

Obtención, Evaluación y Caracterización de Material Compuesto con Matriz Metálica en Aleación de Aluminio, Reforzado con Partículas Esféricas de Carburo de Silicio y núcleo de Grafito.

Elkin Yezid Zambrano Díaz

Trabajo de Grado para Optar el título de Ingeniero Metalúrgico

Director

Milton Manrique Gallardo
Doctor en Ingeniería Metalúrgica

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías físico Químicas
Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales
Bucaramanga

2020

Dedicatoria

A mi madre; únicamente a ella le dedico este título. Es el premio a su esfuerzo, dedicación, una vida de sacrificio y a mucho trabajo con el único propósito de un futuro mejor.

Agradecimientos

A la Universidad Industrial de Santander, profesores, técnicos de laboratorio, compañeros de clase y compañeros de lucha; gracias por hacer parte de este proceso de formación, por su apoyo y soporte en cada escenario.

En especial quiero hacer una mención de agradecimiento al profesor Milton Manrique quien inspiró la realización de este proyecto, al señor Ambrosio Carrillo técnico de laboratorio, gracias a su simpatía y fervor por el trabajo fue posible cumplir con los objetivos de esta tesis.

Por otra parte, y no menos importante, gracias al profesor Rafael Cavanzo quien facilitó el ingreso a las instalaciones de su laboratorio en el parque tecnológico Guatiguará de la universidad Industrial de Santander; pudiéndose obtener el precursor fundamental en la síntesis de partículas de carburo de silicio con núcleo de grafito. También se reconoce el apoyo logístico y el uso de equipos del Grupo de Investigación GIMBA, específicamente en todo lo relacionado con la molienda del aluminio, base de la matriz del material compuesto, en el molino de anillos.

Gracias al laboratorio de difracción de rayos-X y al laboratorio de microscopía electrónica del parque tecnológico Guatiguará y al señor técnico de laboratorio Carlos Villareal por el apoyo brindado en la etapa de caracterización.

Tabla de contenido

	pág.
Introducción.....	13
1.1 Constituyentes de los materiales compuestos tipo Al – MMC.....	14
1.1.1 Aleaciones de aluminio.....	14
1.1.2 Propiedades de los materiales de refuerzo.....	14
1.2 Técnicas de procesamiento.....	15
1.2.1 Stir Casting.....	15
1.2.2 Squeeze Casting.....	16
1.2.3 Compocasting.....	17
1.2.4 Metalurgia de polvos (PM).....	18
1.3 Aplicación de los PR – AIMMCs en la Fabricación de Discos de Freno.....	19
2. Objetivos.....	22
2.1 Objetivo General.....	22
2.2 Objetivos Específicos.....	22
3. Marco Referencial.....	23
3.1 Mecanismos de Fortalecimiento en PR - AIMMCs.....	23
3.2 Propiedades de los PR – AIMMCs y regla de las mezclas.....	24
3.2.1 Densidad.....	24
3.2.2 Módulo Elástico.....	25
3.2.3 Coeficiente de expansión térmica.....	25
3.2.4 Conductividad Térmica.....	26

3.3	Influencia de la Interface	26
3.3.1	Reacción química en las interfaces.....	27
3.3.2	Tipos de falla interfacial en PR – AIMMCs	27
4.	Procedimiento Experimental y Procesamiento del Material.....	28
4.1	Fabricación del material de refuerzo.....	28
4.1.1	Preparación de la plantilla polimérica.....	28
4.1.2	Pirolisis (Carbonización) de las esferas RF	29
4.1.3	Esferas de carburo de silicio con núcleo de grafito (SiC _p).	30
4.2	Consolidación del Material Compuesto.....	31
4.2.1	Molienda de la Aleación Matriz	31
4.2.2	Mezcla Mecánica Matriz – Refuerzo.....	32
4.2.3	Compactación y Sinterización del Material Compuesto.....	32
5.	Caracterización	33
5.1	Microscopía Electrónica de Barrido, Etapa I.....	33
5.2	Difracción de Rayos X del material de refuerzo.....	35
5.3	Microscopía electrónica de barrido SEM-EDS del material compuesto consolidado.....	36
6.	Conclusiones	38
7.	Recomendaciones	39
	Referencias Bibliográficas	40
	Apéndices.....	45

Lista de Tablas

	pág.
Tabla 1. <i>Parámetros experimentales para la síntesis de la plantilla de carbón amorfo en la etapa 1</i>	30
Tabla 2. <i>Composición química de la matriz</i>	32

Lista de Figuras

	pág.
<i>Figura 1</i> síntesis sonoquímica de resinas esféricas RF	29
<i>Figura 2</i> Esquema para el método MMS	31
<i>Figura 3</i> Microscopía electrónica de barrido a. esferas poliméricas RF, b, Plantilla esférica de carbón amorfo, c, Partículas de con núcleo de grafito SiC _p .	34
<i>Figura 4</i> Espectros EDS a. plantilla esférica de carbón b. partículas de SiC _p	34
<i>Figura 5</i> Espectro DRX de la muestra de SiC _p en el que se detecta carburo de silicio SiC y grafito C _g	35
<i>Figura 6</i> Microestructura del material compuesto sintetizado. 1 wt% SiC _p .	36
<i>Figura 7</i> Microestructura de los nódulos de material reforzante a) aglomeración de SiC _p , b) estructura ampliada de uno de los nódulos de SiC _p , c) adherencia entre el nódulo de refuerzo y la matriz.	37

