

**SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE UN MATERIAL COMPUESTO DE MATRIZ
DE MAGNESIO Y ESFERAS HUECAS DE CARBURO DE SILICIO**

**LUIS ENRIQUE OCHOA CORZO
WILSON JAIR VILLAMIZAR CELIS**

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

2018

**SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE UN MATERIAL COMPUESTO DE MATRIZ
DE MAGNESIO Y ESFERAS HUECAS DE CARBURO DE SILICIO**

**LUIS ENRIQUE OCHOA CORZO
WILSON JAIR VILLAMIZAR CELIS**

**Trabajo de grado (proyecto de investigación) para optar al título de
Ingeniero Metalúrgico**

**Director
MILTON MANRIQUE GALLARDO
Doctorado en Metalúrgia**

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

2018

DEDICATORIA

A mi madre Claudia Ochoa, mis hermanos José Gabriel y Ana Milena, mi tío Ismael Ochoa por su cariño y apoyo incondicional.

A mi familia, de la cual recibí siempre una motivación constante para poder culminar mis estudios profesionales.

A mis compañeros y amigos que de una u otra forma hicieron parte del desarrollo de este gran trabajo.

Luis Enrique Ochoa Corzo

A Dios, por iluminarme y bendecirme con su sabiduría, por llenarme de valor y perseverancia para luchar por mis sueños.

A mis padres Wilson Villamizar Angarita y Luz Mary Celis Esparza, mi hermana Laura Katherine Villamizar Celis por su cariño y apoyo incondicional.

A mi familia, por sus palabras de aliento que han contribuido en mi vida y que han sido partícipes de este gran logro.

A todas aquellas personas, compañeros y amigos, que aportaron gran parte de su conocimiento para hacerme crecer como ser humano, y como profesional durante estos años de preparación.

Wilson Jair Villamizar Celis

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Industrial de Santander por abrirnos las puertas a este hermoso mundo del conocimiento.

Al profesor Milton Manrique Gallardo, director del proyecto y docente de la escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, por su confianza, colaboración, formación académica y apoyo durante la ejecución de este proyecto de grado.

A todos los profesores de la escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales que nos brindaron sus conocimientos durante el transcurso de nuestra formación, quienes nos hicieron crecer como personas y nos aportaron un grandioso conocimiento.

A Dionisio Antonio Laverde Cataño, director general del grupo de Investigación GIMBA, a la tecnóloga Yuri López y a la ingeniera Stefanie quienes estuvieron atentas a nuestras inquietudes en los laboratorios del Grupo GIMBA. Al profesor Henri Gauthier Gilles, a la profesora Martha Niño junto con el estudiante Sebastián. Al profesor Carlos Chacón del Laboratorio de Microscopía Electrónica PTG. Al profesor José Antonio Henao del Laboratorio de Difracción de rayos X cuya asesoría fue fundamental en la caracterización de las muestras durante el desarrollo del proyecto. A los técnicos Mario Alberto Navarrete, Javier, Domingo y Ambrosio Carrillo por su colaboración efectiva en la preparación de los materiales precursores y en la determinación de las propiedades mecánicas de las muestras.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	15
1. ANTECEDENTES	17
2. OBJETIVOS.....	23
2.1 OBJETIVO GENERAL	23
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	23
3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	24
3.1 SÍNTESIS DE NANOESFERAS DE CARBÓN AMORFO.....	24
3.2. SÍNTESIS DE NANOESFERAS DE CARBURO DE SILICIO	25
3.2.1. Método 1.....	25
3.2.2. Método 2: sales binarias.....	25
3.3 SÍNTESIS DEL MATERIAL COMPUESTO: MAGNESIO REFORZADO CON NANOESFERAS HUECAS DE CARBURO DE SILICIO.....	27
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	28
4.1 SÍNTESIS DE NANOESFERAS DE CARBÓN AMORFO.....	28
4.2 SÍNTESIS DE NANOESFERAS DE CARBURO DE SILICIO	29
4.3 SÍNTESIS DEL MATERIAL COMPUESTO: MAGNESIO REFORZADO CON NANOESFERAS HUECAS DE CARBURO DE SILICIO.....	31
4.3.1 Medición de densidades.....	33
4.3.2 Análisis de microdureza.....	35
5. CONCLUSIONES	37
6. RECOMENDACIONES.....	38

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	39
BIBLIOGRAFIA.....	42
ANEXOS	45

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Sistema experimental para la síntesis de nanoesferas de carbón amorfo.....	24
Figura 2. Mecanismo de Fabricación de nanoesferas de SiC. Método de sales..	26
Figura 3. Micrografía SEM a 10000X, esferas de carbón amorfo sin tratamiento de ultrasonido.....	28
Figura 4. Micrografía SEM a 10000X, esferas de carbón amorfo tratadas con ultrasonido de alta frecuencia.	29
Figura 5. Micrografía SEM. Nanoesferas huecas de SiC (aglomeradas) obtenidas después del proceso de calcinación.	30
Figura 6. Micrografía SEM. Magnesio-5% esferas huecas-SiC 80X.	31
Figura 7. Micrografía SEM. Magnesio-5% SiC tomada a 4000X.....	32
Figura 8. Micrografía Magnesio 1% en volumen de esferas huecas de SiC. Tomada a 100X.....	33
Figura 9. Datos de micro dureza de compuestos de Mg-SiC.....	36

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Densidad de los compuestos Mg-esferas huecas/SiC.....	34
Tabla 2. Densidades de aleaciones más comunes de Magnesio.	35

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A.1: Sem-eds carburo de silicio después de calcinación	45
Anexo A.2: Sem-eds material compuesto mg- esferas huecas sic	45
Anexo B: Sem-eds de la barra de magnesio.....	46
Anexo C: Aleaciones más comunes de magnesio	47
Anexo D: Difractograma DRX carburo de silicio	48

RESUMEN

TÍTULO: SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE UN MATERIAL COMPUESTO DE MATRIZ DE MAGNESIO Y ESFERAS HUECAS DE CARBURO DE SILICIO*.

AUTORES: OCHOA CORZO, LUIS ENRIQUE Y VILLAMIZAR CELIS, WILSON JAIR**.

PALABRAS CLAVE: Síntesis, reforzante, matriz, material compuesto, esferas huecas, carburo de silicio, fracción volumétrica, polvo de magnesio.

DESCRIPCIÓN: La tecnología actual en el transporte terrestre tiende a reducir el consumo de combustible y a minimizar la contaminación ambiental por las emisiones de los motores de combustión interna. Igualmente, la industria aeroespacial reduce el peso de sus vehículos continuamente, utilizando materiales estructurales livianos de alto desempeño. Las aleaciones de magnesio y de aluminio son de las más livianas disponibles en el mercado, no obstante, sus propiedades mecánicas limitan su aplicación en la industria del transporte en general. Una de las tecnologías más avanzadas para mejorar las propiedades mecánicas de las aleaciones livianas, consiste en la adición de materiales reforzantes a base de cerámicas y de las diversas formas del carbón, obteniendo un material compuesto de matriz metálica. Estos materiales combinan la ductilidad y tenacidad de la matriz metálica con la alta resistencia y rigidez del material reforzante.

En esta investigación se estudia la síntesis y caracterización de un material compuesto de matriz metálica de magnesio reforzado con esferas huecas de carburo de silicio. La tecnología del polvo se usó para preparar las muestras compuestas mezclando polvo de magnesio con las esferas de nano carburo de silicio, presionando esta mezcla usando una prensa hidráulica para obtener pastillas cilíndricas de 1,3 cm. diámetro por 5 cm. espesor y sinterizarlos a 615 °C en atmósfera de argón. El contenido de refuerzo utilizado fue: 1%, 3% y 5% por volumen. Las muestras se caracterizaron por el uso de tecnologías de Difracción de Rayos X y Microscopía Electrónica de Barrido SEM / EDS. La densidad y la dureza se midieron como propiedades mecánicas de los compuestos de Mg-SiC.

*Proyecto de grado (proyecto de investigación)

**Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales.

Director: M.sc. Milton Manrique Gallardo.

ABSTRACT

TITLE: SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF A COMPOSITE MATERIAL OF MAGNESIUM MATRIX AND HOLLOW SILICON CARBIDE SPHERES*.

AUTHORS: OCHOA CORZO, LUIS ENRIQUE Y VILLAMIZAR CELIS, WILSON JAIR**.

KEYWORDS: Synthesis, reinforcing, matrix, composite material, hollow spheres, silicon carbide, volumetric fraction, powder magnesium.

DESCRIPTION: Advanced materials technology in land transportation tends towards reduction of fuel consumption and air pollution by internal combustion engines emissions. The aerospace industry is reducing the vehicle weight using high performance light structural materials. The magnesium and aluminum alloys are light and available in the market however its use is limited due to its mechanical properties. Composite technologies are used to improve the mechanical properties of light alloys using ceramics and carbon based materials as reinforcement for the metallic matrix. These materials combine the ductility and toughness of the metallic matrix and the high strength and stiffness of the reinforcement material.

