno marca Lindberg/Blue®, a una temperatura de 450°C a diversos tiempos (30, 60 y 90 minutos de permanencia), bajo una atmósfera de argón para evitar la oxidación del magnesio durante el proceso. La temperatura de sinterización se estableció de acuerdo con los resultados de ATD.

### **3.9 Microscopía Óptica (MO)**

Se analizó el comportamiento microestructural mediante microscopía óptica para la cual se llevó a cabo previamente una materialografía en la que se lijaron en seco las probetas de los diferentes sistemas con lijas de SiC de la marca Struers de diferente granulometría (500-4000) y posteriormente se hizo un pulido fino utilizando como medio abrasivo pasta de diamante de 0.5 y 1  $\mu\text{m}$ .

Para el ataque químico, se utilizó Nital al 5% y el tiempo de ataque fue de 2 segundos. Para la observación de la microestructura se utilizó un microscopio óptico marca NIKON con ocular de 10x. El tamaño de partícula se llevó a cabo bajo la norma ASTM E112. [61]

### **3.10 Evaluación de propiedades físicas y mecánicas de las probetas sinterizadas**

#### **3.10.1 Evaluación de densidad**

Se evaluó la densidad de los materiales por medio del principio de Arquímedes, utilizando una balanza analítica marca OHAUS modelo Voyager Pro la cual cuenta con un kit para medición de densidad. El ensayo se realizó a tres probetas de cada sistema y se obtuvo el promedio de densidad medida. Como medio líquido se utilizó 100 ml de agua destilada.

#### **3.10.2 Análisis de la Porosidad**

Para determinar la porosidad, fue necesario conocer la densidad teórica la cual se obtuvo mediante la ecuación 3.1. <sup>[59]</sup>

$$\rho_{teorica} = \rho_{matriz} * W_{matriz} + \rho_{refuerzo} * W_{refuerzo} \quad 3.1$$

Donde  $\rho$  y  $W$  representan la densidad y la fracción en peso respectivamente.

Una vez obtenida la densidad teórica y la densidad experimental calculada con el principio de Arquímedes de acuerdo con la ecuación 2.3, se calculó la porosidad mediante la ecuación 2.4.

#### **3.10.3 Ensayo de dureza Vickers**

El ensayo de dureza de las probetas compactadas antes y después del sinterizado, se llevó a cabo por medio de un equipo Buehler Microtmet 5103 utilizando una carga de 500 g a un tiempo de 12 s de acuerdo con la norma ASTM E384-05. <sup>[62]</sup>

Se evaluaron 3 muestras de cada sistema y se realizaron 5 indentaciones por muestra a una distancia de 0.5 mm de cada indentación y se determinó la dureza promedio de cada sistema.

#### **3.10.4 Ensayo de resistencia a la compresión**

Se llevó a cabo el ensayo de resistencia a la compresión de las probetas cilíndricas de cada sistema de acuerdo con la norma ASTM E9-09 <sup>[63]</sup> en una máquina de ensayos universales WP 300 GUNT HAMBURG con capacidad de 20 kN. El ensayo se realizó a 3 probetas de cada sistema.

#### **3.10.5 Análisis fractográfico**

Se tomaron imágenes por MEB en ambiente de electrones secundarios para el análisis fractográfico, el cual se utilizó un equipo JEOL JSM 6610LV, utilizando un filamento de tungsteno, alto vacío y un voltaje de 20kV.

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Acondicionamiento y caracterización de materia prima.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de acuerdo con el programa de trabajo de la presente investigación.

#### 4.1.1 Polvos de Magnesio

Para el acondicionamiento del magnesio se apoyó de diversas técnicas de análisis las cuales fueron fundamentales para determinar los parámetros de trabajo, de modo que se obtuvieran las características deseadas de la matriz.

El análisis químico realizado al lingote de Mg se presenta en la tabla 4.1, en donde se indica la pureza del Mg de 99.93% e.p, mientras que el 0.07% e.p, restante pertenece a otros elementos como Fe, Al, Ni, Sn, Ca, Zn, Si, Sr y Zr.

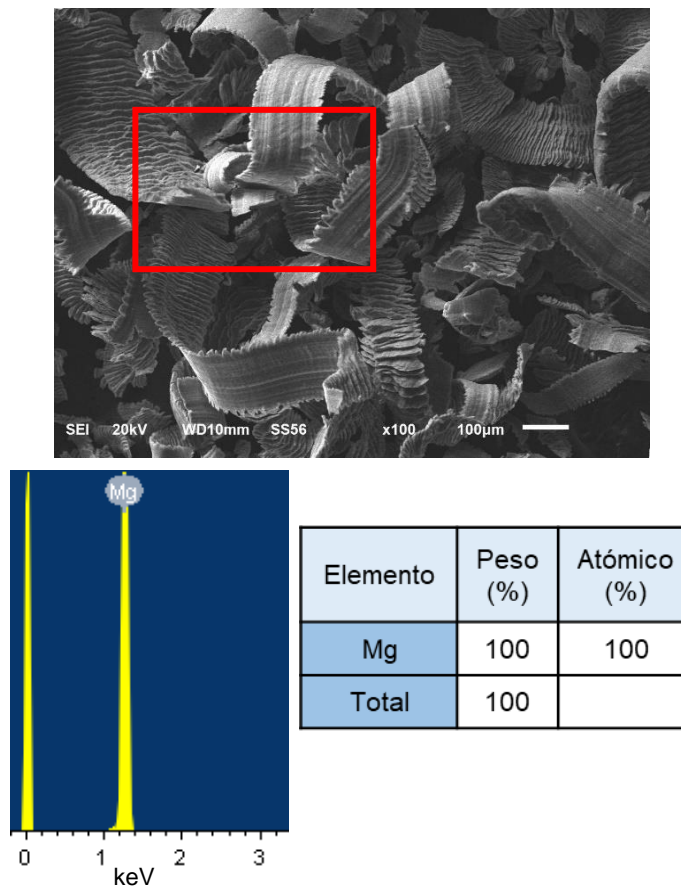
**Tabla 4.1.** Resultado de Análisis por AA y EEA

Composición Química									
Mg	Fe	Ni	Al	Sn	Ca	Zn	Si	Sr	Zr
99.93	0.01	0.002	0.008	<0.001	0.003	0.005	0.0043	<0.001	<0.001

Para la obtención de los polvos, se desbastó un lingote de magnesio, obteniendo rebaba con una morfología irregular como se puede observar en la imagen de la figura 4.1.

El análisis por EDX semicualitativo y semicuantitativo de la rebaba de magnesio descarta la presencia de hierro o cualquier otro elemento que pueda provenir de la herramienta utilizada para el desbaste previo del magnesio, por lo que se no existe una contaminación del material que se empleó como matriz en el material compuesto.





**Figura 4.1** Imagen de electrones secundarios obtenida por MEB y análisis EDX de rebaba de Mg.

La rebaba de Mg fue sometida a diferentes tiempos de molienda y se utilizó la cantidad de 2 y 10 gramos de material como carga, para definir las condiciones de molienda mecánica adecuadas para obtener polvos con un tamaño de partícula inferior a 100  $\mu\text{m}$  y una morfología lo más esférica posible de acuerdo con Wagih y col. [3]

En la Figura 4.2 se presenta los resultados de los polvos de Mg a diferentes tiempos de molienda: 0, 4, 8 y 12 horas y con diferente carga de material (polvos de magnesio) con una relación carga/bola 1:20 y una velocidad de molienda de 450 RPM. Se observa que a 12h de molienda con carga de 2g, comienza a percibirse la existencia de partículas menores a 100  $\mu\text{m}$ , mientras que con carga de 10g a partir de las 4h de molienda ya hay presencia de partículas refinadas con la morfología y tamaño que se requiere para esta investigación, por lo que se prosiguió a evaluar el refinamiento de partículas de Mg con carga de 10g, relación 1:20 y una velocidad de 450 rpm a 1, 2, 3 y 4 horas de molienda.

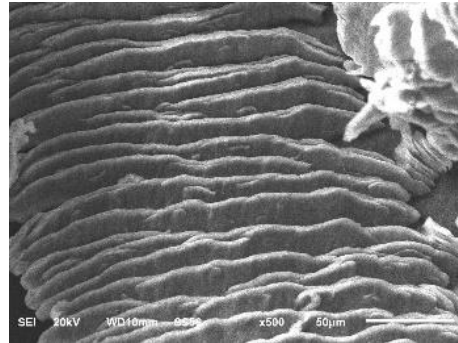
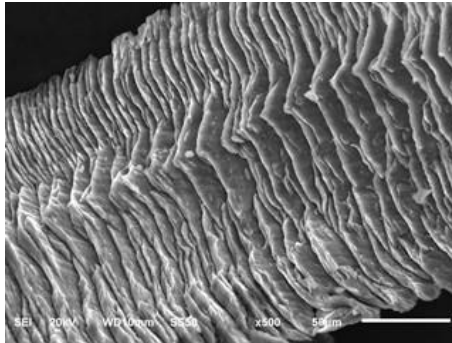
## Molienda mecánica de Mg (relación 1:20)

Tiempo (h)

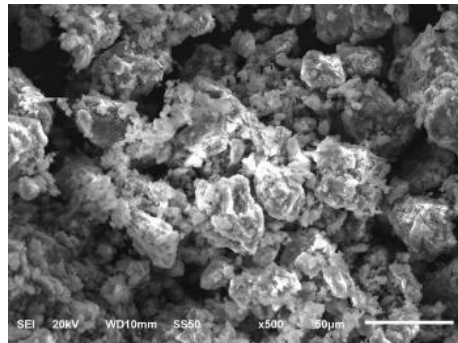
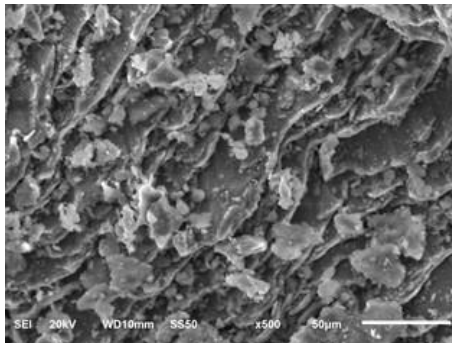
2g

10g

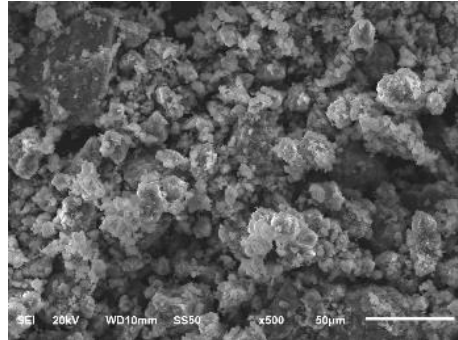
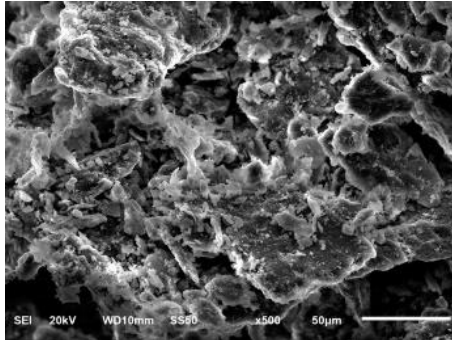
0



4



8



12

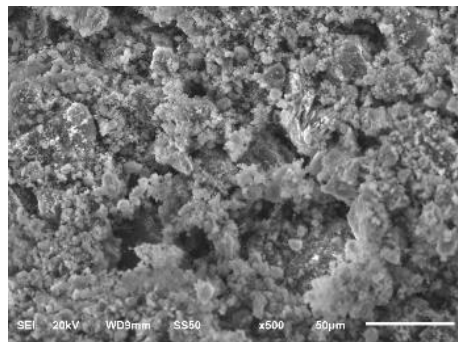
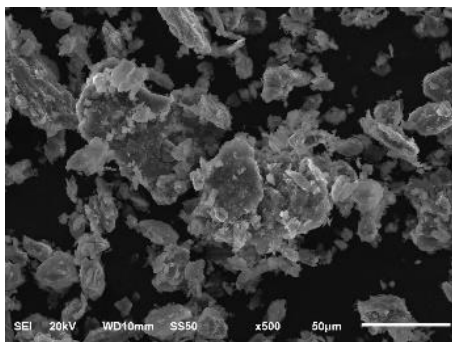
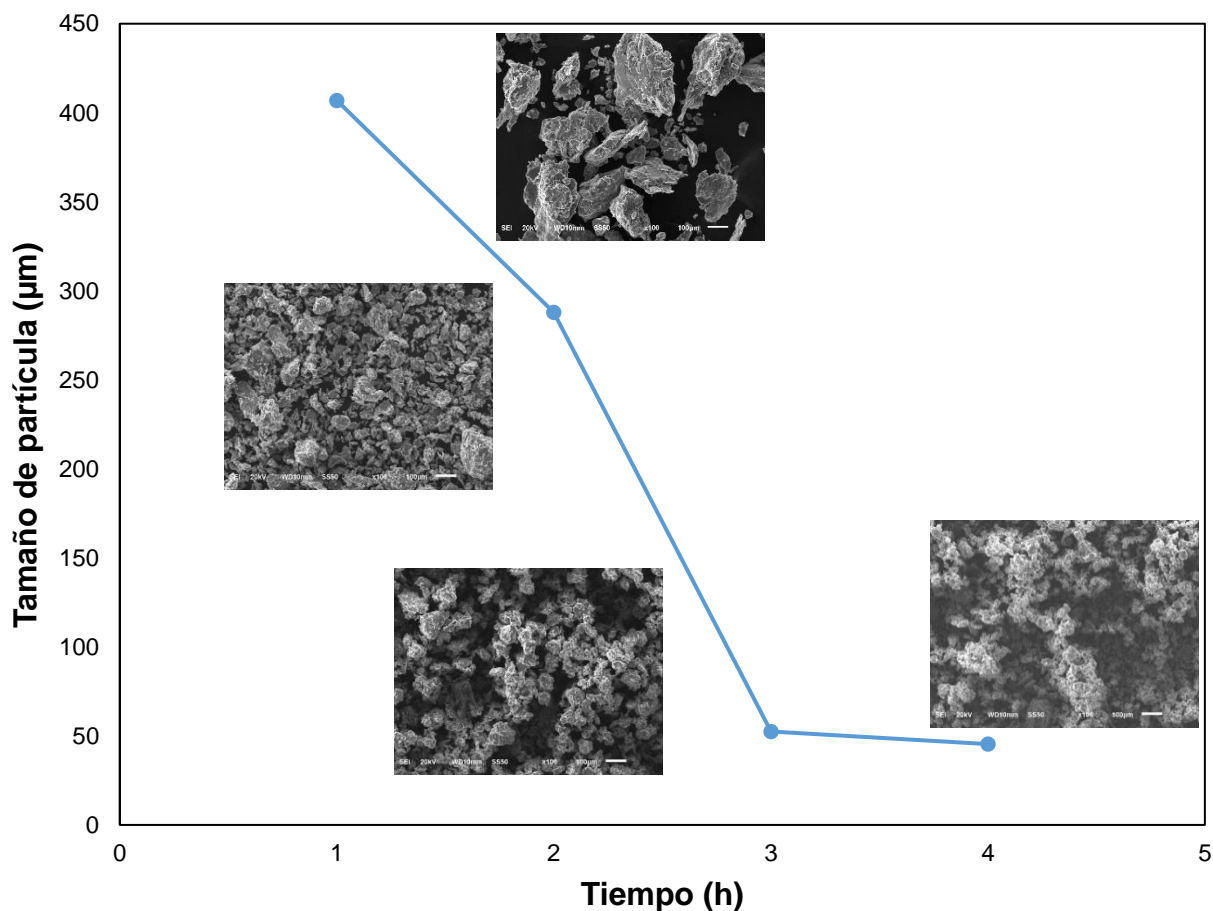


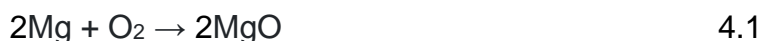
Figura 4.2 Polvos de Mg a diferentes cantidades y tiempos de molienda mecánica

Para la evaluación del refinamiento de partícula se midieron por MEB, 30 partículas en diferentes áreas para cada tiempo de molienda y se determinó el promedio de tamaño de partícula. Los resultados que se muestran en la figura 4.3 indican que a partir de 3h de molienda, el tamaño de partícula se encuentra alrededor de 50  $\mu\text{m}$ . Para la cuarta hora ya no hay una reducción significativa y las partículas continúan dentro del rango de los 45 - 50  $\mu\text{m}$ , y esto puede confirmarse con el análisis DTP en la que se obtuvo un promedio de tamaño de partícula similar como se muestra en la figura 4.5 por lo que el tiempo óptimo de molienda mecánica para la obtención de partículas menores a 100  $\mu\text{m}$  es de 4h.