Lista de Apéndices

	pág.
Apéndice A. Algunas propiedades mecánicas y físicas de partículas cerámicas.	45
Apéndice B. Técnicas de procesamiento, Stir Casting y Vibrating Cooling Slope (VCS).	46
Apéndice C. Perfil de atributos vs requisitos de diseño de un AIMMC para discos de freno.	47
Apéndice D. Diagrama de flujo de procesos para obtener SiC _p	48
Anexo E Resultados de laboratorio de la caracterización del material, difractogramas.....	50
Apéndice F. Espectros EDS Material de refuerzo a) Nódulo de SiC _p , b) Núcleo de una partícula de SiC _p	54

Resumen

Título: Obtención, evaluación y caracterización de material compuesto con matriz metálica de aleación de aluminio, reforzado con partículas esféricas de carburo de silicio con núcleo de grafito.*

Autor: Elkin Yezid Zambrano Díaz.**

Palabras Claves: MMC, ALMMC, PR-ALMMC, SiC_p, MSS, carbonización, grafitización, sinterización, caracterización.

Descripción:

En este trabajo de grado se realiza la síntesis y la caracterización de un material compuesto de matriz metálica de aluminio reforzado con partículas esféricas de carburo de silicio con núcleo de grafito (SiC_p PR-ALMMC). El objetivo de este proyecto es obtener un material alternativo a la fundición gris para aplicación en el sector automotriz en la fabricación de componentes resistentes al desgaste como pistones, cilindros de motor y discos de freno.

La obtención del material de refuerzo involucró la síntesis sonoquímica de esferas poliméricas de resorcinol y formaldehído, la carbonización de estas esferas a 650 °C en presencia de nitrógeno, la síntesis de una envoltura de SiC_p, utilizando un sistema binario de sales fundidas (NaCl-NaF) y la grafitización del carbón remanente en el núcleo de las esferas a 1100 °C en atmósfera de nitrógeno.

Para la consolidación del material una aleación de Al se redujo de tamaño en un molino de anillos de alta energía y se mezcló con fracciones de 1% y en peso del material de refuerzo, los polvos se compactaron en frío a 30 MPa y las probetas sinterizadas a 620 °C durante 2 h en atmósfera de argón. El material es auto lubricante, posee menor densidad y es una alternativa a los materiales convencionales como es el caso de la fundición gris. Finalmente; este proyecto se plantea para que sirva de apoyo a las investigaciones en el desarrollo y aplicación de Al-MMCs en el sector automotriz y del transporte en general.

* Tesis de grado

** Facultad de ingenierías Físico Químicas. Escuela de Ingeniería metalúrgica. Milton Manrique Gallardo, Doctor en Ingeniería Metalúrgica

Abstract

Title: Synthesis and characterization of an Aluminum Metal Matrix Composite, reinforced with silicon carbide graphite cored spherical particles.*

Author: Elkin Yezid Zambrano Díaz. **

Key Words: MMC, Al-MMC, PR-AIMMC, SiC_p, carbonization, MSS, graphitization, sintering, characterization.

Description: In this thesis work, the synthesis and characterization of an aluminum metal matrix composite (Al-MMC) reinforced with graphite-cored silicon carbide particles (SiC_p), is described. Silicon carbide particles reinforcing PR-AIMMCs are novel materials of special application in the automotive industry for the manufacturing of high-wear resistance components, like pistons, engine cylinders and brake discs. The aim of this work is to produce an alternative material to gray cast iron in the manufacturing of these automotive components.

The process to synthesize the reinforcing material comprehend the sonochemical synthesis of resorcinol-formaldehyde (RF) polymer resins, the carbonization of these resins (650 °C) in a nitrogen atmosphere, the synthesis of silicon carbide shells in a binary (NaCl-NaF) system of molten salts (MMS) and the graphitization (1100 °C) of the residual carbon core. Powder metallurgy route was chosen to consolidate the composite material.

An Al alloy used as matrix, was size reduced in a high-energy rings mill and then blended whit fractions of 1 and 2 wt% of SiC_p. These powder mixtures were cold-pressed to 30 MPa and then sintered at 630 °C for 2 hours.

The obtained material is self-lubricant, has lower density and is an alternative to conventional materials like gray cast iron used as self-lubricant and high-wear resistance. The objective of the present research work is to support the investigations in the development and applications of Al-MMCs in the transportation field.

* Bachelor Thesis

** Facultad de ingenierías Físico Químicas. Escuela de Ingeniería metalúrgica. Milton Manrique Gallardo, Doctor of Metallurgical Engineering

Introducción.