In this research the synthesis and characterization of a metal matrix composite material of magnesium reinforced with silicon carbide hollow spheres is studied. The powder technology was used to prepare the composite samples by mixing magnesium powder with the silicon carbide Nano spheres, pressing this mixtures using a hydraulics press to get cylindrical pellets 1.3 cm. diameter by 5 cm. thickness and sintering them at 615 °C in Argon atmosphere. The reinforcement content used was: 1%, 3% and 5% by volume. The samples were characterized by using X-Ray Diffraction and Scanning Electron Microscopy SEM/EDS technologies. The density and hardness were measured as mechanical properties of the Mg-SiC composites.

*Degradate Project (research Project)

**Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales.

Adviser: M.sc. Milton Manrique gallardo.

INTRODUCCIÓN

La tecnología de los materiales compuestos es una de las áreas que más se ha estudiado en las últimas décadas y se desarrollaron con el fin de obtener propiedades difíciles de conseguir en un material monolítico. Para diseñar un componente es necesario tener en cuenta propiedades tales como rigidez, resistencia mecánica, dureza, entre otras; con el menor peso posible a un costo mínimo. El mejor material es aquel que posee el perfil de propiedades que más se acerca a aquellas definidas por el diseño.

En la actualidad existen materiales con excelentes propiedades mecánicas utilizados en la industria aeronáutica, automotriz y naval, pero su problema principal es su elevado peso, lo que conlleva a un mayor gasto energético, consumo de materia prima y mayor contaminación ambiental. Por ello surge la necesidad de estudiar otro tipo de materiales que sean diferentes a las aleaciones más comunes, y por ende es allí donde se hace énfasis en el desarrollo de materiales compuestos, que tienen más de una fase para adecuar dichas propiedades a materiales que sean más livianos, de alta resistencia mecánica con el fin de reducir el consumo de combustible, las emisiones de CO₂ y por consiguiente reducir los costos de transporte en el país. Por esta razón se requiere diseñar un material que cumpla con las necesidades mencionadas anteriormente. En este caso se estudiará el comportamiento de un metal como el magnesio, que es más liviano que el aluminio; cuya densidad es de 1.74 g/cm³ y es uno de los elementos más abundantes en la corteza terrestre. Cabe resaltar que la resistencia a la corrosión es baja, sin embargo cuando funciona como matriz en un material compuesto al ser sinterizado esta propiedad deja de ser una desventaja.

El magnesio, con una densidad 35% menor que la del aluminio es usado como material estructural en aplicaciones de ingeniería que requieren propiedades

mecánicas específicas. Los sectores de la economía electrónica, aeronáutica, automovilística y deportiva, están buscando activamente los materiales a base de magnesio. Una de las principales limitaciones de Mg y sus aleaciones es su bajo módulo elástico, el cual puede mejorarse mediante el uso de partículas de cerámica duras y rígidas como material de refuerzo, junto con una selección rigurosa del tipo, tamaño y la fracción de volumen de refuerzo, para mejorar las características tribológicas, la estabilidad dimensional, la capacidad de amortiguación y las propiedades de fluencia a alta temperatura.

Para lograr este objetivo, se deben sintetizar los materiales compuestos con una buena integridad interfacial, con el uso de tamaños de grano fino (que para el caso del Mg estará en un rango de tamaños de micrones), junto con nanoesferas huecas de SiC altamente procesadas a partir de sacarosa. Además será necesario ajustar otros factores como los tiempos, la temperatura, la presión de cada etapa del proceso de sinterización, a fin de permitir una transferencia efectiva de carga de la matriz hacia el refuerzo; en condiciones de tracción o compresión. Mientras que, si se tiene una unión inadecuada entre la matriz metálica y el refuerzo cerámico, o si existe la presencia de productos de reacción indeseables cerca de la interfaz o sobre ella, estos podrían ser los principales factores que pueden conducir a materiales compuestos de baja calidad.

1. ANTECEDENTES

A los materiales compuestos de matriz metálica, también conocidos por sus siglas en inglés "(MMC)", podrían incluirse dos grandes familias de materiales: aquellos materiales destinados para aplicaciones de corte y desgaste (carburos cementados, aceros reforzados con carburos, etc.) y aquellos materiales de alta rigidez, resistencia y módulo específico, normalmente destinados para aplicaciones estructurales en la industria automotriz o aeronáutica. El primer grupo de materiales se basa en matrices de metales de transición (Cobalto, Hierro, Níquel) y el segundo en aleaciones ligeras (base Aluminio, Titanio, Magnesio) [1, 2].

Existe actualmente un gran interés en los materiales livianos de alto desempeño, lo cual ha incrementado significativamente las actividades de investigación en el área de los materiales compuestos [3, 4, 5]. Uno de los tópicos de interés reciente es el desarrollo de materiales compuestos multifuncionales que presentan más de una propiedad, además de tener una baja densidad. Entre los diferentes materiales que conforman la matriz, las aleaciones de magnesio y aluminio son las más utilizadas debido a su peso liviano, su resistencia a diversos ambientes y sus propiedades mecánicas, tales como el módulo específico, resistencia, tenacidad y resistencia al impacto. Además, su punto de fusión es suficientemente alto para diversas aplicaciones y conveniente para el procesamiento de los materiales compuestos. En las industrias aeronáutica, automotriz y de deportes aumenta la demanda de materiales compuestos de matriz metálica de alto desempeño [6, 7, 8]. La ventaja más importante de los materiales compuestos de matriz metálica, comparados con las aleaciones monolíticas es su habilidad para adaptarse a las necesidades específicas de diseño. La densidad, la resistencia específica, la tenacidad, la resistencia al desgaste, el coeficiente de fricción, la dureza, la conductividad térmica, el coeficiente de expansión térmica, la absorción de

energía y la capacidad de amortiguación de los materiales compuestos, se pueden adaptar fácilmente por medio de la selección de la forma, el tamaño, el contenido y la distribución del material reforzante.

Los materiales compuestos de matriz de magnesio se han desarrollado de acuerdo con criterios similares a los de las aleaciones de aluminio. El magnesio es el más ligero de los metales estructurales siendo, aproximadamente, un 35 % más ligero que el aluminio. El magnesio está presente en una gran gama de aleaciones y es relativamente fácil de colar. Además, las propiedades mecánicas y rigidez de los Mg-MCs son comparables con los materiales de base aluminio y no sorprende los muchos esfuerzos que se invierten en el desarrollo del magnesio. Sin embargo, las propiedades frente a la corrosión de este material son pobres. Este problema se puede minimizar mediante técnicas de pintura y recubrimiento. Avances recientes en la tecnología de Mg- MCs, con matrices de alta pureza, han mejorado sustancialmente las características de corrosión de los Mg-MCs. Pese a todo no se utilizan en ambientes muy corrosivos. En la actualidad, los recubrimientos galvánicos mejoran la velocidad de corrosión del material reforzado con carbono, pese a que las fibras pueden separarse de la matriz [9, 10].

En el caso de materiales compuestos de matriz de magnesio reforzados con partículas de SiC, se ha determinado el carácter adhesivo de unión entre los componentes. Ese tipo de unión interna está relacionada con una alta humectabilidad de SiC con el Mg fundido, una similitud geométrica distinta entre los componentes, y una muy alta estabilidad de SiC en Mg líquido. Sin embargo, debe tenerse en cuenta, que una selección inadecuada de los parámetros del proceso durante la producción y la presencia de elementos de aleación inhibiría la formación de la unión adhesiva entre la matriz de Mg y partículas de SiC [11].

El Carburo de Silicio actúa como un prometedor material de refuerzo en la matriz de metal compuesto debido a sus propiedades mecánicas adaptables tales como

alta dureza y resistencia. Se han realizado numerosos estudios sobre compuestos de matriz de Mg reforzados con partículas de micro-SiC. Se prepararon compuestos de matriz AZ91 reforzados con partículas de SiC submicrométricas (0,2 μm) usando el método de colada por agitación de Deng. [12]. Como los lingotes fundidos fueron forjados, extruidos y probados mecánicamente. La caracterización de la microestructura mostró una distribución uniforme de micro partículas de SiC, refinamiento del grano y la presencia de una pequeña cantidad de porosidad. Tanto el límite elástico del 0,2% como la resistencia a la tracción final comenzaron a aumentar con el incremento del contenido de SiC y alcanzaron su máximo valor cuando el contenido de SiC fue del 2% en volumen. Después de esta cantidad de refuerzo, el límite elástico del 0.2% y la resistencia última a la tracción comenzaron a disminuir debido a la aglomeración de partículas de SiC. Pero la micro dureza y el módulo elástico aumentaron continuamente con la adición de partículas submicrométricas de SiC.