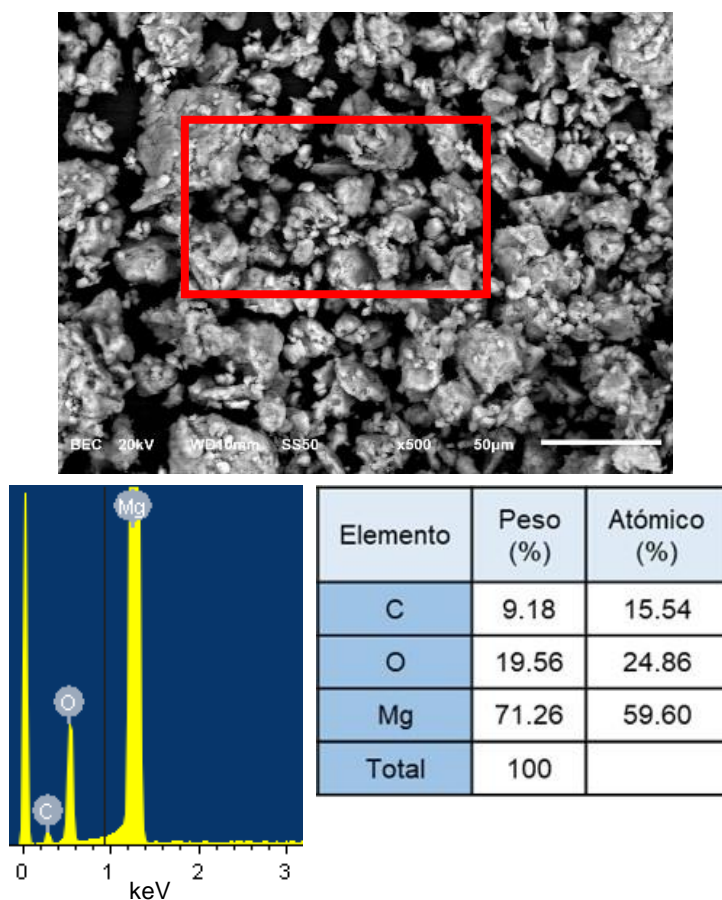


**Figura 4.3** Efecto del tiempo de molienda sobre el tamaño de partícula del magnesio.

El análisis por EDX que se presenta en la figura 4.4, indica la presencia de oxígeno, lo cual está relacionado con una reacción de las partículas de Mg con el oxígeno de la atmósfera, ya que durante la molienda mecánica se genera alta energía cinética acelerando la reacción en la superficie de las partículas de Mg, y por lo tanto se forma una capa de MgO de acuerdo con la reacción 4.1 [11].

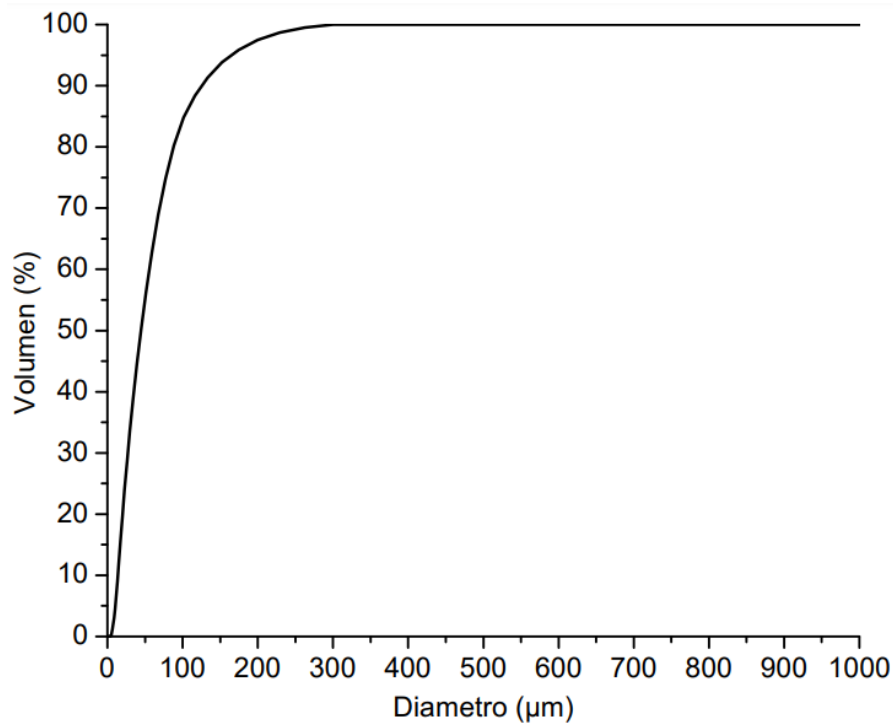


El carbono que aparece en el microanálisis se debe a la cinta de grafito en la cual fueron colocadas las partículas de Mg para su análisis en el Microscopio Electrónico de Barrido.



**Figura 4.4** Imagen de electrones retrodispersados obtenidas por MEB y microanálisis por EDX del polvo de Mg con 4h de molienda mecánica.

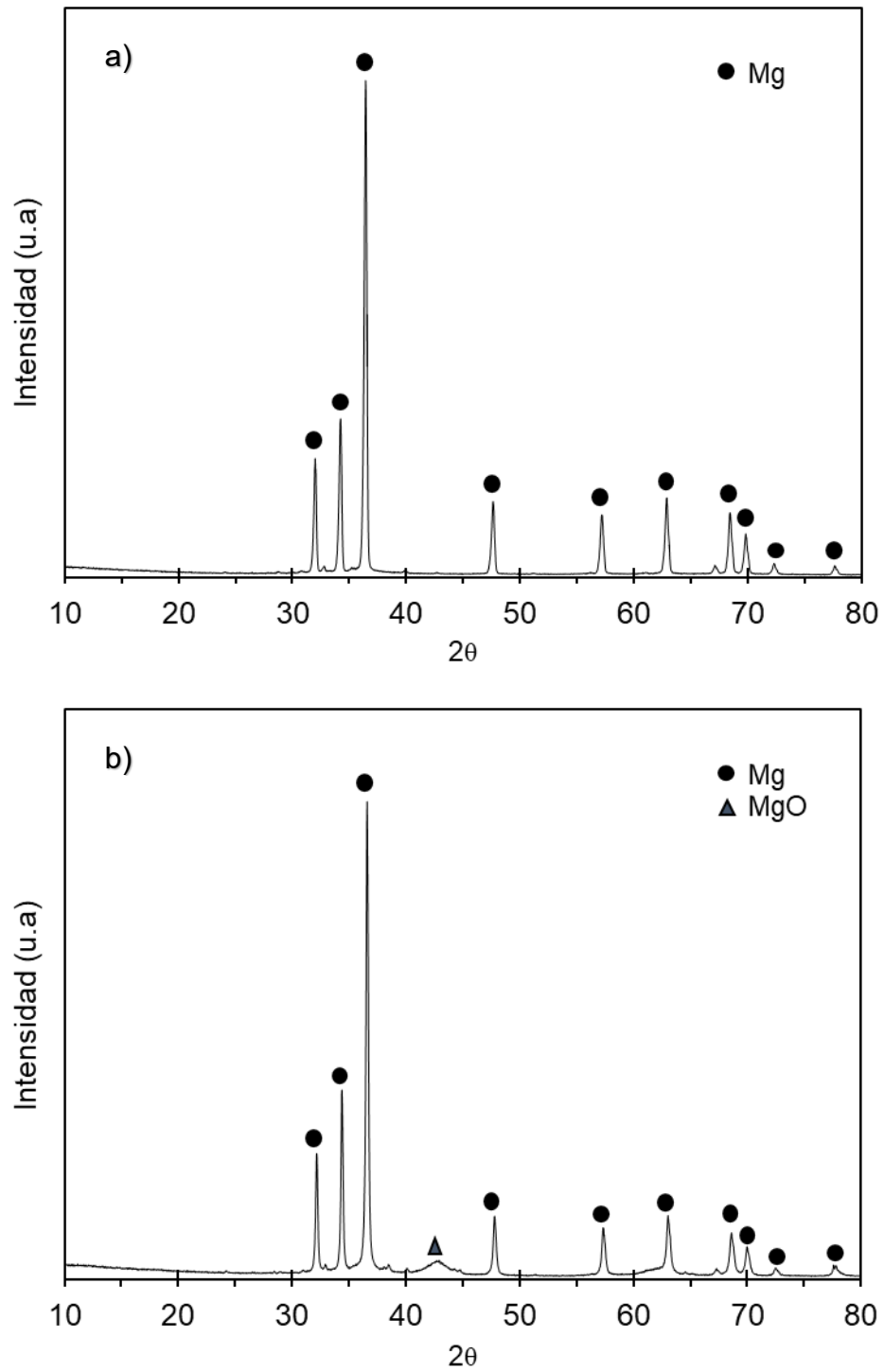
En la figura 4.5 se presentan los resultados obtenidos de la distribución de tamaño de partícula por difracción láser de los polvos de Mg sometidos a molienda mecánica por un tiempo de 4h. El tamaño de partícula promedio obtenido fue de 59.12  $\mu\text{m}$ , similar al promedio obtenido por MEB donde el tamaño medido fue  $\sim 50 \mu\text{m}$ . Con esto se corrobora que el tamaño de partícula se encuentra dentro del rango especificado para el procesamiento de materiales compuestos ( $<100 \mu\text{m}$ ). [3]



**Figura 4.5** Distribución de tamaño de partícula de polvos de Mg con 4h de molienda.

En la figura 4.6 se muestra los patrones de DRX de los polvos de Mg antes (A) y después (B) de la molienda mecánica. En los polvos antes de la molienda mecánica se identificó solamente Mg (PDF 99-101-0099) y después de la molienda mecánica se presentan las fases Mg (PDF 99-101-0099) y MgO (PDF 99-100-7646). La fase MgO se atribuye a la reacción de las partículas magnesio y el oxígeno de la atmósfera durante el tiempo de molienda mecánica de acuerdo con la ecuación 4.1.