Los materiales híbridos son la combinación de dos o más partes cuyo objetivo es conseguir un perfil de propiedades específico y de alto desempeño. En general; una matriz es reforzada con materiales de distintas estructuras en configuraciones que pueden ser de tipo *composite, sandwich, cellular & segmented reinforced* (Ashby, 2011, p.302)

Los materiales compuestos se clasifican según las características físicas y químicas de la matriz en tres grupos: materiales compuestos de matriz polimérica (PMC), materiales compuestos de matriz cerámica (CMC) y materiales compuestos de matriz metálica (MMC).

Según la estructura del refuerzo, estos pueden ser: materiales compuestos reforzados con partículas (PRC's), materiales compuestos reforzados con *Whiskers* o fibras cortas, materiales compuestos reforzados con fibras continuas y materiales compuestos monofilamento (Surappa, 2003, p.321).

Los materiales compuestos de matriz metálica reforzados con partículas (PR-MMC) se caracterizan por una excelente resistencia mecánica y rigidez específicas, alta resistencia al desgaste, elevada dureza, resistencia a la corrosión y estabilidad de las propiedades mecánicas a alta temperatura. Estas cualidades están íntimamente relacionadas con el tipo de materiales a combinar y las proporciones en las que estos lo hacen, la estructura del material reforzante y finalmente del tipo de unión que se presenta en el límite de las dos fases (Callister & Rethwisch, 2013).

Los materiales más empleados en la obtención de MMC son: aluminio, cobre, magnesio y titanio (Al, Cu, Mg, Ti) incluyendo sus aleaciones. Como material reforzante se emplean

estructuras cerámicas de carburo de silicio (SiC), carburo de boro (B₄C), carburo de titanio (TiC), óxido de titanio (TiO₂), alúmina (Al₂O₃), circonia (ZrO₂), circonio (Zr) y alótropos del carbono (Mavhungu, Akinlabi, Onitiri, y Varachia, 2016, pág. 179), (Srinivasan, Kadadeveramath, Rajendran, & Ganesh, 2017)

1.1 Constituyentes de los materiales compuestos tipo Al – MMC

1.1.1 Aleaciones de aluminio: El aluminio ha sido el material más utilizado, como matriz, para la obtención de MMC's; la mayor ventaja del aluminio y sus aleaciones es su bajo costo de producción y el alto grado de desarrollo que se tiene en cuanto a tecnologías de procesamiento. Los materiales compuestos de aluminio reforzados con partículas (PR – AIMMC), presentan una excelente relación resistencia – peso, propiedades tribológicas superiores y resistencia a la corrosión (Mavhungu, et al., 2016, p.178).

1.1.2 Propiedades de los materiales de refuerzo. El óxido de aluminio (Al₂O₃) es el material de refuerzo más económico y más utilizado en la manufactura de piezas por moldeo o colada, aumenta la resistencia a la corrosión y mejora el comportamiento a altas temperaturas, sin embargo; en el campo automotriz y en el sector aeroespacial los PR – MMC basados en aluminio y partículas de SiC tienen mayor aplicación (Vani y Chak, 2018), (Mavhungu, et al., 2016, p.180). En el anexo A se muestran las propiedades físicas y mecánicas de algunos materiales cerámicos para el refuerzo discontinuo de PR – MMC.

La fase particulada en estos materiales posee mayor dureza y módulo que la matriz e impide su movimiento en la vecindad de cada una de estas partículas reforzando propiedades específicas. En

esencia, la matriz transmite al refuerzo parte del esfuerzo aplicado y este soporta parte de la carga (Callister & Rethwisch, 2013)

1.2 Técnicas de procesamiento

Los procesos de manufactura de MMCs a nivel industrial, se clasifican según el estado de la matriz durante el procesamiento del material en:

Procesos en estado líquido

Procesos en estado sólido

Procesos en estado semisólido

1.2.1 Stir Casting. También conocida como técnica de vórtice es la más aceptada por su simplicidad, versatilidad y viabilidad económica. En este procedimiento, las partículas de refuerzo se introducen en la matriz fundida que es agitada vigorosamente a determinada velocidad y temperatura. (Ver figura en el anexo B).

Akhlghi F, (2004). Estudió el efecto de la temperatura de colada sobre la microestructura y la resistencia al desgaste de una aleación A356 reforzada con SiC obtenida por la ruta del stir casting. Las probetas para la caracterización se obtuvieron colando el compuesto en estado semisólido – líquido (SL) y semisólido (SS) a 750 y 590°C respectivamente. Las probetas coladas en estado SL presentaron menor porosidad y menor resistencia al desgaste que las moldeadas en estado SS.

Abbasipour, Niroumand, & Vaghefi, (2010) estudiaron el aluminio A356 reforzado con nanotubos de carbono (CNT) utilizando para su obtención las técnicas stir casting y compocasting, las partículas de refuerzo se adicionaron a la matriz fundida agitada mecánicamente. La evaluación

de las propiedades mecánicas y de la microestructura se realizó en muestras obtenidas por colada a temperaturas del metal completamente fundido y con fracciones de NTC de 0.15 y 0.30 en volumen. El mejor grado de dispersión, la mayor dureza y mejor refinamiento de grano se obtuvo en muestras con una fracción de 0.30 en volumen de NTC.