Se cree que las partículas de SiC de tamaño nano darían propiedades mejoradas incluso después de la adición de una fracción de refuerzo de pequeño volumen. Estudios previos indican que el nano-SiC proporciona un mejor refinamiento del grano en comparación con el refuerzo de micro partículas de SiC en la matriz de Al [13].

Ferkel et al. De nuevo se usó el método de pulvimetalurgia para fabricar compuestos de matriz de magnesio reforzados con nanopartículas de SiC [14]. Se mezclaron 3% en volumen de nanopartículas de SiC (que tenían un tamaño de partícula de 30 nm) con partículas de Mg (que tenían un tamaño de partícula de 40 μm) durante 8 horas a 200 rpm usando un mezclador movido asimétrico. Luego, los polvos se molieron con bolas durante 8 horas en un molino de bolas planetario. A continuación, los polvos compuestos se encapsularon en un recipiente de vacío, se desgasificaron y se extruyeron a una temperatura de 350 °C. Para propósitos de comparación, el Mg puro también se fabricó de la misma manera. La

microscopía óptica mostró un tamaño medio de partícula de 20 μm para magnesio puro y 1 μm para muestras de Mg-3% nano SiC. El Mg-3% nano SiC molido exhibió menores velocidades de fluencia y un gran esfuerzo de flujo en comparación con el Mg puro.

Los compuestos de matriz de Mg reforzados con Nano-SiC se prepararon mediante colada con la ayuda del método de cavitación ultrasónica de alta intensidad según Jan. [15]. El porcentaje de nano-SiC, que tiene un diámetro promedio de 30 nanómetros, se mezcló con una aleación AZ91D con la ayuda de un transductor ultrasónico. Las imágenes SEM de alta resolución mostraron una distribución casi uniforme y buena dispersión de partículas de SiC en el material compuesto. Pero algunos conglomerados (menos de 300 nm) también estaban presentes en la matriz AZ91 D. El análisis EDS mostró la presencia de Mg₂Si que se debió a la oxidación parcial de nanopartículas de SiC. El valor de microdureza aumentó con el incremento de los contenidos de SiC y alcanzó una mejora del 75% después de la adición de 5% en peso de partículas de SiC en comparación con la aleación AZ91D pura.

Nuevamente, se usó la técnica de cavitación ultrasónica para dispersar 2% en peso de partículas de nano-SiC (que tienen un tamaño medio de 50 nm) en el cual se funden en la aleación de magnesio de Mg- (2,4) Al-1Si, según Gao.[16] La sonda ultrasónica se sumergió en la aleación fundida que contenía nanopartículas de SiC. Para producir los especímenes extensibles, la aleación se fundió en un molde permanente. En comparación con la aleación no reforzada, la resistencia a la tracción y la resistencia a la fluencia de los compuestos de aleación de Mg reforzados con SiC mejoraron significativamente mientras se conservaba la ductilidad de los nanocompuestos. Las imágenes SEM mostraron la presencia de algunos grupos de SiC en el material. Estos grupos se produjeron principalmente en los límites de los granos, mientras que la mayoría de las nanopartículas separadas se incrustaron dentro de los granos. La mejora de las propiedades

mecánicas se atribuyó a la distribución uniforme de nanopartículas de SiC, el refinado del grano y el efecto fortalecedor de las nanopartículas dispersas. También se descubrió que algunas de las partículas de Si reaccionaban con Mg y formaban Mg_2Si en la matriz.

En la técnica de PM, polvo de Mg y la cantidad requerida de refuerzos son cuidadosamente pesados y mezclados usando un molino de bolas planetario RETSCH PM-400 de 30 a 60 min a una velocidad de 200 rpm. Después de la mezcla, una prensa en frío o de prensa isostática en caliente (capacidad de 100 ton) se utiliza para producir un "verde compacto" (35 mm de diámetro y 40 mm de altura), que es aproximadamente 80% denso, y luego seguido por sinterización en horno microondas. En 2001, el Technische Universität Clausthal, de Alemania decide conocer el comportamiento de nanopartículas de SiC en una matriz de Mg utilizando la metalurgia en polvos más conocida como pulvimetalurgia. Las nanopartículas de SiC fueron generadas por reacción en fase gaseosa en un reactor de flujo inducido por láser y tenían un diámetro promedio de 30 nm. Con el fin de distribuir las nanopartículas en la matriz; el micro polvo de Mg con un diámetro de partículas de 40 μm fue mezclado en un molino de bolas junto con el polvo de carburo de silicio seguido por extrusión en caliente. Las propiedades mecánicas del nuevo material fueron investigadas por tracción pruebas y mediciones de fluencia y la microestructura de los materiales compuestos se examinaron por microscopía electrónica de transmisión (TEM). La facultad de Química de la UNAM en México DF estudió en el 2008 la Síntesis y caracterización microestructural de materiales compuestos de partículas de aleación de Al-Mg-SiC se reforzó con 10 vol.% de SiC con tamaño de partículas de 3 μm de diámetro mediante la técnica de vórtex distribución de refuerzo, se estudió la interacción de las partículas con la matriz metálica y las propiedades mecánica. La microestructura compuesta AlMg-SiC mostró una excelente distribución de las partículas de SiC en la matriz Al-Mg. Además, no se ha observado ninguna evidencia de reacciones químicas secundarias. Por lo tanto, las propiedades

mecánicas son muy sensibles a la microestructura y estas son indirectamente relacionadas con los parámetros de solidificación y condiciones de procesamiento. Aleación de Al-Mg poseen un peso ligero y excelentes propiedades como materiales estructurales que se pueden optimizar con adición partículas de SiC y una buena técnica de fabricación. El material compuesto de AlMg-SiC se fabricó por el método de vórtex con partículas distribuidas homogéneamente. El examen microestructural de los materiales compuestos producidos bajo estado óptimo mencionado anteriormente muestra que la distribución de refuerzo de partículas es homogénea y no se observaron productos por reacciones químicas secundarias en la interfaz SiC / matriz. [17]

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

- Desarrollar un material compuesto en una matriz de magnesio y nano esferas huecas de carburo de silicio teniendo en cuenta la pulvimetalurgia.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar el tamaño de partícula, temperatura de sinterización, presión, tiempo necesario durante el proceso de fabricación.
- Analizar el tamaño de grano y forma, las características morfológicas y distribución de partículas de SiC, la presencia de porosidad, y la integridad interfacial de las partículas de SiC con la matriz de magnesio.
- Comparar las propiedades mecánicas del material compuesto obtenido con los diferentes materiales que actualmente son más utilizados en las industrias automotriz, aeronáutica y naval.

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.1 SÍNTESIS DE NANOESFERAS DE CARBÓN AMORFO

Para la síntesis de nanoesferas de carburo de silicio se utilizan como precursores nanoesferas de carbón amorfo, las cuales se sintetizan por medio de la disolución de sacarosa en agua para formar una solución cristalina. Esta solución se lleva a una autoclave recubierta de teflón como se muestra en la Fig.1, y se mantiene a una temperatura de 170-200 °C durante 6-8 horas. El producto se somete a centrifugado, lavado y re-dispersado en agua caliente, acetona y etanol respectivamente, repitiendo el ciclo varias veces. El producto final se lleva a secado en una estufa marca GEMMYCO a 100 °C por una hora y posteriormente a 200 °C por 2 horas. El diámetro de las esferas de carbón amorfo obtenidas, está en el intervalo de (500-1000 nm) es posible controlar su tamaño por medio de la temperatura del proceso de carbonización, el tiempo de reacción y la concentración inicial de sacarosa en solución acuosa. [21]. Las nanoesferas de carbón amorfo en alcohol isopropílico se sometieron a ultrasonido de alta frecuencia en un equipo SONICS VIBRA-CELL, con amplitud de 40%, temperatura 25 °C, durante dos horas, para disgregar pequeños cúmulos o racimos de nanoesferas de carbón amorfo, logrando así una mejor dispersión de las partículas. Esta suspensión se llevó a secado a 50 °C durante 12 horas en una estufa Memmert con el fin de eliminar la humedad y el alcohol de la muestra.

Figura 1. Sistema experimental para la síntesis de nanoesferas de carbón amorfo.