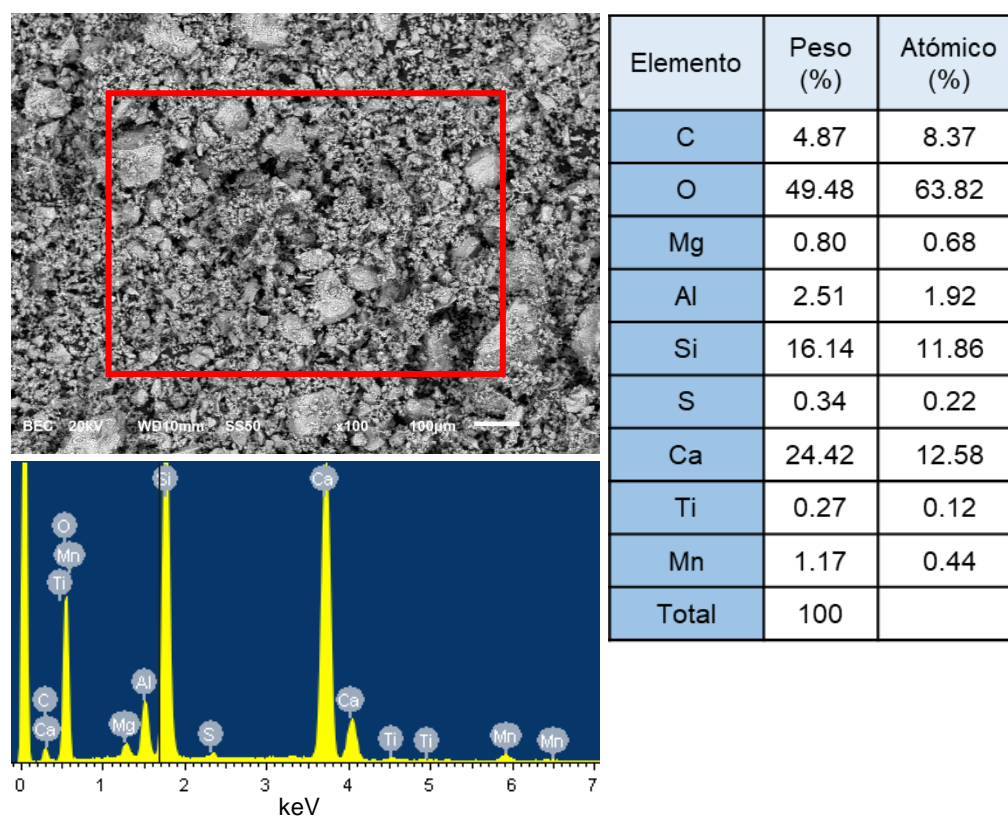




**Figura 4.6** Patrones de Difracción de Rayos X de los polvos de Mg, a) antes, b) después de 4h de molienda mecánica.

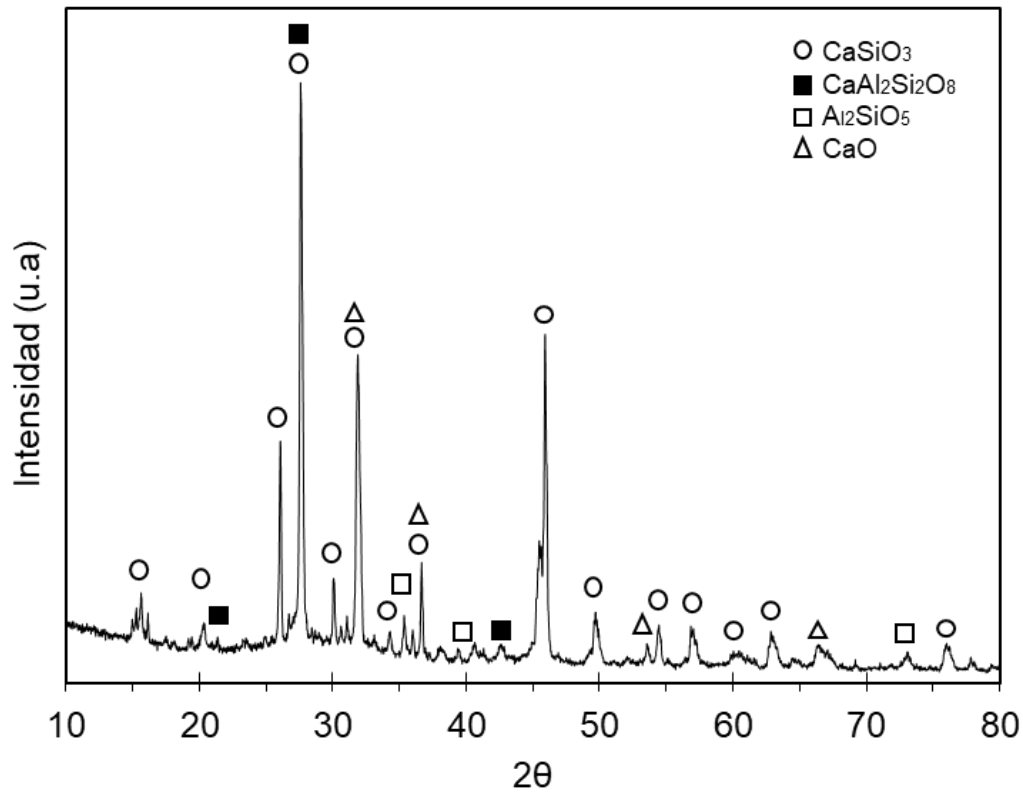
#### 4.1.2 Polvos de desecho de la fundición.

Para el presente trabajo se utilizaron polvos de desecho de la fundición de hierro (DF) previamente procesados por el grupo de investigación al cual pertenece este proyecto [29-30]. En la figura 4.7 se muestra la imagen por MEB de los polvos de desecho de la fundición (DF) en donde se presentan algunos aglomerados de partículas menores a 100  $\mu\text{m}$ . El análisis por EDX indica una composición elemental de Ca, O, Mg, Al, Si, S, Ti y Mn. El carbono que aparece en el microanálisis se debe a la cinta de grafito en la cual fueron colocadas las partículas del desecho de la fundición para su análisis.



**Figura 4.7** Imagen de electrones retrodispersados obtenida por MEB y análisis EDX de los polvos de DF.

Los resultados por Difracción de Rayos X de los polvos de DF muestran la presencia de diversas fases como pseudowollastonita ( $\text{CaSiO}_3$ , PDF 99-100-2330), anortita ( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ , PDF 00-041-1486), sillimanita ( $\text{Al}_2\text{SiO}_5$ , PDF 00-038-0471) y calcita ( $\text{CaO}$ , PDF 00-037-1497).



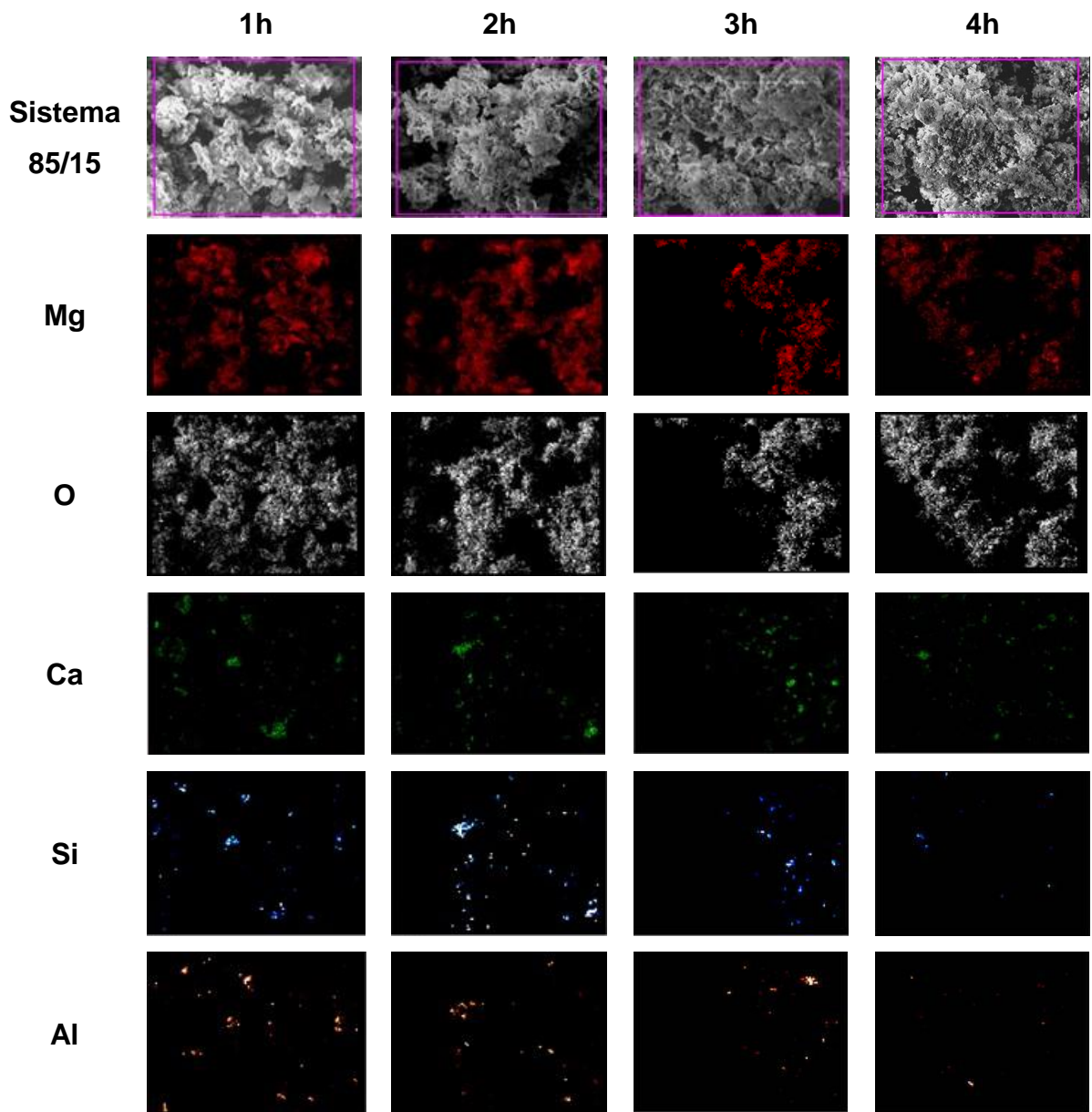
**Figura 4.8** Patrón de Difracción de Rayos X de DF.

## 4.2 Aleado Mecánico

Una vez que se logra obtener las condiciones requeridas de la materia prima, se prosigue a realizar el aleado mecánico. Los parámetros de trabajo para el aleado mecánico serán los mismos que se utilizaron para la molienda mecánica del Mg, con excepción del tiempo. Los sistemas de estudio metal/cerámico se clasifican de la siguiente manera: 100 se refiere a 100% e.p. de Mg, 95/5 (95% e.p. de Mg y 5% e.p. de DF), 90/10 (90% e.p. de Mg y 10% e.p. de DF) y 85/15 (85% e.p. de Mg y 15% e.p. de DF), respectivamente.



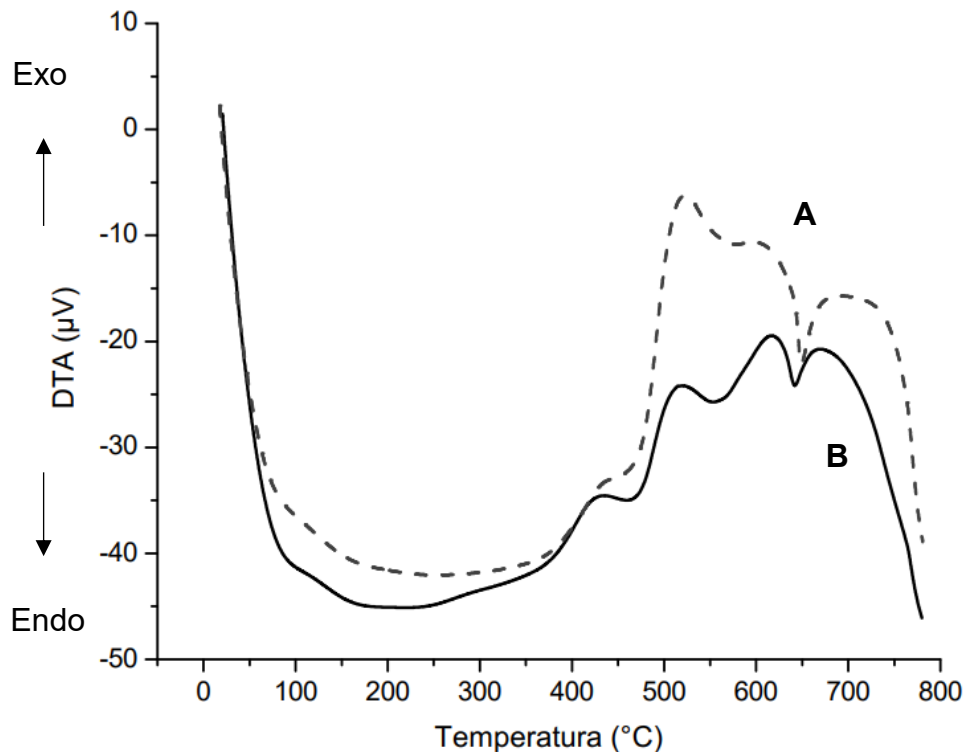
Para definir el tiempo del proceso de aleado mecánico, a la cual se logra obtener una correcta mezcla y homogeneidad del refuerzo en la matriz, se evaluó el sistema 85/15 (Metal/cerámico) a diferentes tiempos de proceso: 1, 2, 3 y 4 horas. En la figura 4.9 se presentan las imágenes por MEB y el mapeo por EDX para observar la distribución de las partículas cerámicas dentro de la matriz metálica de Mg, donde se puede observar que, a partir de la tercera hora de molienda, las partículas del cerámico ya se encuentran distribuidas dentro de las partículas del Mg logrando el aleado mecánico [3].



**Figura 4.9** Imágenes por MEB y distribución elemental por mapeo.

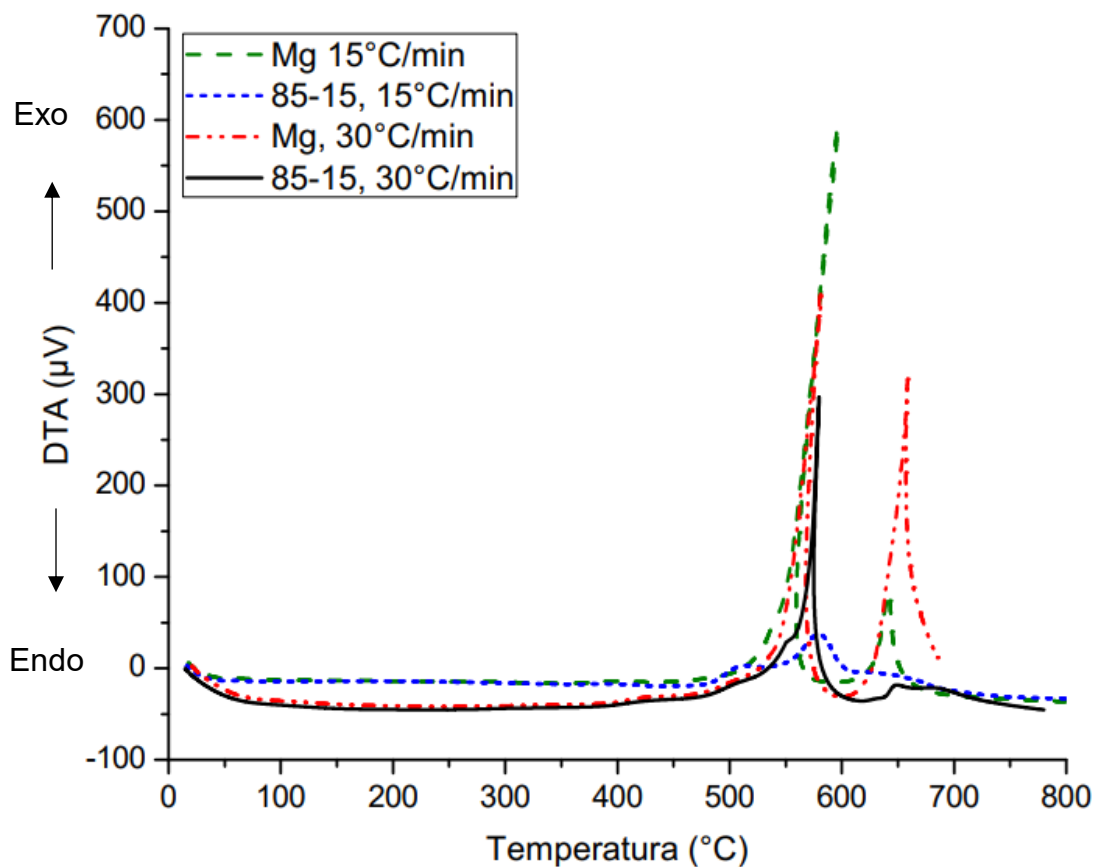
Para determinar la temperatura de sinterización del material compuesto metal/cerámico, se realizó un Análisis Térmico Diferencial (ATD) bajo una atmósfera de argón. En la figura 4.10 se muestra el termograma del sistema metal/cerámico (85/15) y del Mg, se observan 2 señales exotérmicas a temperaturas aproximadas de 450 y 500°C, además de una endotérmica a 650°C.