Dehghan y Hamedan, (2012) fabricaron vía *Stir Casting* un material compuesto combinando aluminio A356 (40 μm) con 1%wt de SiC particulado (10-50 nm). Las mejores propiedades mecánicas y mayor grado de dispersión de las partículas se obtuvieron a una velocidad de agitación de 700 rpm y a una temperatura de colada de 750°C.

1.2.2 Squeeze Casting. El Squeeze Casting o forja de metal líquido es un proceso que involucra la solidificación del metal bajo altas presiones. Las piezas obtenidas mediante este proceso poseen menor porosidad y una microestructura de grano fino (Kalpakjian y Schmith, 2009).

Onat, Akbulut, & Yilmaz, (2007) produjeron mediante la técnica de moldeo a presión o Squeeze casting un AIMMC combinando la aleación Al4.5Cu3Mg con partículas de SiC que se añadieron al metal fundido mientras la mezcla era agitada mecánicamente, el compuesto se moldeó a 650°C bajo 100MPa de presión. El análisis microestructural y la caracterización mecánica indicaron que con la técnica de Squeeze Casting se consigue un material de microestructura fina, menor porosidad, mayor dureza y mejor comportamiento a tensión comparado con la matriz sin reforzar.

Sajan, Pillai, Pai, Satayanarayana, y Rohatgi, (2007) estudiaron la aleación Al0.7Si0.35Mg reforzada con cenizas mediante tres técnicas diferentes: Liquid Metal Stir Casting, Compocasting y Compocasting modificado seguido de Squeeze Casting. El material compuesto procesado en

estado semisólido y moldeado a presión mostró mayor resistencia a la compresión además de una mejor distribución del refuerzo en la matriz, sin embargo; la resistencia a la tracción disminuyó.

1.2.3 Compocasting. El Compocasting es una ruta de procesamiento en el que las partículas de refuerzo se dispersan en la matriz en estado semisólido por agitación mecánica. Se obtiene una microestructura uniforme y globular. Khosravi & Akhilaghi, (2015) estudiaron la aleación de aluminio A356 reforzada con SiC utilizando dos rutas de procesamiento: Compocasting y pendiente vibratoria de enfriamiento continuo (Vibrating Cooling Slope VCS). La aleación matriz se llevó a temperatura de fusión y luego fue enfriada continuamente hasta una temperatura de ~ 590°C, el SiC fue añadido y la mezcla agitada con una propela de grafito a 800rpm por 20 min. El material fue nuevamente calentado hasta 670°C y agitado durante otros 5 min antes de las operaciones de moldeo.

El método VCS requiere de un aparato como el que se observa en la figura del anexo B, las probetas preparadas por esta ruta se obtuvieron vertiendo el material compuesto sobre la placa de cobre que vibra a 65 Hz con una amplitud de 680 micrómetros. Luego de descender 400 mm, el material se vertió en moldes. El Material procesado vía VCS posee una microestructura globular de mayor esfericidad y mayor uniformidad en la dispersión del refuerzo; la velocidad de desgaste es menor y la dureza es mayor en todas las fracciones de SiC

Sajjadi, Ezatpour, y Torabi Parizi, (2012) estudiaron el efecto que tiene la técnica de procesamiento; (*stir Casting y compocasting*) sobre la microestructura y las propiedades mecánicas de un AIMMC reforzado con Al₂O₃

El análisis microestructural mostró que el material compuesto obtenido por la vía del compocasting posee menor porosidad y menor tamaño de grano que el procesado vía stir casting.

También por ésta técnica se obtiene mayor resistencia a la fluencia y mayor resistencia última a la compresión.

1.2.4 Metalurgia de polvos (PM). La pulvimetalurgia comprende un conjunto de técnicas de procesamiento que combina las características finales del material y las propiedades de diseño (físicas y mecánicas) con la tecnología de fabricación por medio de la compactación de polvos y durante la posterior densificación o procesos de consolidación. La microestructura del material compuesto depende de diferentes parámetros como el tamaño y la estructura de las partículas de refuerzo, el nivel de compactación, la temperatura y el tiempo de sinterización (Vani & Chak, 2018).

La principal ventaja de la metalurgia de polvos en el procesamiento de MMC, es que la dispersión del refuerzo en la matriz se hace en estado sólido eliminando los problemas asociados a la mojabilidad de las partículas, además; el principal mecanismo de consolidación es la difusión atómica que tiene lugar a bajas temperaturas y elimina la posibilidad de reacciones químicas indeseadas.

Bodukuri, Eswaraiah, Rajendar, & Sampath (2016) produjeron un MMC híbrido del tipo Al – SiC – B₄C mezclando los polvos en un molino de atrición a 200 rpm por 2 horas. Los polvos se compactaron a 150 MPa de presión y las probetas se sinterizaron a 610 °C.