3.2. SÍNTESIS DE NANOESFERAS DE CARBURO DE SILICIO

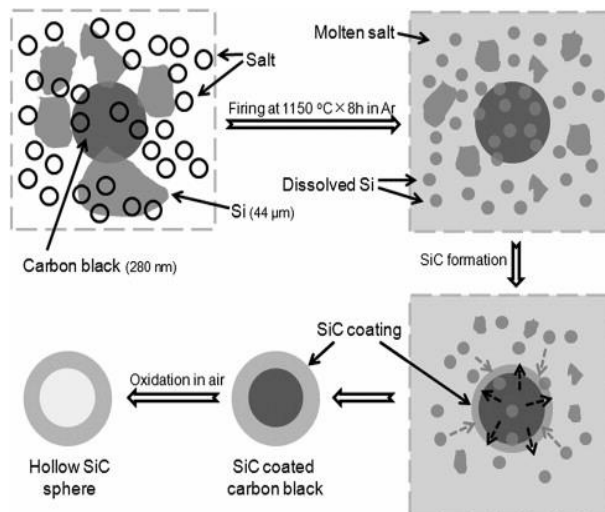
3.2.1. Método 1. Las nanoesferas de carbón amorfo obtenidas en la etapa anterior se mezclaron con silicio metálico en polvo con tamaño promedio de 50 μm y una pureza de (99% Sigma-Aldrich), en un molino rotatorio con recipiente cerámico de laboratorio, durante 4 h. Esta mezcla se colocó en un crisol de grafito y se llevó a un horno tubular de alta temperatura y se sometió a calentamiento, en atmósfera de Argón, a una velocidad de 3°C /min hasta alcanzar una temperatura de 1300°C durante un tiempo de 8 horas. El espesor de la carcasa de SiC depende del tiempo del proceso. El flujo de Argón fue de 250 cm^3/min . El polvo de SiC resultante (conformado por nanoesferas de SiC con núcleo de carbón amorfo) fue tratado con solución **HF – HNO₃** 1:3 cuatro veces, luego filtrado y lavado con agua con el fin de eliminar el silicio remanente que no reacciono con el carbón y con destilada cuatro veces para su posterior secado en una estufa Memmert a 100°C por 12 h. Finalmente, este material se llevó a calcinación en aire a 700°C por 2 h en una mufla marca Terrígeno, para oxidar el núcleo de carbón amorfo y así conformar las nanoesferas huecas de SiC. [21]

3.2.2. Método 2: sales binarias. Las nanoesferas de carbón amorfo sintetizadas en la etapa 2 se mezclan con alcohol isopropílico y se someten a dispersión en ultrasonido de alta intensidad durante dos horas, se mezclan con silicio metálico en polvo (50 μm , 99% pureza, Sigma-Aldrich) en una relación molar 4:1 Si-Carbón amorfo. La mezcla se combina con una sal binaria NaCl-NaF en un molino de bolas con el fin de bajar la temperatura del proceso, generando una mayor disolución y formación de carburo de silicio en la superficie de las esferas de carbón amorfo. Esta mezcla se coloca en un crisol de grafito con tapa y se introduce en un horno a 1150°C en atmósfera inerte de Argón durante 8 horas. Después de este tratamiento la mezcla solidificada se lava repetidamente con agua destilada caliente, para remover la sal residual. Las nanoesferas de carbón amorfo recubiertas con carburo de silicio, resultantes del proceso, se llevan a

secado a 120°C durante 12 horas. Para eliminar el silicio que no reaccionó con el carbón amorfo se hicieron 5 lavados con una solución de soda cáustica (NaOH) al 40% en peso, el producto se lavó varias veces con agua destilada y se llevó a secado a 120 °C en una estufa Memmert durante 12 horas.

Finalmente, este material nanométrico se llevó a calcinación en aire a 700°C por 2 horas en una mufla marca Terrígeno, para oxidar el núcleo de carbón amorfo y así conformar las nanoesferas huecas de SiC. [21]. En la Fig.2 se observa un esquema del proceso de síntesis de nanoesferas de carburo de silicio y de calcinación de éstas para eliminar el carbón amorfo residual que yace en el núcleo de las nanoesferas de carburo de silicio [20]. Las nanoesferas huecas de carburo de silicio se caracterizaron, utilizando las técnicas de Difracción de Rayos X y Microscopía Electrónica de Barrido SEM/EDS.

Figura 2. Mecanismo de Fabricación de nanoesferas de SiC. Método de sales.



Fuente: Ye Jianke, Zhang Shaowei, Lee William, Novel low temperature synthesis and characterisation of hollow silicon carbide spheres. *Microporous and Mesoporous Materials* 152 (2012) 25–30.

3.3 SÍNTESIS DEL MATERIAL COMPUESTO: MAGNESIO REFORZADO CON NANOESFERAS HUECAS DE CARBURO DE SILICIO

El material compuesto por sintetizar en este estudio está conformado por una matriz de Magnesio de 97.9% EDS [Anexo B] reforzada con nanoesferas huecas de carburo de silicio. El magnesio en polvo (50-100 μm) se mezcla con nanoesferas huecas de SiC, en proporción volumétrica de 1, 3 y 5% de material reforzante en un molino rotatorio con recipiente cerámico durante dos horas. Esta mezcla se lleva a compactación, utilizando una prensa hidráulica Carver, con un dado cilíndrico de media pulgada de diámetro y aplicando una presión de 5 toneladas. Estas pastillas se llevan a desgasificado, para eliminar los gases ocluidos durante la operación de prensado, utilizando una cámara de vacío. Las pastillas se someten a un proceso de sinterización a una temperatura 600-620°C a una velocidad de calentamiento de 3°C/min en atmósfera de argón, durante 6-8 horas.

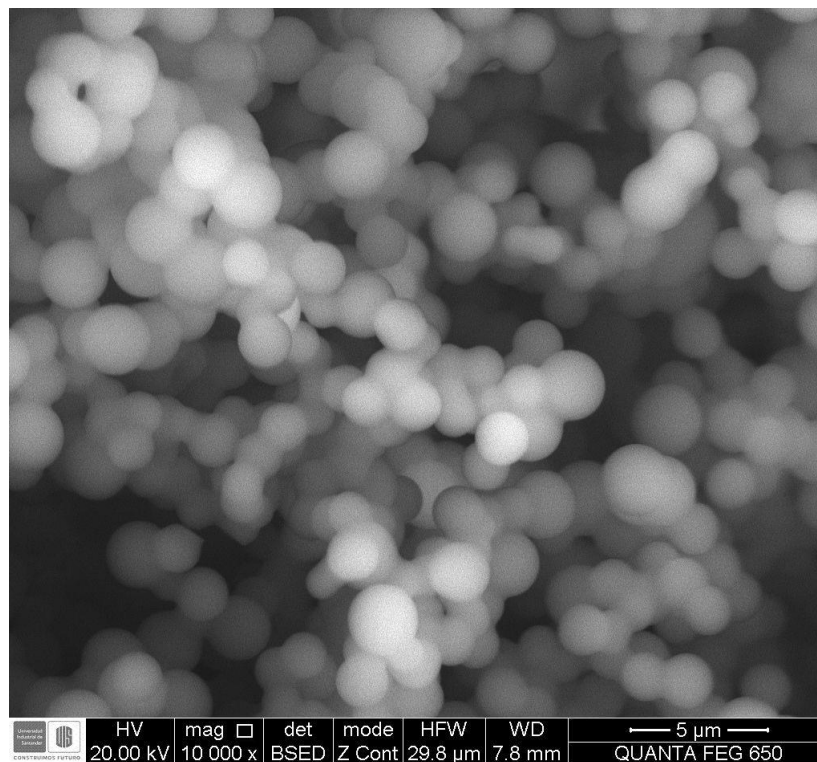
Las pastillas son retiradas del horno a una temperatura de 25°C para ser caracterizadas por las técnicas de Difracción de Rayos X y Microscopía Electrónica de barrido SEM/EDS, prueba de microdureza, medida de densidades de acuerdo al principio de Arquímedes.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 SÍNTESIS DE NANOESFERAS DE CARBÓN AMORFO

En la Fig.3. Micrografía SEM tomada a 10000X se observan las nanoesferas de carbón amorfo obtenidas en la carbonización de sacarosa, con diámetros entre 500-1000nm, con una morfología esférica en su mayoría en racimos o aglomeraciones entre las partículas.

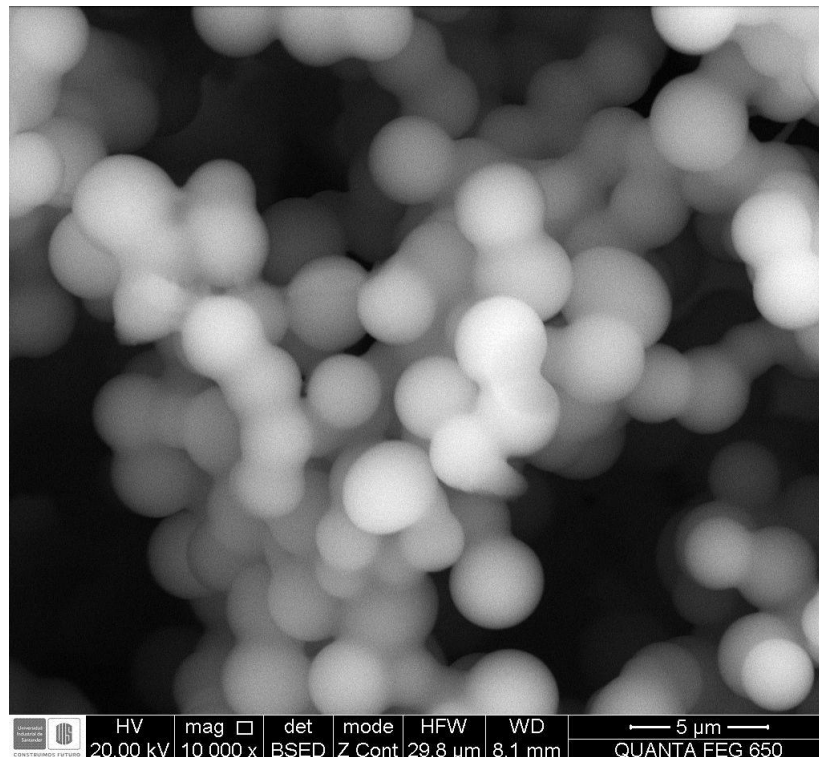
Figura 3. Micrografía SEM a 10000X, esferas de carbón amorfo sin tratamiento de ultrasonido.