La señal endotérmica está relacionada con el punto de fusión del Mg y las exotérmicas a la interacción del Mg con el oxígeno del material de refuerzo y del ambiente, dado que el Mg a temperaturas relativamente altas tiende a reaccionar con el oxígeno. [46] De acuerdo con los resultados obtenidos por ATD, ocurre una liberación de energía de mayor intensidad a 500°C, por lo que de acuerdo con otras investigaciones realizadas por N. Aboudzadeh, la temperatura adecuada de sinterización es 50°C menor a la temperatura de reacción, por lo que se optó a trabajar a una temperatura de sinterización de 450°C [64].



**Figura 4.10** Análisis Térmico Diferencial: A) Mg y B) sistema 85/15 a 3h de aleado mecánico en atmósfera de argón.

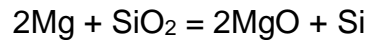
La velocidad de calentamiento puede ser un factor que altere los resultados desplazando las intensidades de las reacciones, hacia temperaturas mayores como menciona I. Lasanta y col. [51] en su trabajo, se explica lo que sucede con las reacciones químicas a diferentes velocidades. Sin embargo, la velocidad de calentamiento no tiene gran impacto en el sistema metal/cerámico con el que se trabaja en este proyecto de investigación como se muestra en la figura 4.11, donde las reacciones exotérmicas se aprecian a una temperatura aproximada de 550°C en ambas velocidades de calentamiento (15°C/min y 30°C/min) bajo atmósfera al aire. Por lo anterior, para eficientizar el tiempo de sinterización, se decidió trabajar en este proyecto con una velocidad de calentamiento de 30°C/min.



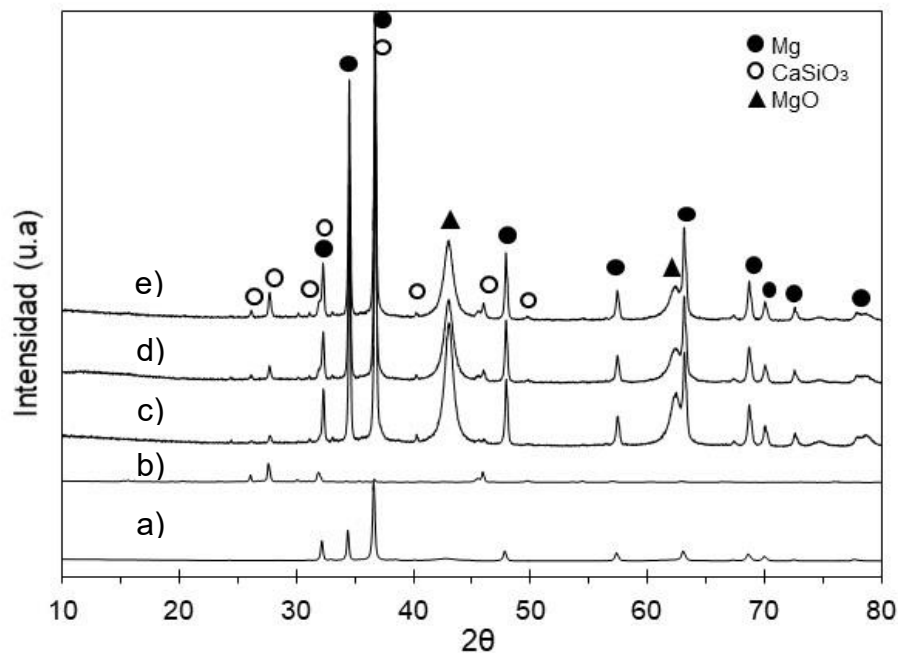
**Figura 4.11** Análisis térmico diferencial a diferente velocidad de calentamiento en atmósfera al aire.

Posteriormente se realizó una caracterización por Difracción de Rayos X a los diferentes sistemas. Los patrones DRX de los sistemas Mg/DF que se observan en la figura 4.12. Los patrones del inciso a y b corresponden a la fase metálica de magnesio (PDF: 99-101-0099) y del desecho de fundición respectivamente, en este último se identificó la fase  $\text{CaSiO}_3$  conocida como pseudowollastonita (PDF: 99-100-2330). Los patrones de los incisos c, d y e corresponden a los sistemas reforzados con 5, 10 y 15% e.p. respectivamente después de haber sido sometidos a sinterización, donde además de identificar la fase de Mg y  $\text{CaSiO}_3$ , también se presenta la fase MgO (PDF: 99-100-7646).

El MgO se forma por una reacción *in situ* entre el DF con el magnesio, debido a que existe una gran electronegatividad entre el Mg y el oxígeno del compuesto  $\text{SiO}_2$  perteneciente a la wollastonita, dando lugar a la reacción que se muestra en la ecuación 4.2, y esto se corrobora con el evento exotérmico que se presenta en el análisis térmico. Además, de igual forma que el aluminio, el Mg tiende a formar una capa superficial de MgO que protege el interior del metal, por lo que la reacción 4.1 también está presente [2, 65, 67].



4.2



**Figura 4.12** Patrones de DRX: a) Mg puro, b) DF, c) sistema 95/5, d) sistema 90/10 y e) sistema 85/15.

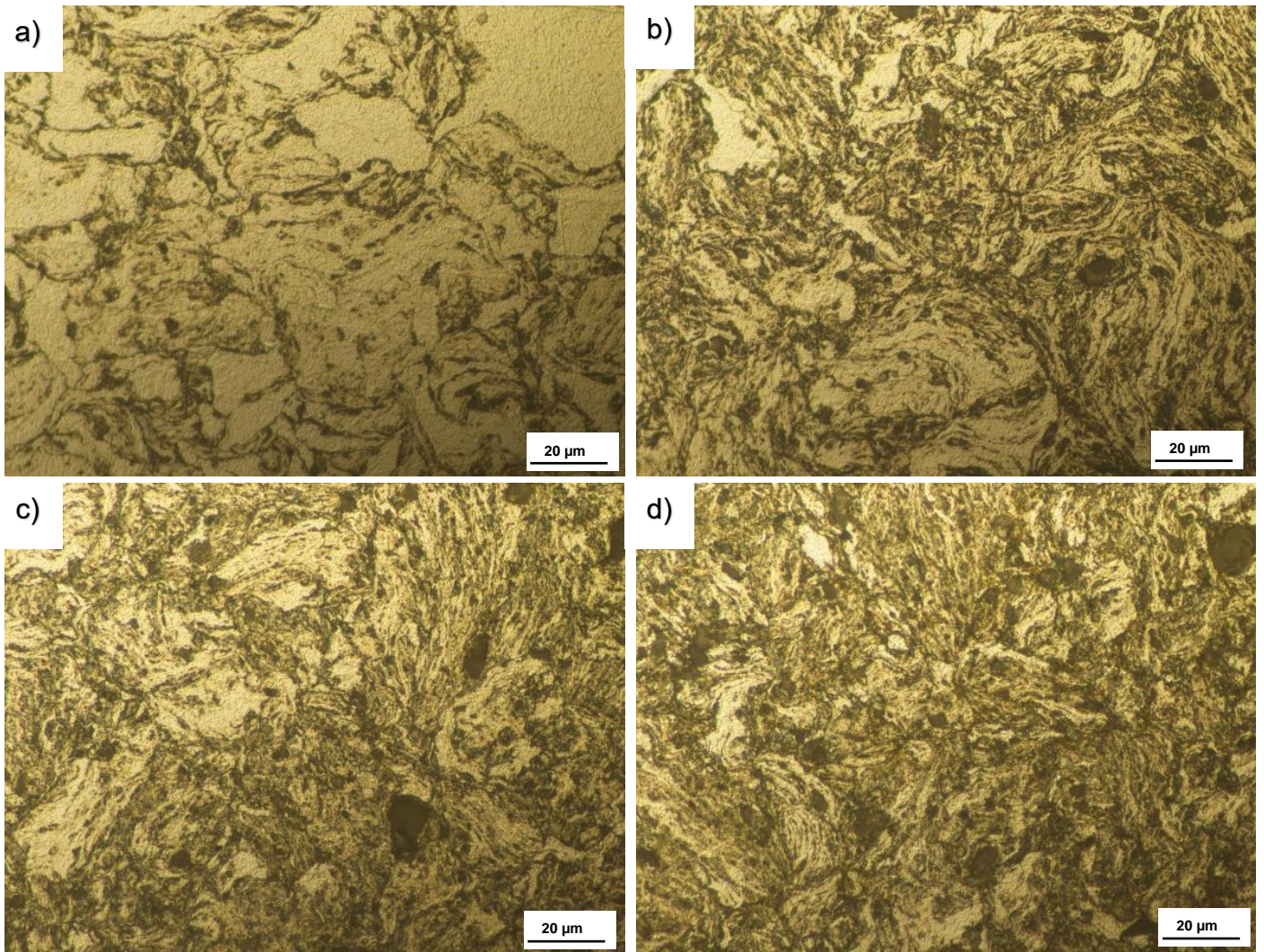
En las figuras 4.13, 4.14 y 4.15 se presentan imágenes por microscopía óptica a 500x de los diferentes sistemas a distintos tiempos de sinterización (30, 60, 90 minutos) a una temperatura de 450°C, donde se puede apreciar que el tamaño de grano disminuye conforme se incrementa el contenido de DF como refuerzo (fase oscura) en todos los casos (ver tabla 4.2). Con esto se demuestra que el tiempo no influye significativamente en las características microestructurales como lo es el tamaño de grano. [64]

**Tabla 4.2** Tamaño de grano correspondiente a los diferentes sistemas y condiciones.

Sistemas / Parámetros	450 / 30		450 / 60		450 / 90	
	N° de grano (ASTM E112)	Tamaño de grano promedio ( $\mu\text{m}$ )	N° de grano (ASTM E112)	Tamaño de grano promedio ( $\mu\text{m}$ )	N° de grano (ASTM E112)	Tamaño de grano promedio ( $\mu\text{m}$ )
Mg	6	45	6	45	6	45
95/5	7	32	7	32	7	32
90/10	8	27	8	27	8	27
85/15	8	22	8	22	8	22

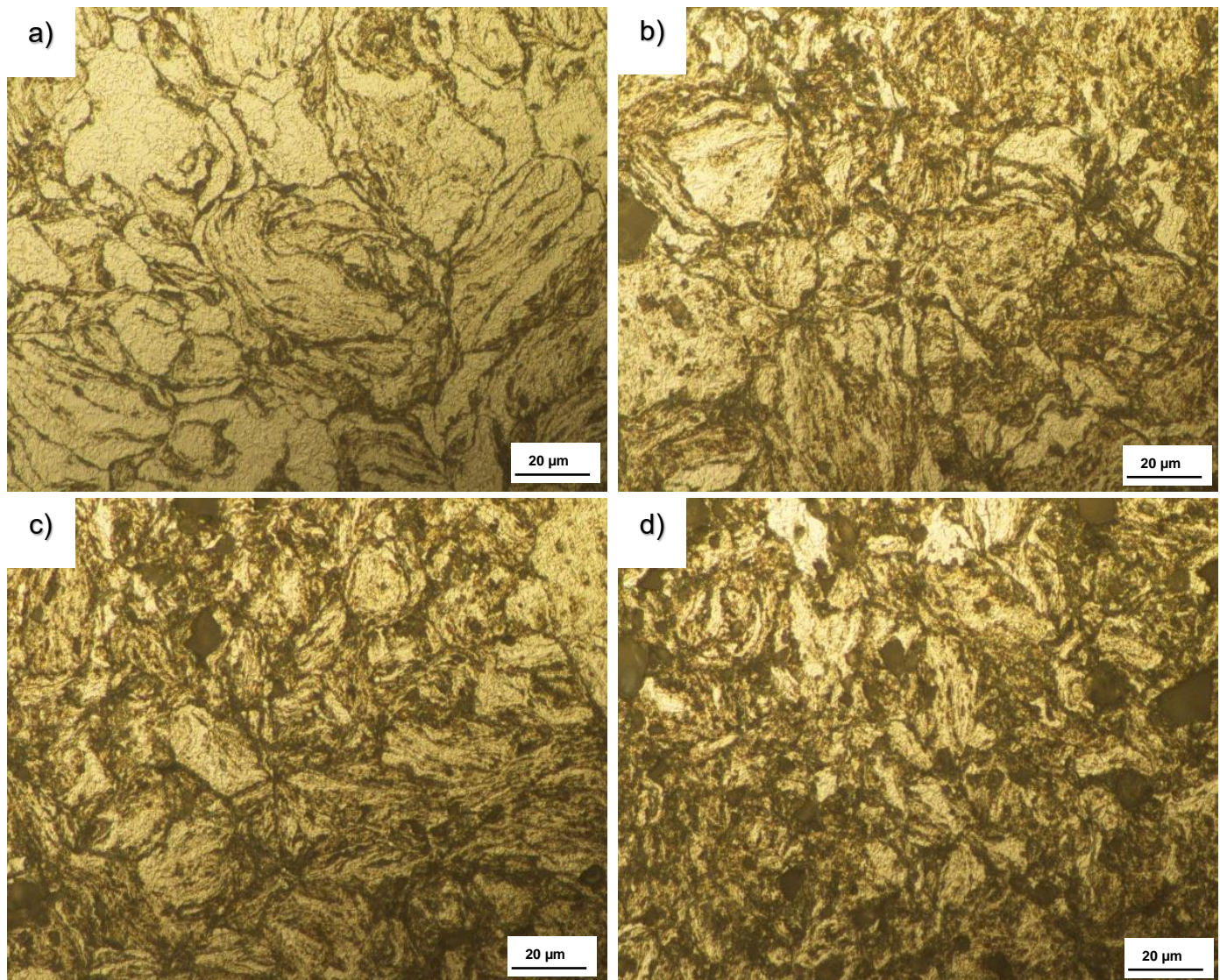
Los resultados son consistentes con otras investigaciones donde indican que al aumentar el contenido de fase de refuerzo disminuye el tamaño de grano. [67, 68] A menor tamaño de grano, mayores serán las propiedades mecánicas como resistencia y dureza.