Purohit, Rana, & Verma, (2012) fabricaron un AIMMC con proporciones de 5 a 30 Wt% de SiC_p. Se evaluaron propiedades como dureza, resistencia a la tracción, resistencia a la compresión, densidad y rugosidad. Además, se reportó la evolución morfológica de las partículas durante el proceso de aleación mecánica determinando que la ruta para conseguir un material con microestructura homogénea, de grano fino y excelente dispersión del refuerzo en la matriz,

involucra la mezcla y aleación mecánica de los polvos (Al/SiC_p), la consolidación mediante presión isostática en frío a 600 MPa y la sinterización en vacío a 600°C.

Ravindran, Manisekar, Rathika, & Narayanasamy, (2013) sintetizaron un MMC híbrido combinando aluminio 2024 con 20 wt% SiC_p y 5 wt% de grafito (gr), luego se estudió el comportamiento del material frente al desgaste. Los polvos se compactaron a 850 MPa y las probetas en verde se sinterizaron en atmosfera inerte a 530°C. Para todas las cargas y velocidades de deslizamiento aplicadas, el material presenta una excelente resistencia al desgaste y mayor coeficiente de fricción comparado con la matriz sin reforzar.

1.3 Aplicación de los PR – AIMMCs en la Fabricación de Discos de Freno

Los AIMMCs son especialmente atractivos para el sector automotriz porque poseen alto módulo y resistencia específicos, resistencia al desgaste, excelentes propiedades térmicas y estabilidad de sus propiedades a alta temperatura. Además, la necesidad de hacer un uso más eficiente de la energía ha impulsado a las compañías fabricantes del sector automotriz y de la industria del transporte en general, en la implementación de materiales más ligeros para la fabricación de los vehículos. Durante los últimos 25 años el desarrollo tecnológico en la obtención de AIMMC ha hecho posible su aplicación en componentes de alto desempeño como, por ejemplo, los rotores o discos de freno, (Telang, Rehman, Dixit, Das, & Azad, 2010), (Adebesi, 2011), (Babalola, Bolu, Inegbenebor, & Odunfa, 2014), (Casati & Vedani, 2014).

El sistema de frenos es un componente crítico en términos de seguridad, permite la reducción de la velocidad y la eventual detención del automotor. La energía cinética del vehículo se transforma en energía calorífica por la fricción producto del deslizamiento entre el disco y las

pastillas o pad de freno; bajo estas condiciones se generan altas temperaturas en la superficie del disco y la energía se disipa a través del material como calor y vibración. Se requiere que el material del disco tenga alta resistencia mecánica, alta conductividad térmica, alto calor específico, bajo coeficiente de expansión térmica y alta resistencia al desgaste (Rashid, 2014).

Los PR – AIMMCs ofrecen un perfil de propiedades único frente a los materiales convencionales en la fabricación de discos. La ventaja principal se refiere a la reducción de peso del componente, reducciones de hasta un 60 % se consiguen con el material compuesto de Al y SiC comparado con discos equivalentes de fundición gris (CI). La tabla del anexo C muestra comparativamente las cualidades de un AIMMC comercial, frente a los requerimientos de diseño en un disco de freno. La distribución de la temperatura, la deformación térmica y el esfuerzo térmico de los discos de freno están relacionados directamente con la seguridad del vehículo; motivo por el cual, se han llevado a cabo numerosas investigaciones en torno al desempeño de los AIMMCs (Lo, 2005).

Govindan & Viji, (2017) modelaron en SOLIDWORKS 2010 un disco de frenos fabricado con un AIMMC y lo compararon con uno fabricado en fundición gris mediante análisis por elementos finitos en el software ANSYS 15.0.

La comparación entre la distribución del esfuerzo y la temperatura, así como la deformación del disco (convencional y AIMMC) indicaron que un AIMMC con 10% wt de SiC satisface los requerimientos para su aplicación en la fabricación de discos de freno.

(Barbera, et al., 2014) fabricaron vía stir casting un disco de freno para motocicleta con aluminio 6061 y reforzado con 20%wt de SiC. Se observó que el AIMMC ofrece mayor eficiencia en términos de distancia de deslizamiento y disipación del calor comparado con la fundición gris;

con esto se reduce el riesgo en la disminución de la eficiencia de frenado o *brake fade*. Además, el disco es 56% más ligero que uno equivalente en fundición gris.

2. Objetivos

2.1 Objetivo General.

Obtener y caracterizar un material compuesto de matriz metálica reforzado con partículas esféricas de carburo de silicio con núcleo de grafito como material alternativo a la fundición gris en la fabricación de discos de freno.

2.2 Objetivos Específicos

Producir esferas de carburo de silicio usando como plantilla partículas esféricas de carbón amorfo.
Grafitizar el carbón amorfo remanente dentro de las esferas de SiC en presencia de atmósfera inerte.

Sinterizar y consolidar el material compuesto.

Caracterizar el material compuesto obtenido.