Para evitar la aglomeración de las partículas esféricas de carbón amorfo se realizó un tratamiento de ultrasonido de alta frecuencia en un equipo SONICS VIBRA-CELL durante 2 horas generando una mayor dispersión de las partículas como se evidencia en la Fig.4 que corresponde a una micrografía SEM tomada a

10000X posterior al tratamiento anteriormente mencionado. Cabe resaltar que la temperatura y la presión cumplen un papel fundamental en el proceso de producción de esferas de carbón amorfo, ya que controlan el tamaño y su morfología.

Figura 4. Micrografía SEM a 10000X, esferas de carbón amorfo tratadas con ultrasonido de alta frecuencia.

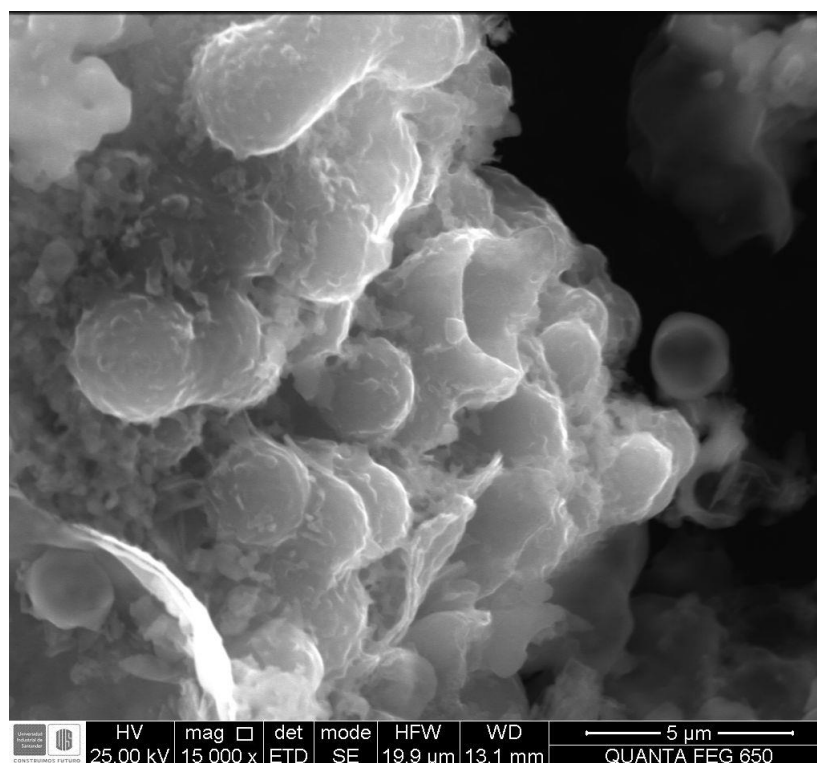


4.2 SÍNTESIS DE NANOESFERAS DE CARBURO DE SILICIO

En la Fig.5 se observan las nanoesferas huecas de carburo de silicio obtenidas por el método 2 descrito anteriormente. Estas partículas se encuentran formando una especie de aglomerado o racimos entre ellas. En esta micrografía se pueden observar esferas huecas de carburo de silicio de tamaños entre 500-1000nm, algunas están fracturadas como consecuencia del proceso de calcinación indicando que efectivamente son esferas huecas. Este fenómeno de aglomeración

se debe posiblemente a la presencia de sales remanentes (NaCl-NaF) y silicio metálico que al entrar al proceso de calcinación para eliminar el carbón amorfo remanente, formaron compuestos de bajo punto de fusión que promovieron la aglomeración de las nanopartículas. El proceso de lavado para eliminar sales y silicio metálico remanentes se debe hacer con mayor énfasis, para minimizar este fenómeno de aglomeración. Las nanoesferas de SiC se analizaron por Difracción de Rayos X utilizando un difractómetro de rayos X marca Brucker modelo D8 ADVANCE con geometría da vinci, que funciona con radiación de Cu K α ($\lambda = 1.54178 \text{ \AA}$) con ángulo de difracción (2θ) entre $3,5^\circ$ y 70° con un tiempo de paso de $0.6^\circ / \text{s}$. Se encontraron fases como la moissanita 54 R, moissanita 105R y carburo de silicio, como se indica en el Anexo D, indicando que efectivamente se obtuvo carburo de silicio con excelentes propiedades debido a su sistema ortogonal y a su elevada dureza por la naturaleza de las fases presentes.

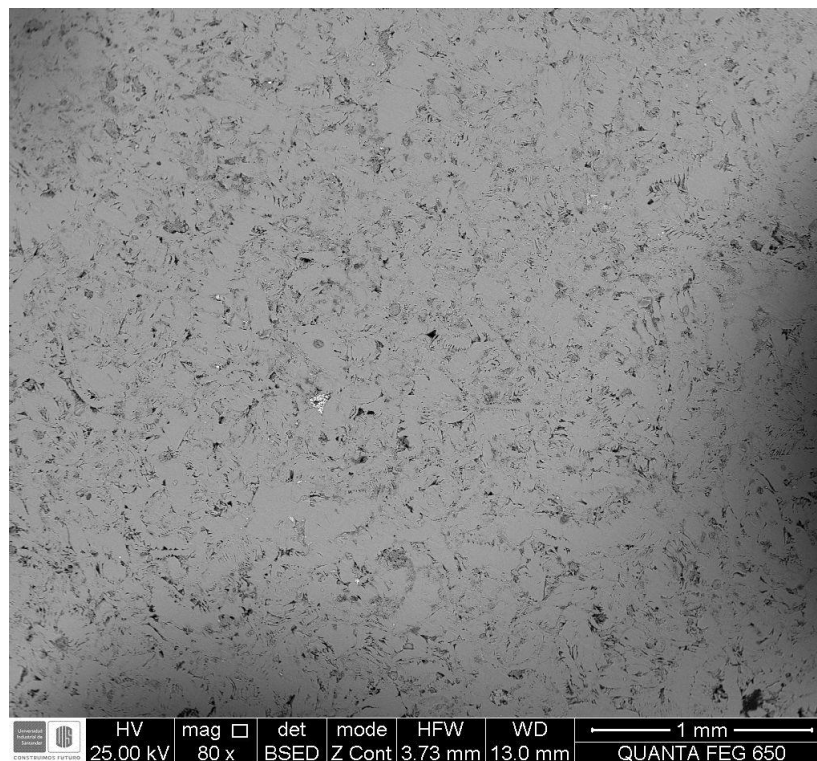
Figura 5. Micrografía SEM. Nanoesferas huecas de SiC (aglomeradas) obtenidas después del proceso de calcinación.



4.3 SÍNTESIS DEL MATERIAL COMPUESTO: MAGNESIO REFORZADO CON NANOESFERAS HUECAS DE CARBURO DE SILICIO

La Fig.6 corresponde a la pastilla de material compuesto que contiene 5% volumétrico de SiC, se observa una distribución homogénea de las partículas de SiC (gris oscuro) EDS Anexo A2, en la matriz de magnesio (fase gris claro) EDS Anexo B. El material compuesto presentó una sinterización homogénea sin observarse porosidades de tamaño considerable. La micrografía tomada a 80X muestra la homogeneidad del material compuesto, y se aprecian aglomeraciones de carburo de silicio muy unidas con la matriz de magnesio.