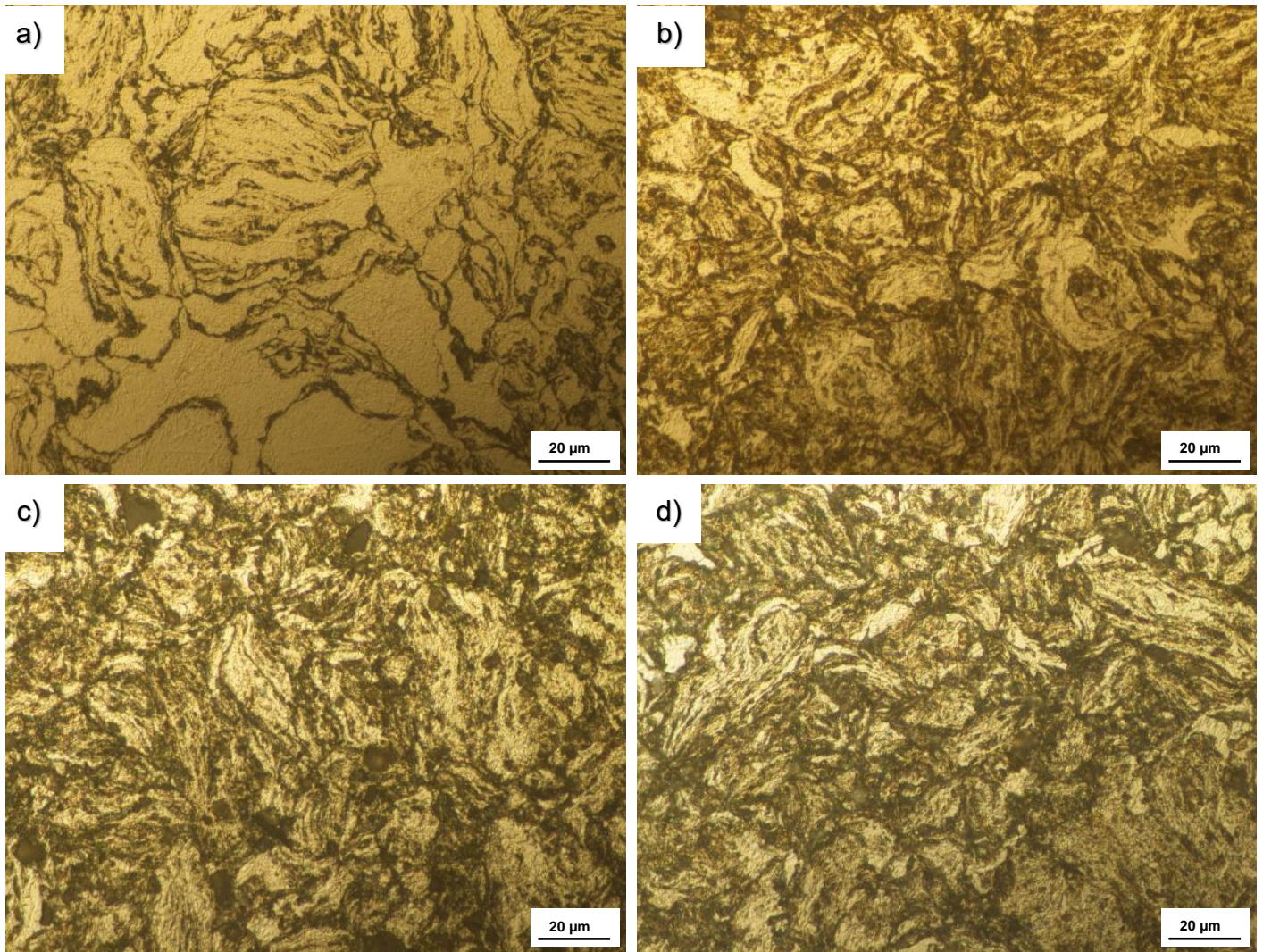
**Figura 4.13** Morfología de los granos: a) Mg, b) sistema 95/5, c) sistemas 90/10 y d) sistema 85/15 sinterizados a 450°C por 30 minutos.





**Figura 4.14** Morfología de los granos para: a) Mg, b) sistema 95/5, c) sistemas 90/10 y d) sistema 85/15 sinterizados a 450°C por 60 minutos.



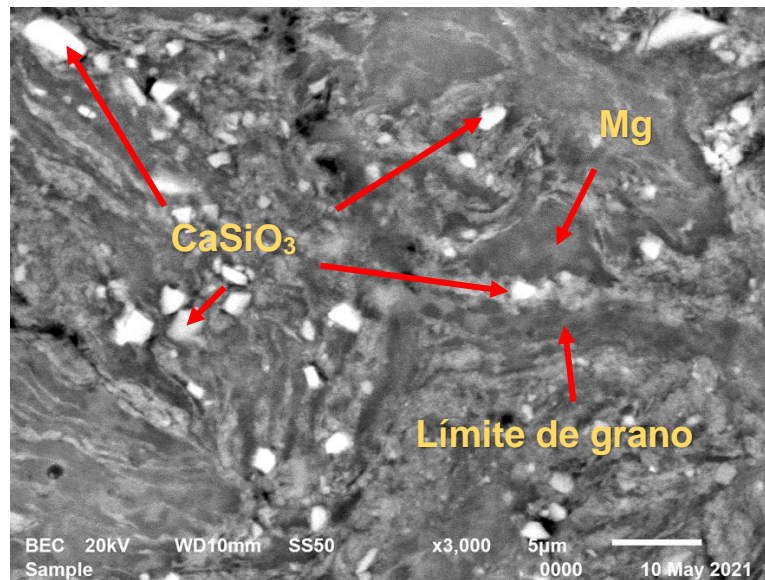


**Figura 4.15** Morfología de los granos para: a) Mg, b) sistema 95/5, c) sistemas 90/10 y d) sistema 85/15 sinterizados a 450°C por 90 minutos.

En la figura 4.16 se aprecia una imagen por MEB en donde se indica la fase matriz metálica (fase oscura) y la fase de refuerzo cerámica (fase clara), así como el límite de grano. Se logra apreciar que parte del material refuerzo se posiciona en estos límites de grano y otras partículas se encuentran distribuidas en la matriz de magnesio funcionando como anclas para impedir la movilidad de las dislocaciones e incrementando las propiedades mecánicas como resistencia a la compresión y dureza

[64]

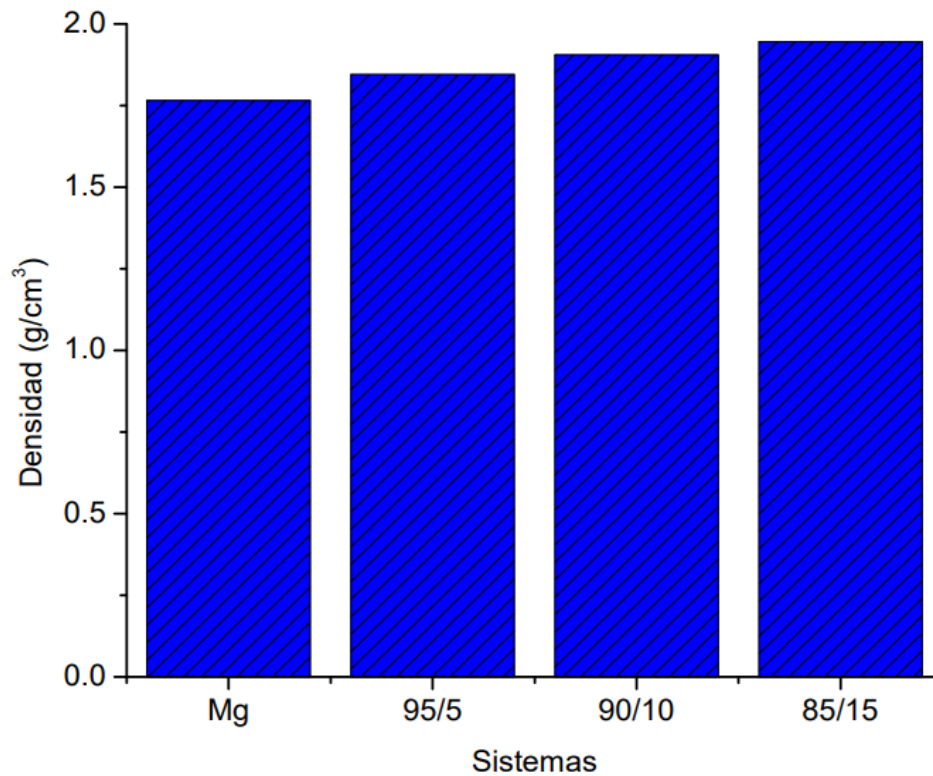




**Figura 4.16** Imagen por MEB de la fase matriz, fase refuerzo y el límite de grano del material compuesto.

### 4.3 Evaluación de propiedades físicas y mecánicas

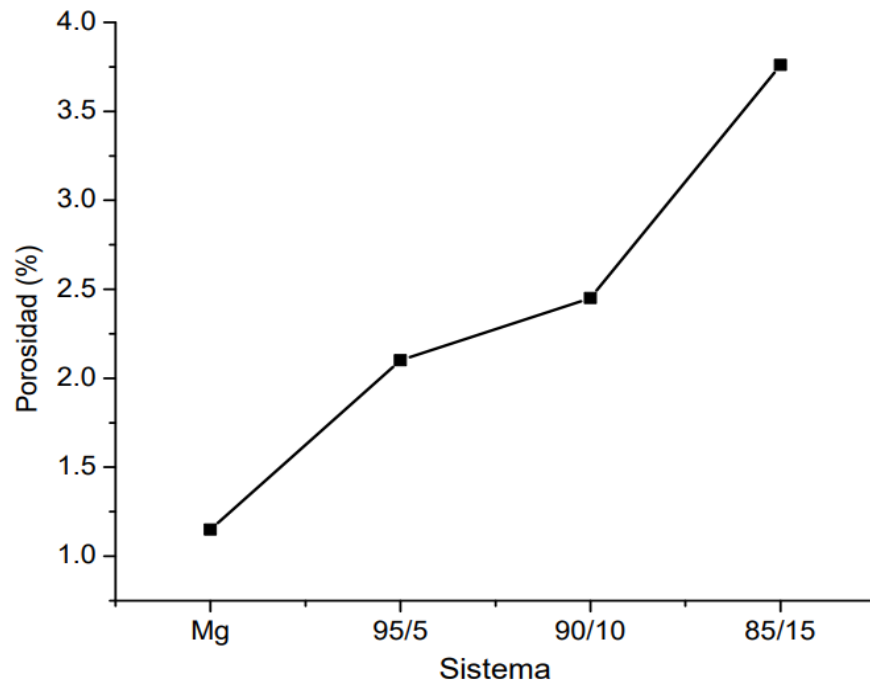
La figura 4.17 muestra el efecto del contenido del desecho de la fundición (DF) sobre la densidad de compuestos de Mg/DF procesados a partir de aleado mecánico y sinterizados a 450°C con un tiempo de permanencia de 60 minutos. La densidad del Mg compactado fue de 1.77 g/cm<sup>3</sup>, mientras que la de los sistemas 95/5, 90/10 y 85/15 fue incrementando con el refuerzo dando una densidad de 1.85, 1.91 y 1.95 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente. Dicho incremento se atribuye a la densidad de refuerzo (2.9 g/cm<sup>3</sup>) que se añade al material compuesto y al MgO (3.58 g/cm<sup>3</sup>) que se forma durante el proceso dado que sus respectivas densidades son mayores a la de la matriz. La densidad de los compuestos Mg/DF se encuentra en el rango de 1.77 -1.95 g/cm<sup>3</sup> que es similar a los valores reportados por otras investigaciones y se encuentran debajo de los materiales compuestos de matriz de aluminio, lo cual es importante para la disminución en el peso de la posible aplicación para el compuesto Mg/DF. [2, 27-28, 69]



**Figura 4.17** Densidad de los diferentes sistemas.

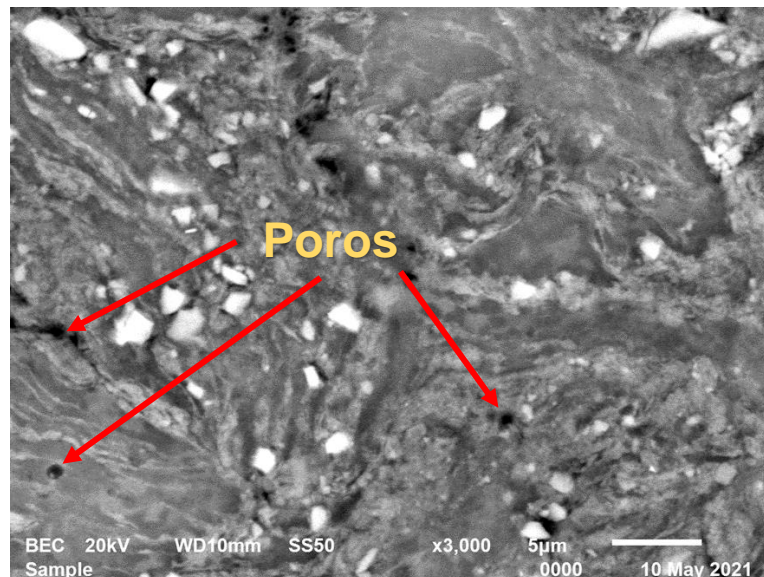
En la evaluación de la porosidad realizada sobre cada sistema, se advierte un incremento notable de hasta 3.76 % cuando el sistema contiene 15 % e.p. de refuerzo mientras que para los sistemas con 5 y 10 % e.p. de refuerzo se obtuvieron valores de 2.10 y 2.46 %, respectivamente (ver figura 4.18).

Todos los productos procesados por metalurgia de polvos tendrán cierta porosidad ya que dicha característica es inherente a este proceso. L. Utrera y col.<sup>[70]</sup>, indica en su investigación que la porosidad no tiene un efecto significativo en las propiedades mecánicas siempre y cuando se encuentre homogéneamente distribuida y con porcentajes inferiores al 4 %.



**Figura 4.18** Porcentaje de porosidad de los diferentes sistemas.

Con el objeto de observar la matriz metálica, el refuerzo y los poros en el material, se presenta la figura 4.19. En la figura se muestra una imagen por MEB donde se visualiza la presencia de poros con tamaño del orden de 0.5 a 1.5  $\mu\text{m}$  en el sistema Mg/DF.



**Figura 4.19** Imagen por MEB de poros en el sistema 85/15

Los resultados de dureza Vickers de los diferentes sistemas, sinterizados a 450°C a tiempos de 30, 60 y 90 minutos se presentan en la tabla 4.2, si bien, los sistemas con 15% e.p de refuerzo cuentan con mayor dureza que los sistemas con 5 y 10% e.p. de refuerzo, en todos los casos se experimenta un incremento considerable en referencia a la dureza que se reporta para el Mg. Una contribución adicional del análisis de los valores de dureza obtenidos consiste en la afirmación de que el tiempo de sinterización no es un factor que tenga efecto en la dureza, esto debido a que en todos los casos, las durezas de los diferentes sistemas se mantienen en los mismos rangos para todos los tiempos de sinterizado.