3. Marco Referencial

3.1 Mecanismos de Fortalecimiento en PR - AIMMCs

El efecto de fortalecimiento sobre las propiedades y la resistencia del aluminio y sus aleaciones con la adición de partículas cerámicas, se describe a través de la mecánica de medios continuos y el siguiente modelo micro mecánico:

$$\Delta R_{P,C} = \Delta\sigma_{\alpha} + \Delta\sigma_{KG} + \Delta\sigma_{SKG} + \Delta\sigma_{KF} \quad (1)$$

En la ecuación (1), $\Delta R_{P,C}$ representa el incremento en la resistencia de las aleaciones de aluminio por la adición de partículas cerámicas reforzantes (Kainer Ulrich, 2006).

$\Delta\sigma_{\alpha}$: Contribución a la resistencia a la fluencia debida a dislocaciones geométricas necesarias.

$$\Delta\sigma_{\alpha} = \alpha * G * b * \rho^{1/2} \quad (2) \quad \rho = 12 * \Delta T * \frac{\Delta C * \Phi_p}{b * d} \quad (3)$$

$\Delta\sigma_{KG}$: Contribución a la resistencia a la fluencia por cambios en el tamaño de grano.

$$\Delta\sigma_{KG} = K_{y1} * D^{-1/2} \quad (4) \quad D = d * \left(\frac{1 - \Phi_p}{\Phi_p} \right)^{1/3} \quad (5)$$

$\Delta\sigma_{SKG}$: Contribución a la resistencia a la fluencia debido a cambios en el tamaño del subgrano.

$$\Delta\sigma_{SKG} = K_{y2} * D_s^{-1/2} \quad (6) \quad D_s = d * \left(\frac{\pi * d^2}{6 * \Phi_p} \right)^{1/2} \quad (7)$$

$\Delta\sigma_{KF}$: Contribución de endurecimiento por deformación.

$$\Delta\sigma_{KF} = K * G * \Phi_p * \left(\frac{2b}{d} \right)^{\frac{1}{2}} * \varepsilon^{1/2} \quad (8)$$

Donde:

α : Constante (0.5 – 1)

G: Módulo de corte
b: Vector de Burger
 ΔT: Diferencia de Temperatura
 ΔC: Diferencia en el coeficiente de expansión térmica
 Φ_p: Fracción volumétrica de partículas reforzantes
 d: Diámetro de partícula
 K_{y1}: Constante (0.05 -1 MNm^{-3/2}).
 D: Tamaño de grano resultante.
 K_{y2}: Constante (0.05 -1 MNm^{-3/2}).
 D_s: Tamaño de subgrano resultante.
 K: Constante
 G: Módulo de corte
 ε: Elongación

3.2 Propiedades de los PR – AIMMCs y regla de las mezclas.

En los materiales híbridos estructurales donde se combinan propiedades generales, lo mejor que se puede obtener es un promedio aritmético de las propiedades de sus componentes individuales ponderadas por su fracción volumétrica. El valor de cada propiedad es acotado por límites definidos según diferentes modelos (Ashby F, 2011, p. 308). (Kainer Ulrich, 2006).

3.2.1 Densidad. La densidad queda determinada con la regla de las mezclas.

$$\rho_c = \Phi_p \rho_p + (1 - \Phi_p) * \rho_m \quad (9)$$

Donde:

Φ_p: Fracción volumétrica de refuerzo
 ρ_p: Densidad del material de refuerzo
 ρ_m: Densidad del material matriz

3.2.2 Módulo Elástico. El módulo elástico de un material compuesto (E_{uc}) está acotado por los límites de Voigt y Reuss, un modelo universalmente aplicado en el que el límite superior se define postulando que los componentes sufren la misma deformación y que el esfuerzo resultante es el volumen promedio de los esfuerzos locales.

$$E_{uc} = \Phi_p * E_p + (1 - \Phi_p)E_m \quad (10)$$

El límite inferior (E_{lc}) se define postulando que todos los componentes del compuesto soportan el mismo esfuerzo y que la deformación resultante es el volumen promedio de las deformaciones locales. E_p y E_m son los módulos elásticos del refuerzo y de la matriz respectivamente.

$$E_{lc} = \left(\frac{\Phi_p}{E_p} + \frac{(1-\Phi_p)}{E_m} \right)^{-1} \quad (11)$$

3.2.3 Coeficiente de expansión térmica. La expansión térmica de un compuesto puede ser mayor en unas direcciones y menor en otras, reforzar el aluminio con partículas cerámicas implica una reducción en el coeficiente de expansión térmica. Para esta propiedad el modelo de Schapery permite determinar los coeficientes de expansión térmica de PR – AIMMCs en función de las características individuales de sus componentes (Ashby F, 2011) (Kainer Ulrich, 2006).

$$\alpha_{lc} = \frac{E_p \alpha_p \Phi_p + E_m \alpha_m (1 - \Phi_p)}{E_{uc}} \quad (12)$$

$$\alpha_{uc} = (1 + \nu_m) \alpha_m \Phi_m + (1 + \nu_p) \alpha_p \Phi_p - \alpha_{lc} \nu_c \quad (13)$$

$$\nu_c = \nu_m \Phi_p + \nu_m (1 - \Phi_p) \quad (14)$$

Donde:

- α_{lc} : Límite inferior del modelo para el coeficiente de expansión térmica del compuesto.
- α_{uc} : Límite superior del modelo para el coeficiente de expansión térmica del compuesto.
- α_p : Coeficiente de expansión térmica del refuerzo.
- α_m : Coeficiente de expansión térmica de la matriz.