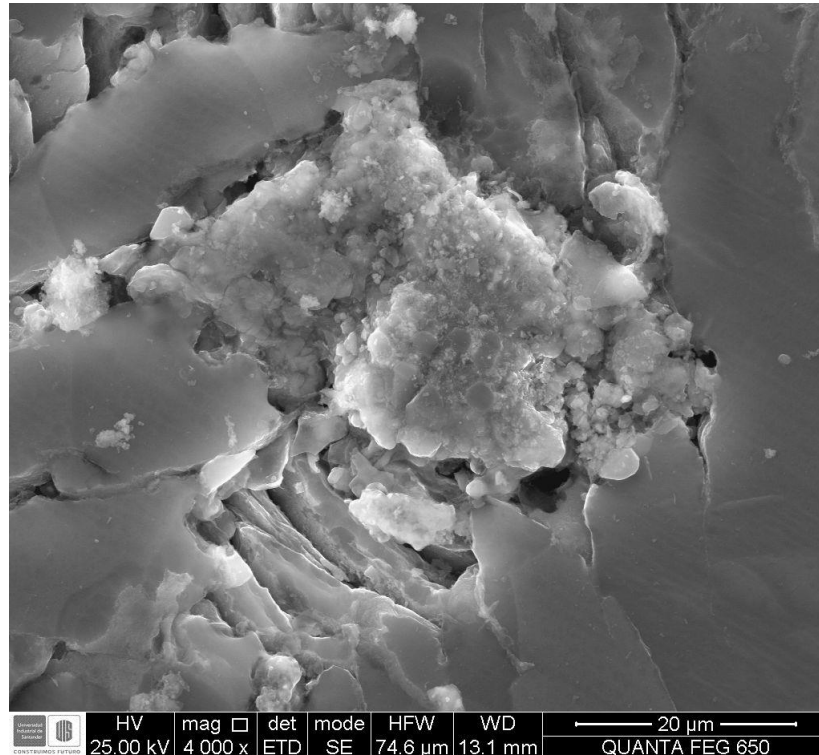
Figura 6. Micrografía SEM. Magnesio-5% esferas huecas-SiC 80X.



Podemos observar en la Fig.7 la micrografía tomada a 4000X mediante SEM del material compuesto Magnesio-esferas huecas de carburo de silicio SiC. Se aprecia la interface entre la matriz y el reforzante. Las zonas laterales y más

oscuras corresponden al magnesio mientras que las partes del centro y brillantes son aglomeraciones de las esferas huecas de carburo de silicio Fig.5 se logra ver que falta un poco más de cohesión entre el reforzante y la matriz, consecuencia del silicio remanente de las esferas huecas de SiC.

Figura 7. Micrografía SEM. Magnesio-5% SiC tomada a 4000X.



El desbaste se hizo al pasar por papel lija, de grano 1200, 1500, las probetas y posteriormente se termina de pulir en paños usando alúmina de 0.05 μ m como abrasivo a 400 rpm, el tamaño del papel de lija se determinó de acuerdo con las propiedades del magnesio, al finalizar la preparación metalográfica se atacó con solución de Cloruro férrico durante 20 segundos de acuerdo con la norma ASTM E-407 [23].

En la Fig.8 se observa la micrografía de las pastillas de material compuesto con un porcentaje volumétrico de 1% de material reforzante, es decir de esferas huecas

de carburo de silicio con matriz de magnesio tomada en un microscopio óptico marca OPTIMUS, donde se puede apreciar que el material reforzante SiC está distribuido uniformemente dentro de la matriz Mg; pero dado el tamaño de la micrografía observamos aglomeración de las partículas de SiC. Además se observan porosidades, lo que prueba que la sinterización del material compuesto ha sido buena en general, con los bordes de grano de la matriz de magnesio bien definidos.

Figura 8. Micrografía Magnesio 1% en volumen de esferas huecas de SiC. Tomada a 100X.



4.3.1 Medición de densidades. El principio de Arquímedes según la ecuación A, se usó para medir la densidad experimental de las muestras. Se tomaron tres series de lecturas para medir la densidad aparente de compuestos puros de Mg y Mg-SiC. Los valores promedio se tomaron como la densidad experimental de las muestras a granel. Las muestras se pesaron usando una balanza analítica

METTLER TOLEDO cuya precisión es de $\pm 0,0001$ g y se utilizó agua destilada como fluido de inmersión.

Usando el principio de Arquímedes, la densidad experimental se calculó usando la siguiente ecuación:

$$dS = Ws * dL / (Wt - Wb) \quad (A)$$

dS= Densidad del Sólido

dL= Densidad del agua (1 g/ml)

Ws= Peso del Sólido

Wt= Peso total del agua y sólido

Wb= Peso del agua

La Tabla 1 muestra la densidad de compuestos puros de Mg y Mg-SiC. A partir de los datos de densidad, se encontró que utilizando los mismos parámetros de sinterización, la densidad de Mg-SiC aumentó. En el caso de compuestos de Mg-5% SiC, la reducción del valor de densidad puede atribuirse la adición de las partículas de carburo de silicio, las cuales se caracterizan por ser esféricas y huecas.

Tabla 1. Densidad de los compuestos Mg-esferas huecas/SiC.

Composición	Densidad Promedio (g/cm^3)
Mg	1.74
Mg-1% SiC	1.62
Mg-3% SiC	1.69
Mg-5% SiC	1.65

Al comparar las Tablas 1 y 2, se observa que los valores de densidad de los Mg-SiC, es muy cercana a la del Mg puro y aleaciones de magnesio más utilizadas en la industria automotriz y aeronautica, debido a que el reforzante (el carburo de

silicio) y su porcentaje no era superior al 5%; es decir que estamos agregando esferas huecas de SiC a la matriz, ocasionando un cambio muy leve en la densidad.

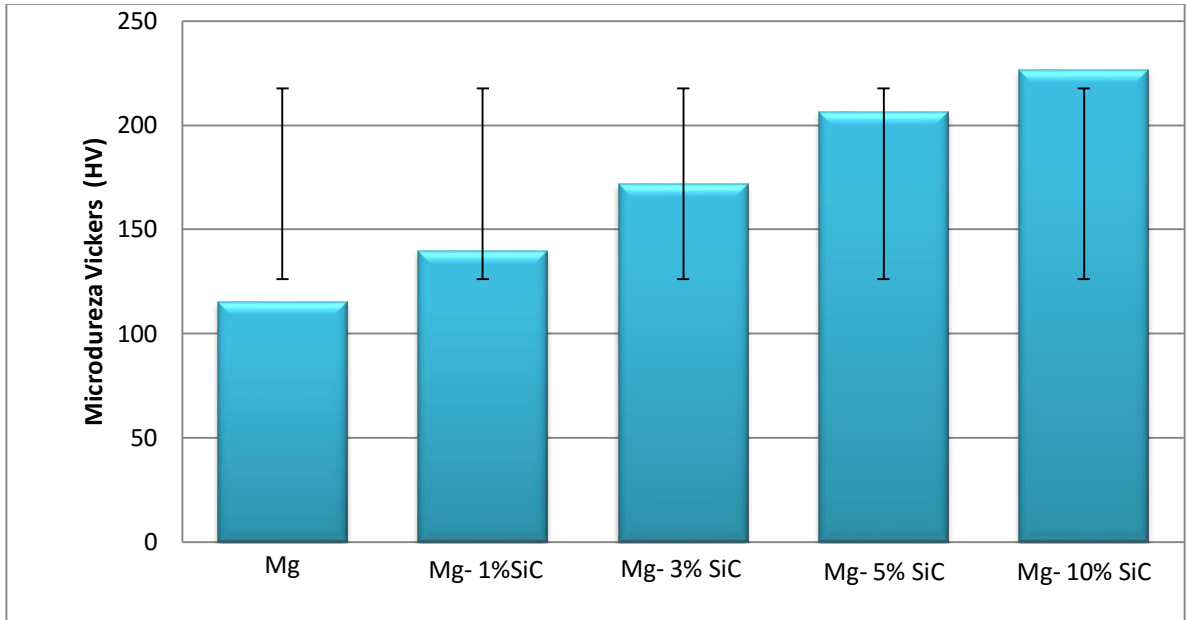
Tabla 2. Densidades de aleaciones más comunes de Magnesio.

Aleaciones	Densidad (g/cm^3)
AZ91D	1.81
AJ62	1.80
AS21	1.76
AM60B	1.80

4.3.2 Análisis de microdureza. La microdureza de los compuestos de Mg y Mg-Esferas huecas de SiC se midió usando un medidor de microdureza (INNOVATEST). La carga operativa fue de 10 g y el tiempo de mantenimiento fue de 10 segundos. La microdureza se midió en las superficies de compuestos de magnesio y magnesio puro. Se tomaron 5 lecturas de microdureza para cada muestra y se informa un valor promedio con desviación estándar.

En la Fig 9. Se observan los valores de microdureza promedio para cada uno de los compuestos de Mg-SiC, con diferentes porcentajes volumétricos de reforzante. Se muestra un valor de microdureza de 140 HV para el caso de 1%SiC, 172 HV para 3%SiC, 206 HV para 5% SiC respectivamente. Para el caso del Mg puro el valor de microdureza fue de 115 HV.

Figura 9. Datos de micro dureza de compuestos de Mg-SiC.



Los valores de microdureza de compuestos de Mg-SiC crecieron significativamente al aumentar la cantidad de material reforzante, en comparación con el magnesio sin reforzo. Los datos de microdureza de compuestos de magnesio y esferas huecas de SiC muestran una tendencia creciente de dureza a medida que aumenta la cantidad de fracción volumétrica de SiC. En el caso de un 5% en Volumen de SiC, estos valores de dureza pueden proporcionar propiedades inherentes a la matriz de Mg blando y actuar como un obstáculo para los movimientos de dislocación que se atribuye a la mejora del valor de dureza. La reducción de la porosidad fue otra razón detrás de la mejora de la dureza.