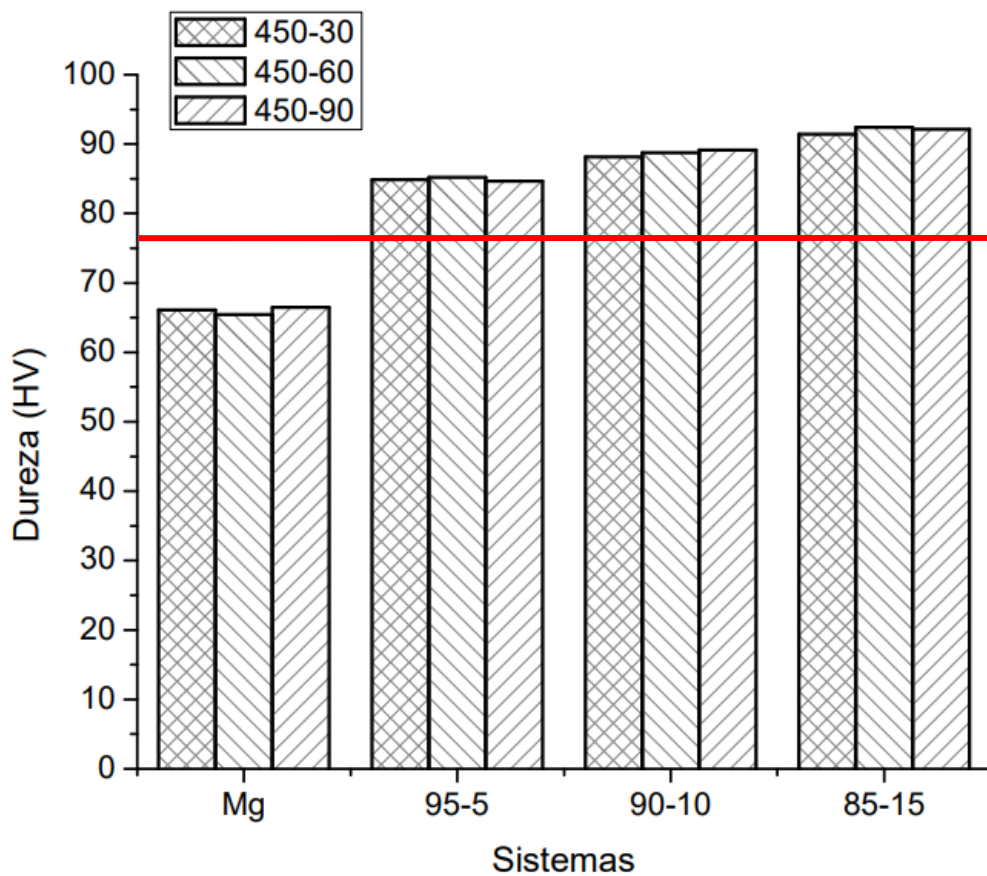
**Tabla 4.2** Resultados obtenidos del ensayo de dureza Vickers (HV)

Unidades	Sistema	Parámetros de sinterización: Temperatura (°C) – Tiempo (min)		
		450-30	450-60	450-90
HV	Mg	66.12	65.43	66.51
	95-5	84.88	85.23	84.65
	90-10	88.16	88.76	89.15
	85-15	91.43	92.41	92.12

El sistema con 85% e.p. de Magnesio y 15% e.p. de DF, es recomendable ya que se puede utilizar mayor contenido de desecho de la fundición sin afectar en la dureza. Esto debido a que una de las ventajas más significativas que ofrece la metalurgia de polvos, es la homogeneidad en la distribución de las partículas de refuerzo en la matriz, haciendo que la transferencia de la carga sea la correcta entre la matriz y el refuerzo. [35, 38] El aumento de la dureza a mayor porcentaje de refuerzo, también se atribuye a la reducción del tamaño de grano de la matriz, dado que, durante el aleado mecánico, las partículas de refuerzo ayudan a fracturar y reducir el tamaño de partícula de la matriz. [71]

Con fines comparativos sobre la posible aplicación del material compuesto Mg/DF con respecto a los materiales actuales de aleaciones de aluminio que se utilizan para la fabricación del Cárter (pieza automotriz), se presenta la figura 4.20 donde se puede observar en la gráfica, que la dureza es superior a la requerida para el cárter de aluminio que es de 76HV (indicada con una línea roja).

Los resultados obtenidos de dureza Vickers son comparables con los obtenidos en otras investigaciones, donde en el sistema AZ91-10FA (FA:  $(Ca_{10}(PO_4)6F_2)$ ) indica una dureza (HV) de 86. <sup>[19]</sup> Para el caso del sistema Mg-20%  $Ca_7MgSi_4O_{16}$ , los investigadores reportan valores de dureza HV de  $64.05 \pm 5.8$ . <sup>[24]</sup>



**Figura 4.20** Dureza Vickers para los diferentes sistemas de estudio en comparación con la aleación de aluminio 7075 utilizada para la fabricación de cárter (indicada por la línea roja en la figura).

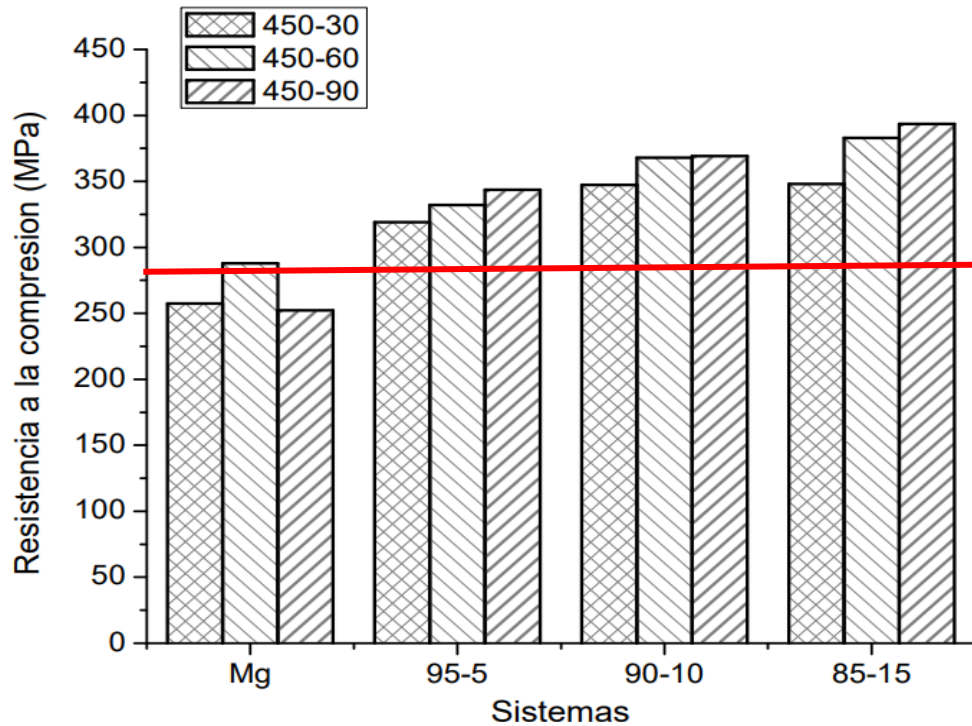
Continuando con la evaluación de propiedades mecánicas, se presenta la tabla 4.3 donde se observan los resultados de resistencia a la compresión de los diferentes sistemas Mg/DF. De acuerdo con los resultados, no solo el porcentaje de refuerzo que se añade a la matriz influye en la resistencia a la compresión, también el parámetro de tiempo de sinterización, a diferencia de en la dureza, tiene un efecto en la resistencia final, dado que existe un incremento de dicha propiedad conforme se aumenta la cantidad de refuerzo y tiempo de sinterización. A un tiempo de sinterizado de 30 min el sistema reforzado con 15% e.p de DF, tiene una resistencia a la compresión de 347.95 MPa, mientras que, a un tiempo de 60 minutos de sinterización, hay un crecimiento de esta propiedad del 10.07%. Para los sistemas reforzados con 5 y 10% e.p de desecho de la fundición hay un incremento de 4.04 y 5.97%, respectivamente. A 60 y 90 minutos de sinterización, no hay una gran variación en las resistencias de los sistemas como en la de 30 minutos. Sin embargo, todos los sistemas superan la resistencia mínima requerida para el cárter de aluminio la cual es de 276 MPa que se indica con una línea roja en la figura 4.21.

**Tabla 4.3** Resistencia a la compresión de los diferentes sistemas

Unidades	Sistema	Parámetros de sinterización: Temperatura (°C) – Tiempo (min)		
		450-30	450-60	450-90
MPa	Mg	257.49	288.34	252.33
	95-5	319.10	332.02	343.62
	90-10	347.28	368.71	369.19
	85-15	347.95	382.39	393.45

Los resultados de esta investigación se pueden comparar con otras investigaciones donde encontraron que la adición de cerámicos como la Hidroxiapatita (HAP) aumenta significativamente la resistencia a la compresión de la matriz de magnesio alcanzando valores de 388 MPa cuando el sistema contiene 15% en peso de HAP <sup>[29]</sup> e incluso superan las propiedad en comparación con otras investigaciones sobre compuestos de matriz de Mg reforzados con un 10% en peso de partículas de  $\text{Ca}_2\text{MgSi}_4\text{O}_{16}$ , la resistencia a la compresión medida fue de 135 MPa.<sup>[24]</sup>

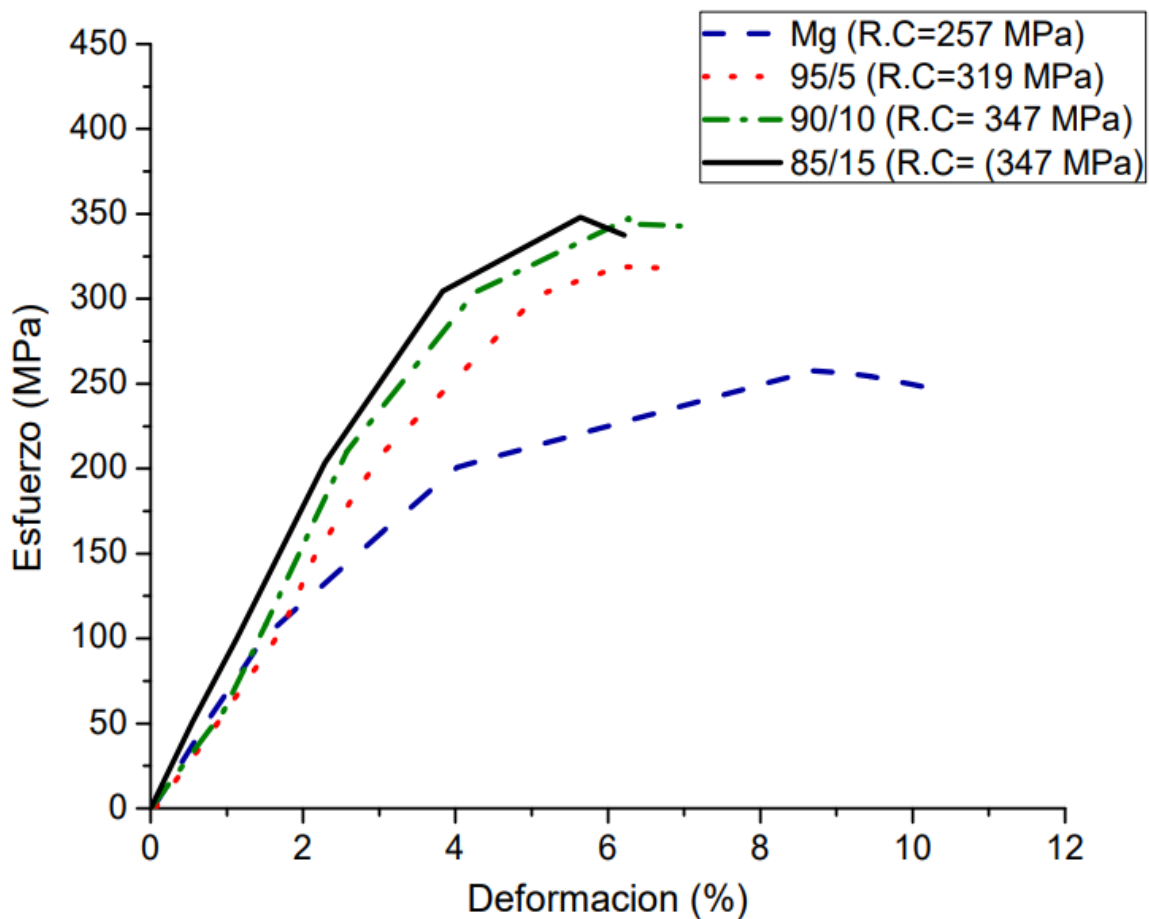




**Figura 4.21** Resistencia a la compresión de los diferentes sistemas de estudio en comparación con la aleación de aluminio 7075 utilizada para la fabricación de cárter (indicada por la línea roja en la figura).