- Φ_m : Fracción volumétrica de la matriz.
 ν_c : Coeficiente de Poisson del compuesto.
 ν_p : Coeficiente de Poisson del refuerzo.
 ν_m : Coeficiente de Poisson de la matriz.

3.2.4 Conductividad Térmica. La conductividad térmica determina el flujo de calor a una velocidad constante. El valor de la conductividad térmica del compuesto cae dentro de los valores de sus componentes individuales y es acotado por los límites:

$$\lambda_{uc} = \lambda_p \Phi_p + (1 - \Phi_p) \lambda_m \quad (15) \qquad \lambda_{lc} = \lambda_m \left[\frac{\lambda_p + 2\lambda_m - 2\Phi_p(\lambda_m - \lambda_p)}{\lambda_p + 2\lambda_m + \Phi_p(\lambda_m - \lambda_p)} \right] \quad (16)$$

- λ_{uc} : Límite superior del modelo para la conductividad térmica del compuesto.
 λ_{lc} : Límite inferior del modelo para la conductividad térmica del compuesto.
 λ_p : Conductividad térmica del refuerzo.
 λ_m : Conductividad térmica de la matriz.

3.3 Influencia de la Interface.

El fortalecimiento de los AIMMCs por la adición de SiC_p, depende de manera crítica de la calidad de la unión entre la matriz y el refuerzo.

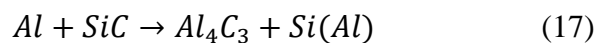
El enlace interfacial puede ser categorizado en dos grupos: como enlace interfacial mecánico y como enlace interfacial químico.

El enlace interfacial mecánico tiene significado especialmente para los materiales compuestos reforzados con fibras, mientras que el enlace químico solo es posible si existe contacto directo entre los átomos además de un intercambio electrónico. El tipo de intercambio electrónico define el carácter de la unión que puede ser de tipo metálico o iónico.

Así pues, las interacciones químicas y las reacciones matriz – refuerzo determinan la adhesión de la interface, modifican las características de los componentes y están relacionadas con las propiedades mecánicas del material. (Mitra & Mahajan, 1995).

3.3.1 Reacción química en las interfaces. La unión de las fases a través de reacción química puede producir un enlace fuerte entre la matriz y el refuerzo y por lo tanto un alto desempeño del material.

Un producto de reacción frágil, conlleva un detrimento en el desempeño del componente que se refleja en las propiedades macroscópicas del material. Por ejemplo, en los sistemas de Al y SiC_p durante los procesos de manufactura en estado líquido y semisólido debido a las altas temperaturas puede darse la siguiente reacción:



El Al_4C_3 es un compuesto frágil que actúa como concentrador de esfuerzos y sitio para la nucleación de grietas provocando la falla.

3.3.2 Tipos de falla interfacial en PR – AIMMCs: Cavitación. El control de falla interfacial en los PR – MMCs es el enfoque más eficiente para optimizar el desempeño mecánico de estos materiales, se precisa un conocimiento de las propiedades físicas y químicas, así como de los mecanismos de falla fundamentales que ocurren cerca de la interface.

Asociado a la segregación, las reacciones de precipitación, dislocaciones locales y a la inherente heterogeneidad de los materiales compuestos, pueden existir imperfecciones y discontinuidades que favorezcan la formación de grietas y la nucleación de cavidades.

La nucleación de cavidades es un modo de falla interfacial que ocurre en los materiales reforzados con partículas y se presenta de dos formas: por la ruptura de las partículas y por la pérdida de adhesión en la interface refuerzo – matriz. Se conoce como cavitación entonces a la falla dúctil, nucleación, crecimiento y coalescencia de micro cavidades dentro de la matriz o en cercanías de la interface (Kim, Tjong, & Mai, 2017)

4. Procedimiento Experimental y Procesamiento del material

La metodología experimental para lograr los objetivos planteados en el presente proyecto, se recoge en la heurística y la hermenéutica del trabajo investigativo realizado en el campo de la síntesis y el procesamiento de PR - MMCs. (Vilas G. Pol, 2014), (Wei, 2016), (Zhang, Shi, Chen, Li, & Xiao, 2006), (Ye, Zhang, & Lee, 2011), (Ye, Zhang, & Lee, 2013), (Barbera K. F., 2014) (Suslick & Bang, 2010) (Narayanan, y otros, 2016) (Hinman & Suslick, 2017).