5. CONCLUSIONES

La síntesis de nanoesferas de carbón amorfo por el proceso de carbonización de soluciones acuosas de glucosa en autoclave fue exitosa, obteniendo tamaños de partícula en intervalo de 500-1000 nanómetros a temperaturas de 175 °C y un tiempo de 8 horas de residencia en el autoclave.

La síntesis de nanoesferas huecas de carburo de silicio por el método de inmersión de la mezcla de nanoesferas de carbón amorfo y silicio metálico en polvo (50 μm , 99% pureza, Sigma-Aldrich), relación (1:4), en una mezcla binaria de sales NaCl-NaF, a 1150 °C durante 8 horas y posterior calcinación en horno a 700 °C por 2 horas, en atmósfera de aire, fué exitosa, obteniendo esferas huecas de carburo de silicio de tamaños entre (500-1500)nanometros. Se debe prevenir la formación de aglomerados de nanoesferas de SiC durante la calcinación, removiendo totalmente las sales de NaF-NaCl y el silicio metálico remanentes, antes del proceso de calcinación.

El material compuesto Mg-SiC sintetizado en el presente estudio presentó un incremento considerable de la dureza, a medida que se aumentaba el contenido de nanoesferas de SiC, como material reforzante, llegando a duplicarse su dureza con un contenido de SiC de 5% en volumen. La reducción de la densidad del material compuesto Mg-SiC, fue proporcional al incremento del contenido de material reforzante.

Las condiciones del proceso de sinterización del material compuesto Mg-esferas huecas de SiC fueron: temperatura 615 °C durante 12 horas en atmósfera de Argón.

6. RECOMENDACIONES

Para evitar la aglomeración o los racimos de nano esferas de carbón amorfo, se debe someter a ultrasonido de alta frecuencia durante un tiempo mayor a 2 horas, y así se dispersen más las partículas y no se unan entre sí.

Es necesario incrementar la cantidad de lavados con solución acuosa 40 % porcentaje en peso de NaOH posterior a la síntesis de carburo de silicio, para eliminar el silicio metálico remanente, es decir el que no alcanzó a convertirse en SiC con el fin de obtener una mayor dispersión y que no haya aglomeración de nanoesferas de carburo de silicio sino que queden libres.

Respecto a la molienda del magnesio, es un poco difícil llegar a tamaños tan finos debido a su alta reactividad, lo ideal sería trabajar en molinos de alta energía que tengan atmosfera controlada de gas argón o en cámaras de vacío que contengan los molinos; ya que es bastante complejo realizar este proceso con los recursos de la universidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. M.R ASHBY, *ActoMetoll.Moteriolio*, 41 (1993) 1313-1335. (1990) 2107-2114.
2. D.LERICH, *Prog.Powder Metoll*.46(1986) 45-65.
3. Matthews F.L. and Rawlings R.D., *Composite Materials: Engineering and Science*, Chapman & Hall, London, 1996, 470 p.
4. Gibson R.F., *Principles of Composite Materials Mechanics*, CRC Press Taylor & Francis Group, New York, 2007, 579 p.
5. Schwartz Mel, *New Materials: Process and Methods Technology*, CRC Press Taylor & Francis Group, New York, 2006, 686 p.
6. Kainer K.U. (editor), *Metal Matrix Composites: Custom-made Materials for Automotive and Aerospace Engineering*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2006, 3014 p.
7. Davim J.P.(editor) *Metal Matrix Composites: Materials, Manufacturing and Engineering*, DeGruiter, Deutsche National Bibliothek, 2014, 2014 p.
8. Natarajan N., Krishnaraj V., Davim J.P., *Metal Matrix Composites: Synthesis, Wear, Characteristics, Machinability Study of MMC Brake Drum*, Springer, 2015, 85 p.
9. V.K. LINDROOS y M.J. TALVITIE, *J. Moten Proc. Technoí*. 53 (1995),273-284.
10. F. HEHMANN y F.H. FROES, *Proc. World Congress on Powder Metallurgy, SF2M*, Paris, Francia, vol. III, 1994, p p . 15911604.
11. K.N. Braszczyńska, L. Lityńska, A. Zyska, W. Baliga, TEM analysis of the interfaces between the components in magnesium matrix composites reinforced with SiC particles, *Materials Chemistry and Physics*, Volume 81, Issues 2–3, 28 August 2003, Pages 326–328.
12. Deng, K. K., Wu, K., Wu, Y. W., Nie, K. B., and Zheng, M. Y. (2010). Effect of submicron size SiC particulates on microstructure and mechanical properties of AZ91 magnesium matrix composites. *Journal of Alloys and Compounds*, 504(2), 542-547.

13. Saberi, Y., Zebarjad, S. M., and Akbari, G. H. (2009). On the role of nano-size SiC on lattice strain and grain size of Al/SiC nanocomposite. *Journal of Alloys and Compounds*, 484(1), 637- 640.
14. Ferkel, H., Mordike, B.L., Magnesium strengthened by SiC nanoparticles. *Materials Science and Engineering A298* (2001)193–199.
15. Lan, J., Yang, Y., and Li, X. (2004). Microstructure and microhardness of SiC nanoparticles reinforced magnesium composites fabricated by ultrasonic method. *Materials Science and Engineering: A*, 386(1), 284-290.
16. Cao G, Konishi , H., Li, X. (2008) .Mechanical properties and microstructure of SiC- reinforced Mg-(2.4)Al-1Si nanocomposites fabricated by ultrasonic cavitation-based solidification processing. *Materials Science and Engineering: A*, 486(1), 357-362.
17. El-Saied, Y., Fernandez, J. y Perez, J,L., Some aspects of damage and failure mechanisms at high strain-rate and elevated temperatures of particulate magnesium matrix composites, *Composites, Part B* 34. (2003),551–560.
18. Rauber,C.,Lohmüller, A.Opel,S.y Singer,R.F.Microstructure and mechanical properties of SiC particle reinforced magnesium composites processed by injection molding. *Materials Science and Engineering A* 528 (2011) 6313–6323.
19. Shen,M.J.,Wang,X.J.,Li,C.D.,Zhang,M.F.,Hu,X.S.,Zheng,M.Y.y Wu,K., Effect of bimodal size SiC particulates on microstructure and mechanical properties of AZ31B magnesium matrix composites, *Materials and Design*, 52 (2013) 1011–1017.
20. Ye Jianke, Zhang Shaowei, Lee William, Novel low temperature synthesis and characterisation of hollow silicon carbide spheres.*Microporous and Mesoporous Materials* 152 (2012) 25–30.
21. Zhang Y., Shi E. W., Chen Z. Z., Li X. B., and Xiao B., Large-scale fabrication of silicon carbide hollow spheres, *J. Mater. Chem.*, 2006, 16, 4141-4145.
22. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS; Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens; ASTM E3; 2017.

23. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS;Standard Practice for
Microetching Metals and Alloys; ASTM E407;2015.

BIBLIOGRAFIA

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS; Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens; ASTM E3; 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS; Standard Practice for Microetching Metals and Alloys; ASTM E407; 2015.

Cao G, Konishi , H., Li, X. (2008) .Mechanical properties and microstructure of SiC-reinforced Mg-(2.4)Al-1Si nanocomposites fabricated by ultrasonic cavitation-based solidification processing. Materials Science and Engineering: A, 486(1), 357-362.

D.LERICH, Prog. Powder Metall. 46(1986) 45-65.

Davim J.P.(editor) Metal Matrix Composites: Materials, Manufacturing and Engineering, DeGruiter, Deutsche National Bibliothek, 2014, 2014 p.

Deng, K. K., Wu, K., Wu, Y. W., Nie, K. B., and Zheng, M. Y. (2010). Effect of submicron size SiC particulates on microstructure and mechanical properties of AZ91 magnesium matrix composites. Journal of Alloys and Compounds, 504(2), 542-547.

El-Saied, Y., Fernandez, J. y Perez, J.L., Some aspects of damage and failure mechanisms at high strain-rate and elevated temperatures of particulate magnesium matrix composites, Composites, Part B 34. (2003), 551–560.

F. HEHMANN y F.H. FROES, Proc. World Congress on Powder Metallurgy, SF2M, Paris, Francia, vol. III, 1994, p p . 15911604.

Ferkel, H., Mordike, B.L., Magnesium strengthened by SiC nanoparticles. *Materials Science and Engineering A298* (2001) 193–199.

Gibson R.F., *Principles of Composite Materials Mechanics*, CRC Press Taylor & Francis Group, New York, 2007, 579 p.