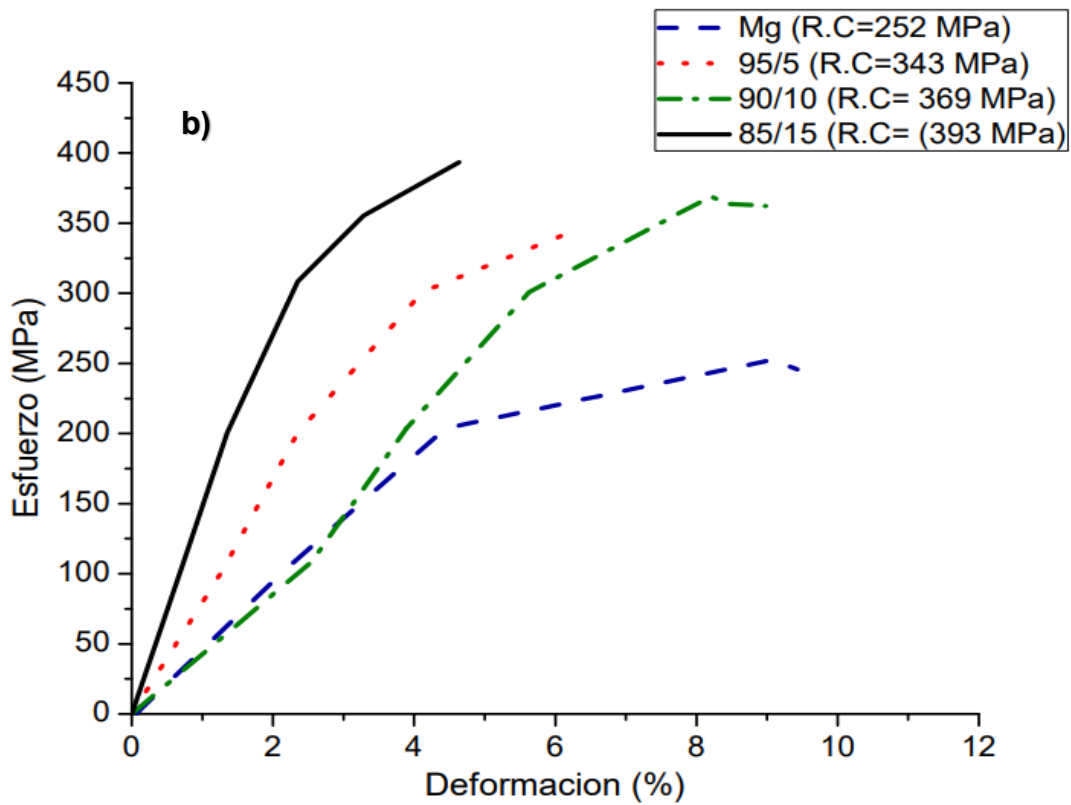
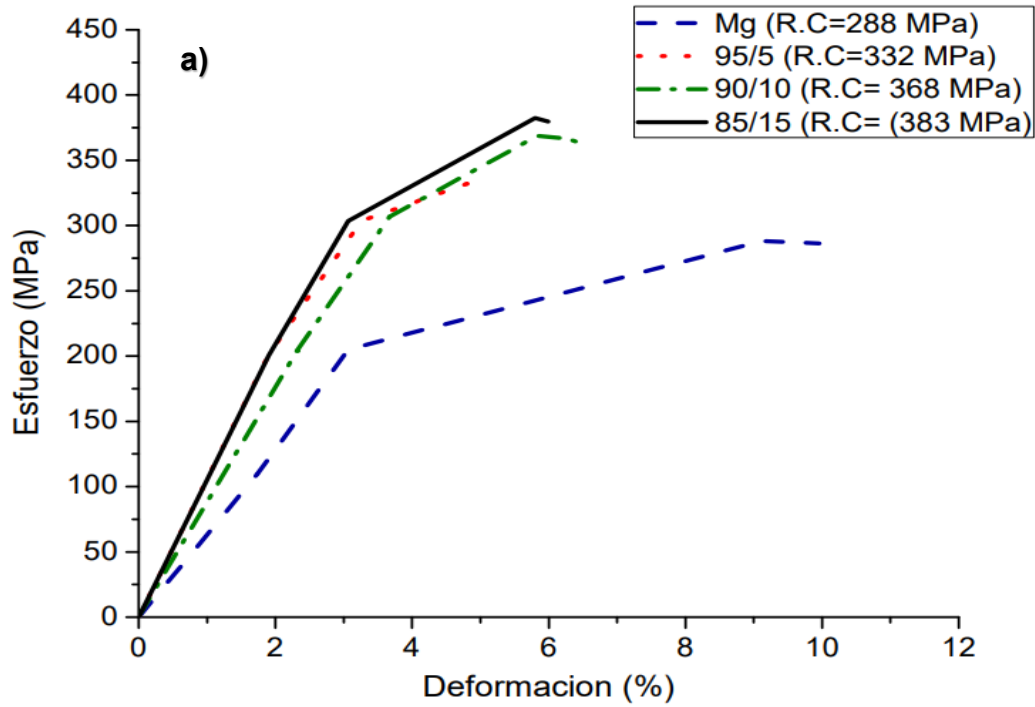
La resistencia a la compresión del compuesto Mg/DF se altera positivamente lo que puede estar asociado con la incorporación de las fases cerámicas *ex situ* (DF) e in situ (MgO) y al refinamiento de grano de la matriz, que pueden impedir el movimiento de dislocaciones, lo cual permite aumentar la resistencia a la compresión durante la deformación [72]. El resultado neto es un mecanismo de endurecimiento del compuesto. En este caso particular, es probable que la resistencia a la compresión está asociada con la presencia de la fase dominante pseudowollastonita (DF), y hasta cierto punto, la formación de MgO (ver figura 4.8). De acuerdo con la literatura, el  $\text{CaSiO}_3$  es considerado un cerámico que posee propiedades mecánicas relativamente altas, como resistencia a la compresión. [30] Por tanto, el uso de  $\text{CaSiO}_3$  tiene un efecto positivo en la resistencia a la compresión del material compuesto resultante, lo que indica que se puede considerar como un material de refuerzo con gran potencial para el refuerzo de la matriz de magnesio.

En general, los materiales compuestos Mg/DF presentan mejores propiedades mecánicas comparadas con el Mg, mientras la deformación a la fractura decrece entre un 40% como se puede ver en las figuras 4.22 y 4.23. La disminución de la deformación a la fractura se encuentra dentro de los rangos obtenidos en otras investigaciones y se continúa la investigación para nuevos materiales con alta resistencia y que la deformación sea mayor. [64]



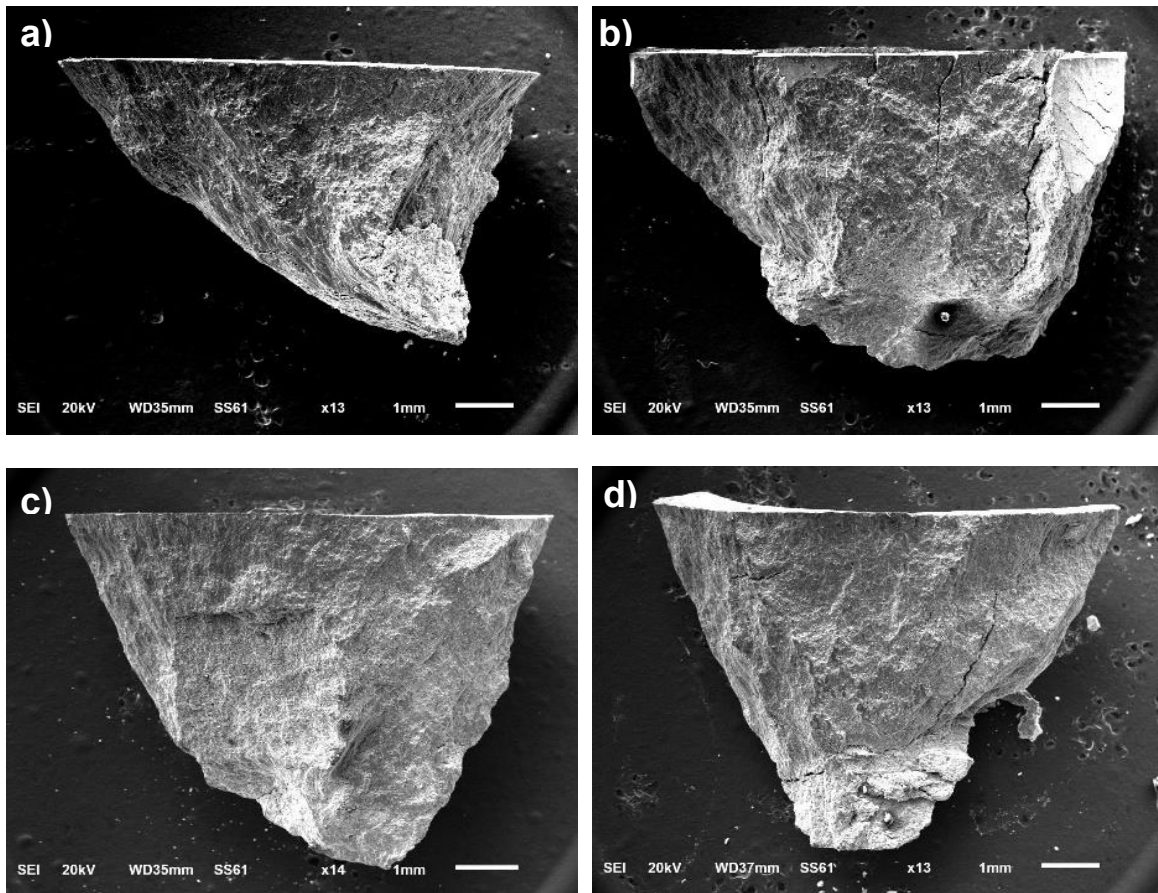
**Figura 4.22** Gráfica esfuerzo/deformación del sistema sinterizado a 450°C a 30 minutos de sinterizado





**Figura 4.23** Gráficas esfuerzo/deformación de los sistemas sinterizados a 450°C a diferentes tiempos: a) 60 minutos y b) 90 minutos.

La figura 4.23 muestra la superficie de fractura de los sistemas Mg y Mg/DF después de las pruebas de compresión. En general, las superficies de fractura presentan una inclinación a un ángulo de 45° con respecto a la dirección de la compresión. Estos resultados son similares con los obtenidos en la investigación de Q. B. Nguyen y col. [73] quienes determinan que la fractura se genera por poros ubicados preferentemente en la interfase de las partículas cerámicas y lo cual sugiere que sirven como sitios para iniciar la grieta en el material compuesto. Por su parte D. J. Towle y col. [74] indica que los modos de falla de materiales ensayados en compresión dependen de la naturaleza del material y de la relación entre la longitud (L) y diámetro (D) menores a la unidad, y que generan múltiples fracturas con ángulos de inclinación de 45°, lo cual es consistente con la presente investigación donde la relación L/D fue menor a la unidad.



**Figura 4.23** Fractografías por MEB de muestras fracturadas por compresión conteniendo a) 0%, b) 5%, c) 10% y d) 15% e.p. de desecho de fundición.

## V. CONCLUSIONES

A continuación, se presentan las conclusiones del proyecto de investigación:

- Fue posible acondicionar los polvos de Mg por molienda mecánica con tamaño promedio de partícula menores a 100  $\mu\text{m}$  con las condiciones de trabajo de: Relación carga bolas: 1:20, velocidad de molienda: 450 RPM y un tiempo de molienda: 4h. De acuerdo con el análisis químico por Espectroscopía de Absorción Atómica (AA) y Espectroscopía de Emisión Atómica (EEA) el magnesio con el que se trabajó en el presente proyecto contaba con una pureza del 99% antes de la molienda mecánica, sin embargo, la caracterización por MEB y DRX de los polvos de magnesio obtenidos después de la molienda, indicaron la presencia de la fase MgO, la cual, es producto de la reactividad del Mg con el oxígeno del ambiente durante el proceso de molienda.
- La obtención del compuesto por el proceso de aleado mecánico fue posible a una relación de carga 1:20 con una velocidad de 450 RPM a 3 horas de molienda ya que de acuerdo con los resultados de MEB, las partículas de refuerzo (DF) se encuentran homogéneamente distribuidas dentro de la matriz (Mg).
- Se logró obtener productos consolidados del compuesto metal/cerámico, mediante compactación axial con 4 toneladas de carga durante 10 segundos y sinterización a 450°C durante diferentes tiempos de permanencia (30, 60 y 90 minutos).
- Conforme se aumenta el porcentaje de refuerzo, el tamaño de grano disminuye, provocando un aumento en las propiedades mecánicas como la dureza y la resistencia a la compresión.
- La presencia de partículas de DF como refuerzo en la matriz de Mg aumentó la dureza hasta 92 HV en el sistema 85/15 lo cual corresponde a un aumento del 41% con respecto al Mg. En el caso de los sistemas 95/5 y 90/10 hay un

incremento del 37 y 38 % respectivamente. El tiempo de sinterizado no afecta en el resultado final de dicha propiedad.

- El tiempo de sinterización es un factor que afecta a la resistencia a la compresión, pues a mayores tiempos, la resistencia máxima aumenta, sin embargo, existe de igual forma un aumento en la deformación a esfuerzos bajos. Los sistemas que presentan mejores resultados de acuerdo con las gráficas esfuerzo deformación, son las sinterizadas a una temperatura de 450°C con un tiempo de permanencia de 60 minutos.
- La resistencia a la compresión aumenta a mayores porcentajes de refuerzo. Para la condición 450/60 (sinterización a 450°C con 60 minutos de permanencia), el sistema con 15% e.p. de refuerzo de desecho de la fundición, alcanza una resistencia de 383 MPa, incrementando un 33% con respecto al Mg, mientras que para los sistemas con 5 y 10% e.p. de refuerzo, incrementan un 15 y 28% respectivamente.
- El análisis fractográfico reveló que en el ensayo de compresión se generan múltiples fracturas, las cuales están orientadas a 45° con respecto al sentido de aplicación de la carga, estas fracturas son típicas de materiales frágiles como el Mg y de los compuestos Mg con refuerzo cerámico.

## VI. REFERENCIAS

- [1] Singh, C, Singh, J, “*Synthesis of Al–SiC composite prepared by mechanical alloying*”, IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering, Vol. 11, (2014), pp. 12-17.
- [2] Kawamori, S, Machida, T, “*Silicon carbide dispersion strengthening of magnesium using mechanical alloying method*”, Materials Transactions, Vol. 49, (2008), pp. 304-309.
- [3] Wagih, A, “*Effect of milling time on morphology and microstructure Al-Mg/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocomposite powder produced by mechanical alloying*”, International Journal of Advances in Engineering Science, Vol. 4, (2014), pp. 1-7.
- [4] Guleryuz, L, F, Ozan, S, Uzunsoy, D, Ipeck, R, “*Investigation of dry sliding wear behavior of B<sub>4</sub>C particulate reinforced Mg matrix composites*”, Acta Physica Polonica A, Vol. 123, (2013), pp. 488-489.
- [5] Han, Q, Setchi, R, Evans, S, L, “*Characterization and milling time optimization of nanocrystalline aluminium powder for selective laser melting*”, Int. J. Adv. Manuf. Technol., Vol. 88, (2016), pp. 1429–1438.
- [6] Du, X, M, Zheng, D, F, Liu, F, G, Chen, R, Q, “*Preparation and characterization of magnesium matrix composites reinforced with graphene nano-sheets*”, Journal of Non-Oxide Glasses, Vol. 9, (2017), pp. 25-32.
- [7] Yang X, Z, Wen, L, “*Microstructural and mechanical behavior of mechanical alloying intermetallic compounds between aluminum, magnesium and boron*”, Journal of Ceramic Processing Research, Vol. 14, (2013) pp. 583-586.
- [8] Dinaharan, I, Vettivel, S, C, Balakrishnan, M, Akinlabi, E,T, “*Influence of processing route on microstructure and wear resistance of fly ash reinforced AZ31 magnesium matrix composites*”, Journal of Magnesium and Alloys, Vol. 7, (2019), pp. 155-165
- [9] Friedrich, H, E, Mordike, B, L, “*Magnesium Technology: Metallurgy, Design Data, Applications*”, First Edition, Springer, (2006), pp. 13-16.
- [10] Nayeb-Hashemi, A, A, Clark, J, B, “*Phase Diagrams of Binary Magnesium Alloys*”, ASM International, Materials Park, (1988), pp. 4-222.