K.N. Braszczyńska, L. Lityńska, A. Zyska, W. Baliga, TEM analysis of the interfaces between the components in magnesium matrix composites reinforced with SiC particles, *Materials Chemistry and Physics*, Volume 81, Issues 2–3, 28 August 2003, Pages 326–328.

Kainer K.U. (editor), *Metal Matrix Composites: Custom-made Materials for Automotive and Aerospace Engineering*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2006, 3014 p.

Lan, J., Yang, Y., and Li, X. (2004). Microstructure and microhardness of SiC nanoparticles reinforced magnesium composites fabricated by ultrasonic method. *Materials Science and Engineering: A*, 386(1), 284-290.

M.R ASHBY, *Acta Metall. Materiol.*, 41 (1993) 1313-1335. (1990) 2107-2114.

Matthews F.L. and Rawlings R.D., *Composite Materials: Engineering and Science*, Chapman & Hall, London, 1996, 470 p.

Natarajan N., Krishnaraj V., Davim J.P., *Metal Matrix Composites: Synthesis, Wear, Characteristics, Machinability Study of MMC Brake Drum*, Springer, 2015, 85 p.

Rauber,C.,Lohmüller, A.Opel,S.y Singer,R.F.Microstructure and mechanical properties of SiC particle reinforced magnesium composites processed by injection molding. *Materials Science and Engineering A* 528 (2011) 6313–6323.

Saberi, Y., Zebarjad, S. M., and Akbari, G. H. (2009). On the role of nano-size SiC on lattice strain and grain size of Al/SiC nanocomposite. *Journal of Alloys and Compounds*, 484(1), 637- 640.

Schwartz Mel, *New Materials: Process and Methods Technology*, CRC Press Taylor & Francis Group, New York, 2006, 686 p.

Shen,M.J.,Wang,X.J.,Li,C.D.,Zhang,M.F.,Hu,X.S.,Zheng,M.Y.y Wu,K., Effect of bimodal size SiC particulates on microstructure and mechanical properties of AZ31B magnesium matrix composites, *Materials and Design*, 52 (2013) 1011–1017.

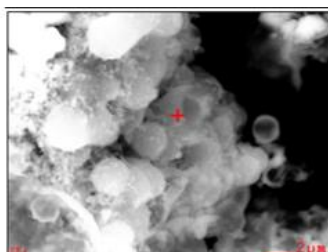
V.K. LiNDROOS y M.J. TALVITIE, *J. Moten Proc. Technol.* 53 (1995),273-284.

Ye Jianke, Zhang Shaowei, Lee William, Novel low temperature synthesis and characterisation of hollow silicon carbide spheres.*Microporous and Mesoporous Materials* 152 (2012) 25–30.

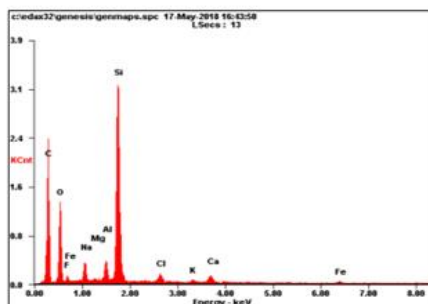
Zhang Y., Shi E. W., Chen Z. Z., Li X. B., and Xiao B., Large-scale fabrication of silicon carbide hollow spheres, *J. Mater. Chem.*, 2006, 16, 4141-4145.

ANEXOS

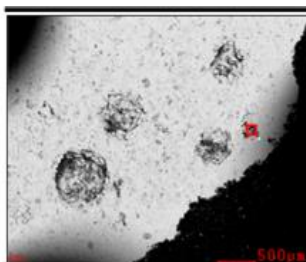
ANEXO A.1: SEM-EDS CARBURO DE SILICIO DESPUÉS DE CALCINACIÓN



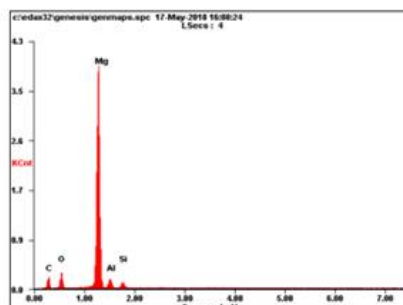
Element	Wt%	At%
CK	52.17	64.35
OK	25.35	23.48
FK	01.34	01.05
NaK	02.33	01.50
MgK	00.11	00.07
AlK	01.50	00.82
SiK	15.01	07.92
ClK	00.77	00.32
KK	00.25	00.09
CaK	00.80	00.30
FeK	00.37	00.10
Matrix	Correction	ZAF



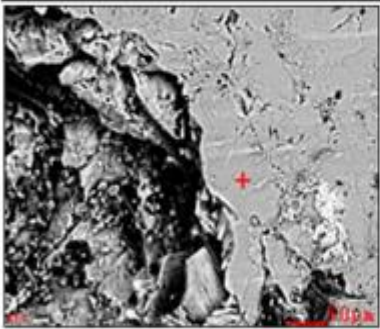
ANEXO A.2: SEM-EDS MATERIAL COMPUESTO Mg- esferas huecas SiC



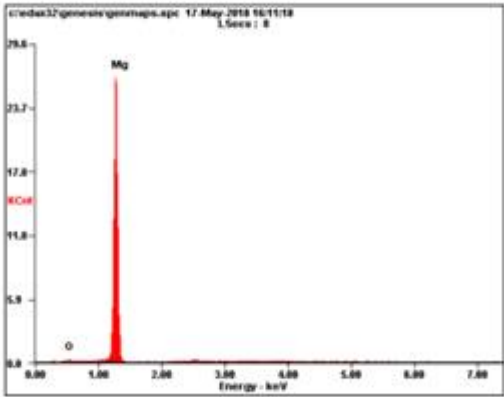
Element	Wt%	At%
CK	26.77	40.48
OK	14.21	16.13
MgK	50.66	37.84
AlK	05.43	03.65
SiK	02.94	01.90
Matrix	Correction	ZAF




ANEXO B: SEM-EDS DE LA BARRA DE MAGNESIO



<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>OK</i>	02.30	03.45
<i>MgK</i>	97.70	96.55
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF



ANEXO C: ALEACIONES MÁS COMUNES DE MAGNESIO

															
Material Properties															
Mechanical Properties	Magnesium										Aluminum		Zinc		
	AZ91D	AM50A	AM60B	AM20	AE42	AE44	MRI 153M	MRI 230D	AS21	AJ62	A380	A383	AG40A	ZA27	
Ultimate Tensile Strength (Mpa)	240	210	225	190	230	245	250	245	175	234	320	310	283	426	
Yield Strength (Mpa)	160	125	130	90	145	142	170	180	110	140	160	150		365	
Elongation % ub 2 in (51mm)	3	10	8	12	10	10	6	5	9	7	3.5	3.5	10	2	
Hardness Brinell	70	60	65	45	60	62	72	71	55	61	80	75	82	115	
Elastic Modulus (Gpa)	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	71	71		78	
Charpy Impact (unnotched) (J)	6	18	17	18	5	15	8	6	5	13.3	4	4	53	4	
Physical Properties	Magnesium										Aluminum		Zinc		
	AZ91D	AM50A	AM60B	AM20	AE42	AE44	MRI 153M	MRI 230D	AS21	AJ62	A380	A383	AG40A	ZA27	
Density (g / cm ³)	1.81	1.77	1.80	1.75	1.79	1.82	1.82	1.82	1.76	1.80	2.74	2.74	6.60	5.00	
Melting Range	F	815-1,108	815-1,238	815-1,139	815-1,180	1,094-1,157	1,071-1,148	946-1,116	977-1,123	815-1,170	959-1,134	1,004-1,103	1,035-1,105	718-732	707-903
	C	435-598	435-620	435-615	435-638	590-625	577-620	508-602	525-606	435-632	515-612	540-595	557-596	381-389	375-484
Specific Heat (kJ/kg k)	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.09	1.04	1.02	1.15	0.963	0.963	0.418	0.522	
Coefficient of Thermal Expansion (um / m · k)	26.0	26.0	26.0	26.0	26.1	25.2	25.9	25.1	26.1	27.3	22.0	22.0	27.4	26.0	
Thermal Conductivity (W / m · k)	51	65	61	94	84	85	64	77	84	77	96	96	113	123	
Electrical Conductivity MS/m	6.60	9.10	nm	13.10	11.70	11.70	nm	nm	10.80	nm	nm	nm	nm	nm	
Corrosion Rate mg/cm ² /day	0.05	0.10	0.09	0.60	0.06	0.05	0.09	0.10	0.20	0.04	0.34	0.33	nm	nm	
Sources: Hydro Magnesium September 2005, ASM Handbook; Magnesium & Magnesium Alloys, Dead Sea Magnesium, Noranda Magnesium Data The mechanical properties of a die cast alloy depend strongly on the fabrication variables involved, as well as on the alloy composition. *Hydro Magnesium nm: not measured															

ANEXO D: DIFRACTOGRAMA DRX CARBURO DE SILICIO