- [11] Paucar, M, “*Comportamiento a la corrosión de aleaciones Mg-Al con elementos lantánidos*”, tesis, (2003), pp. 7-9.
- [12] Mordike, B, L, Ebert, T, “*Magnesium. Properties – applications – potential.*” Materials Science and Engineering, Vol. 302, (2001) pp. 37-45.
- [13] Ballerini, G, Bardi, U, Lavacchi, A, Migliorini, D, “*Magnesium alloys for structural automotive applications*”, Joint Reserch Centre, (2001), pp. 150-200
- [14] Avedesian, M, M, Baker, H “*Magnesium and Magnesium Alloys*”, ASM Specialty Handbook, Materials Park, (1999), pp. 12-25.
- [15] Ostrovsky, I, Henn, Y, “*Present state and future of magnesium application in aerospace industry*”. International Conference, ASTEC’07, (2007), pp. 19-22.
- [16] Polmear, I, “*Light alloys. From traditional alloys to nanocrystals*”, Elsevier Butterworth-Heinemann, Vol. 4, (2005), pp. 100-320.
- [17] Gambogi, J, “*Mineral commodity summaries*”, U.S. Geological Survey, Vol. 4 (2013), pp. 196.
- [18] Helgen, L, “*Mg Showcase*”, International Magnesium Association, Vol. 4, (2007), pp. 23.
- [19] Haghshenas, M “*Mechanical characteristics of biodegradable magnesium matrix composites: A review*”, Journal of Magnesium and Alloys, Vol. 5, (2017), pp. 189-201.
- [20] González, S, Pellicer, E, Fornell, J, Blanquer, A, Barrios, L, Ibañez, E, Solsona, P, Suriñach, S, Baró, D, Nogués, C, Sort, J, “*Improved mechanical performance and delayed corrosion phenomena in biodegradable Mg-Zn-Ca alloys through Pd-alloying*”. Journal of the Mechanical Behaviour of Biomedical Materials, Vol. 6, (2012), pp. 53-62.
- [21] Tharumarajah, A, Koltun, P, “*Is there an environmental advantage of using magnesium components for light-weighting cars*”, Journal of Cleaner Production, Vol. 15, (2007), pp. 1007- 1013.



- [22] Kim, J, J, Han, D, S, “*Recent developments and applications alloys in the Hyundai and Kia motors corporation*”, Materials transactions, Vol. 49, (2008), pp. 894-897.
- [23] Murthy, K, V, Girish, D, P, Keshavamurthy, R, Varol, T, Koppad, P, G, “*Mechanical and thermal properties of AA7075/TiO<sub>2</sub>/Fly ash hybrid composites obtained by hot forging*”, Progress in Natural Science: Material International, Vol. 27, (2017), pp. 474-781.
- [24] NaddaDezfuli, S, Huan, Z, Mol, J, M, Leeflang, S, Chang, J, Zhou, J, “*Advanced bredigite-containing magnesium-matrix composites for biodegradable bone implant application*”, Materials Science and Engineering, Vol. 79, (2017), pp.647-660.
- [25] Espinoza,G, Guillen, J, Mena, L, Torres, G, “*Diseño y construcción de un cárter seco para un motor honda 600 cc utilizado en competición*”, Departamento de ciencias, pp. 1-14.
- [26] Weaving, J, H, “*Internal Combustion Engineering: Science & Technology*”, Elsevier Science, (1990), pp. 68-96.
- [27] Fierro, E, V, Alvarez Villar, N, Wenger, E, Ansaldi, A, Gabarain, R, “*Estimacion de propiedades mecánicas de chapa de acero inoxidable 304L mediante ensayos SPT*” Revista materia, Vol. 23, (2018), pp. 1-7.
- [28] Alba Cruz, O, F, “*Estudio de la influencia del tiempo y temperatura de envejecido en la microestructura y propiedades mecánicas de tensión y dureza para el aluminio AA2024-T0 y AA7075-T0.*” Facultad tecnológica, (2015), pp. 1-13.
- [29] Lara Sánchez, J, F, Rodríguez Reyes, M, “*Estudio del reforzamiento de aleaciones de aluminio, con espumas cerámicas de escoria del horno de cubilote*”. Tesis, (2015).
- [30] Lara Sánchez, J, F, López, H, F, Rodríguez Reyes, M, Díaz Guillen, J, A, Parga Torres, R, “*Development of ceramic foams using cast iron slag as a raw material*”, Advances in Ceramic Science and Engineering, Vol. 5, (2016), pp. 11-19.
- [31] Ibañez, A, Sandoval, F, “*La wollastonita: propiedades, síntesis y aplicaciones cerámicas*” Cerámica y Vidrio, Vol. 6, (1993), pp. 349-361.

- [32] Palacio Hernández, L, A, "*Síntesis y caracterización de wollastonita vía sol gel con potencial aplicación como sustituto de hueso*" Tesis, (2013), pp. 12-20.
- [33] Besterici, M, Zubko, P, Hvizdos, P, "*Mechanical properties of phases in Al-Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> mechanically alloyed material measured by depth sensing indentation technique*", Materials Letters, Vol. 59, (2005), pp. 1971-1975.
- [34] Van Dyck, S, Froyen, L, Buekenhout, L, "*The influence of mechanical alloying on the synthesis of Ni<sub>3</sub> (Si, Ti) intermetallics*", Acta Mater., Vol.46, (1998), pp. 2831-2840.
- [35] Moral Borque, A, Nogueira López, B, "*Materiales de última generación y materiales eficientes: materiales compuestos – composites*", Máster Oficial en Proyecto de Arquitectura y Ciudad, ETSAG. UAH, (2007), pp. 237
- [36] Kramer, E, J, "*Processing of metals and alloys*", Materials Science and Technology, (1991), pp 193-245.
- [37] Da Costa, C, E, Velasco, F, Torralba, J, M, "*Materiales compuestos de matriz metálica. I parte. Tipos, propiedades, aplicaciones*", Revista de Metalurgia, Vol. 36, (2000), pp 179-192.
- [38] Suryanarayana, C, "*Mechanical alloying and milling*", Progress in Materials Science, Vol. 46, (2001), pp. 1-184.
- [39] Contreras Chacón, A, A "*Influencia del contenido de Ti sobre la resistencia mecánica de aleaciones Cu-Ti-C obtenidas por molienda reactiva y extrusión*" Tesis, (2014), pp1-68
- [40] Murra Fernandez, E, Rodriguez Reyes, M "*Estudio de parámetros de procesamiento para la elaboración de aleación Co-27Cr-5Mo*", Tesis, (2015), pp. 79
- [41] Mendoza, M, "*Dispersión de partículas reforzantes superficialmente modificadas y su efecto en las propiedades mecánicas y microestructurales de una matriz metálica*", Tesis, (2013), pp. 20-37.



- [42] Ruiz Navas, E, M, Da Costa, C, E, Velasco, F, Torralba, J, M, "*Aleación mecánica: Método de obtención de polvos metálicos y de materiales compuestos*", Rev. Metal Madrid, Vol. 36, (2000), pp. 279-286.
- [43] Lu, L, Lai, M, O, Zhang, S, "*Diffusion in mechanical alloying*", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 67, (1997), pp. 100-104.
- [44] Gilman, P, S, Nix, W, D "*The structure and properties of aluminum alloys produced by mechanical alloying: Powder processing and resultant powder structures*", Metallurgical Transactions A, Vol. 12, (1981), pp. 813-824.
- [45] Dagda Torres, A, Leal Quezada, L, "*Desarrollo de una síntesis de cristales porosos magnéticos para la extracción en fase sólida de arsénico*", Tesis, 2019.
- [46] Renau Piqueras, J, Faura, M "*Principios básicos del microscopio electrónico de barrido*" Tesis, (2000), pp. 77.
- [47] Ipohorski, M, Bozzano, P, B, "*Microscopía Electrónica de Barrido en la caracterización de materiales*" Ciencia e Investigación, Vol. 3, (2013), pp. 44-53.
- [48] Blake, A, J, Clegg, W, Cole, M, Evans, J, Main, P, Parson, S, Watkin, D "*Crystal structure analysis: principles and practice*". Oxford Science Publications, Vol. 2, (2009), pp. 30-380.
- [49] Dinnebier, R, E, Bilinge, S, L, "*Powder diffraction: theory and practice*", The Royal Society of Chemistry, V, 3, (2005), pp. 4-580.
- [50] Manals Cutiño, E, Penedo Medina, M, "*Análisis termogravimétrico y térmico diferencial de diferentes biomásas vegetales*" Tecnología Química, (2011), pp.36-43.
- [51] Lasanta Carrasco, I, "*Estudio de adiciones de bismuto en aleaciones zinc-aluminio*" Tesis, (2013), pp. 9-56
- [52] Skoog, D, A "*Principios de Análisis Instrumental*". Mc Graw Hill, (2002). pp. 45-50

- [53] González Garcés, J, Pino Sancho Fernández, M, “*Análisis de la distribución de tamaños de partícula mediante difracción láser: aplicación para la mejora de mezclas de especias y aromas*” Universidad politécnica de Valencia, (2016), pp.7.
- [54] Montalvo, A, “*Microscopia Óptica*”, Tecnología y ciencia, Vol. 2 (2010), pp. 18.
- [55] Hurtado Perez, R, “*Análisis comparativa de algoritmos de enfocamiento en imágenes para microscopia óptica*” Tesis, (2013), pp. 7-10
- [56] Reigoza Gomez, D, R, “*Estudio microestructural por microscopia óptica con técnicas de metalografía en un pistón de moto akt*” Tesis, (2017), pp. 7-14
- [57] Allen Tipler, P., Mosca G., “*Física para la ciencia y la tecnología*”, Reverté, Vol. 6, (2010), pp. 2-490.
- [58] Vite Terán, L. “*Principio de Arquímedes*”, UAEH, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Vol. 4, (2014), pp. 34
- [59] Kumar, J, Singh, D, Kalsi, N, S, Sharma, S, Pruncu, C, Pimenov, D, Venkateswara, K, Kaplonek, W, “*Comparative study on the mechanical tribological, morphological and structural properties of vortex casting processed, Al-SiC-Cr hybrid metal matrix composites for high strength wear-resistant applications: Fabrication and characterizations*” Elsevier, (2020), pp. 13607-13615
- [60] Callister, W., “*Ciencia de materiales aplicaciones en ingeniería*”, Reverté, Vol. 2, (2009), pp. 114-144.
- [61] ASTM E112, Standard Test Methods for Determining Average Grain Size, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2010).
- [62] ASTM E384, Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2005).
- [63] ASTM E9-09, Método de prueba estándar de prueba de compresión de materiales metálicos a temperatura ambiente, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2009).

- [64] Aboudzadeh N, Dehghanian, Ch, Shokrgozar, M, A, “ Syntesis Microestructure and Mechanical Properties of Mg. 5Zn. 0.3Ca/nHA Nanocomposites”, Iranian Journal of Materials Science and Engineering, Vol. 14, No. 4, 2017, pp. 58-68.
- [65] Mohammad Khodaei, Farahnaz Nejatidanesh, Mohammad Javad Shirani, Alireza Valanezhad, Ikuya Watanabe, Omid Savabi, “*The effect of the nano- bioglass reinforcement on magnesium based Composite*”, Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, V. 100, (2019), pp. 1-6.
- [66] Mustafa Aydin, Cem Özgür, Osman San, “*Microstructure and hardness of Mg-based composites reinforced with Mg<sub>2</sub>Si particles*”, Rare Metals, V. 28, N. 4, (2009), pp. 396-400.
- [67] S. Tamang, P. Potaliya and S. Aravindan. “*Corrosión behaviour of magnesium-yttria composite sintered by microwave hybrid heating*”, Materials Research Innovations, V. 22, No. 7, (2018), pp. 422-426.
- [68] G. K. Meenashisundaram, M. H. Nai and M. Gupta, “*Effects of primary processing techniques and significance al Hall-Petch strengthening of the mechanical response of magnesium matrix composites containing TiO<sub>2</sub> Nanoparticulates*”, Nanomaterials, V. 5. (2015), pp1256-1283.
- [69] M.E. Alam, S. Han, Q.B. Nguyen, A.M. Hamouda, M. Gupta, “*Development of new magnesium-based alloys and their nanocomposites*”, Journal of Alloys and Compounds, V. 509, (2011), pp. 8522-8529.
- [70] L. Utrera, F, J, Perez, F, J Botana, M, Botana, Galvin, “*Estrategias en el análisis de muestras de materiales compuestos para la cuantificación de porosidad mediante análisis de imagen*”, AEMAC, Vol. 1, No. 1, pp. 167-168
- [71] D. A. Saá Sarria, “*Estudio experimental basado en la rugosidad superficial para la selección de herramientas y condiciones de corte en operaciones de refrentado en saco a baja velocidad de piezas de magnesio*”. Tesis, (2015), pp. 44-200
- [72] K.S. Tun, M. Gupta, “*Role of Microstructure and Texture on Compressive Strength Improvement of Mg/(Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Cu) Hybrid Nanocomposites*”, Journal of Composite Materials, V. 44, No. 25, (2010) pp. 3033-3050.

- [73] Q. B. Nguyen and M. Gupta. "*Enhancing compressive response of AZ31B magnesium alloy using alumina nanoparticulates*", Composites Science and Technology, V. 68, (2008), pp. 2185-2192.
- [74] D. J. Towle and C. M. Friend. "*Comparison of compressive and tensile properties of magnesium-based metal matrix composites*", Materials Science and Technology, V. 9, (1993), pp.35-41.
- [75] D, Prieto, Palacin, "*Estudio de la utilización de sistema tomográfico para análisis de porosidad*", Tesis, (2016), pp 28-30

## VII. ANEXOS

1. Presentación de conferencia en 40 Congreso Internacional de Metalurgia y Materiales con artículo titulado “CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL Y MECÁNICA DE COMPUESTOS DE MATRIZ DE MAGNESIO REFORZADOS CON PARTÍCULAS DE  $\text{CaSiO}_3$ ”



2. Presentación en 40.5 Congreso Internacional de Metalurgia y Materiales, con artículo titulado “DESARROLLO DE COMPÓSITOS Mg/CaSiO<sub>3</sub>+MgO UTILIZANDO ESCORIA METALÚRGICA POR METALURGIA DE POLVOS”



Instituto Tecnológico de Saltillo

Saltillo, Coahuila a 30 de abril de 2021

**Estimado(a) Autor(a):**

El Comité Revisor de la edición especial de las Memorias del 40.5 Congreso Internacional de Metalurgia y Materiales se complace notificar que el trabajo “**DESARROLLO DE COMPÓSITOS Mg/CaSiO<sub>3</sub>+MgO UTILIZANDO ESCORIA METALÚRGICA POR METALURGIA DE POLVOS**” ha sido **ACEPTADO** para publicarse.

Sin otro particular por el momento se agradece la participación activa en la presente edición.

**ATENTAMENTE**  
Excelencia en Educación Tecnológica.

**DR. ESTEBAN SÁNCHEZ VALDÉS**  
**ORGANIZADOR GENERAL**

ccp. Archivo



Bvd. Venustiano Carranza No. 2400, Col. Tecnológico,  
C.P. 25280, Saltillo, Coahuila, Tel/Fax: 844 438-95-00  
www.itn.mx

RAC 01-05-11  
Rev. 15