El procesamiento del compuesto se llevó a cabo a través de una serie de tareas y actividades enmarcadas en dos etapas principales que son:

1. Fabricación del material de refuerzo.
2. Consolidación del material compuesto.

4.1 Fabricación del material de refuerzo.

4.1.1 Preparación de la plantilla polimérica. Primero se sintetizan bajo irradiación ultrasónica; esferas monodispersas de resorcinol y formaldehído (RF).

Para ello se preparó una solución solvente mezclando etanol (96 v%) y agua destilada en un vaso de precipitado de 250 ml, se añadió amoníaco en solución acuosa (25 wt%) como catalizador y la solución fue sonicada por 10 segundos.

Se agregan los reactivos: resorcinol sólido (99%) y formaldehído (37wt% en solución acuosa estabilizado con 10% de metanol); se agita la solución para iniciar la disolución del formaldehído y luego se inicia la irradiación ultrasónica. La reacción termina luego de transcurridos 5 minutos con el agotamiento de los reactivos formando una lechada como se puede ver en la figura 1.

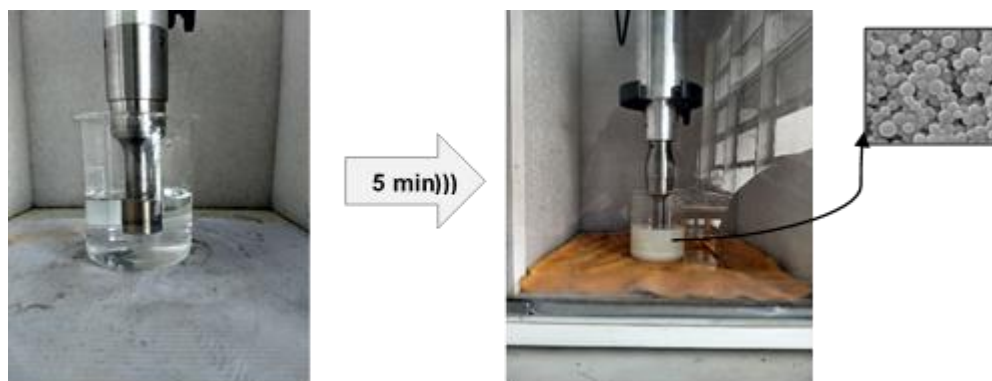


Figura 1 síntesis sonoquímica de resinas esféricas RF

El producto sólido que se obtiene de la actividad anterior, es separado de la solución por centrifugando (8500 rpm por 10 minutos) y posteriormente es lavado con etanol para eliminar el exceso de amónico.

Para mejorar la dispersión de las partículas, estas fueron suspendidas en alcohol isopropílico y puestas en un baño de ultrasonido por 2 horas; el sólido separado se dejó secar al aire libre durante 24 horas y luego a 40 °C en una estufa por un periodo de 4 horas.

4.1.2 Pirolisis (Carbonización) de las esferas RF. Las esferas de resina RF fueron carbonizadas en atmosfera inerte (nitrógeno) usando el siguiente tratamiento térmico: primero se evacuó el aire del horno inyectando el nitrógeno a 200 ml/min por 30 min, el horno se llevó a 650°C a razón de 1.5 °C/min sosteniendo la temperatura por 3 horas, la rata de enfriamiento del horno fue de 10°C/min. Los parámetros experimentales de las actividades anteriores aparecen en la tabla 1.

Tabla 1.

Parámetros experimentales para la síntesis de la plantilla de carbón amorfo en la etapa 1

ACTIVIDAD	PARÁMETROS EXPERIMENTALES							
Síntesis sonoquímica esferas RF (250-650nm)	HCHO	Resorcinol	H2O	EtOH	NH4OH	Initial	Potencia de sonicación	tiempo de reacción
	(ml)	(g)	(ml)	(ml)	(ml)	T(°C)	%	(min)
	1	1	100	40	0,5	25	20	5
Carbonización Esferas RF	Gas	purga	tiempo calentamiento	flújo N2	tratamiento	tiempo	enfriamiento	
	<i>I</i>	(L/min)	(min)	(°C/min)	(L/min)	T(°C)	(h)	(°C/min)
	N2	0,	20	1	1	650°C	3	10

Nota: Valores de los parámetros experimentales usados en la fabricación de SiC_p

4.1.3 Esferas de carburo de silicio con núcleo de grafito (SiC_p). Para fabricar las esferas de carburo de silicio se utiliza el método de síntesis en sales fundidas (MSS).

La plantilla de carbón amorfo obtenida en actividades anteriores se mezcla con silicio en polvo (40 µm) en relación molar (Si/C) de 1:4 y se añade al electrolito conformado por un sistema binario de sales (NaCl al 5 wt% NaF).

La síntesis se lleva a cabo en atmosfera reductora dentro de un crisol de grafito a 1100°C por un periodo de 6 horas (ver figura 2).

La masa que se obtiene se lava con agua destilada caliente para eliminar el exceso de sales y se seca a 50°C para su posterior caracterización.

El Carbón amorfo remanente dentro de las esferas de SiC se somete a un procedimiento de grafitización a baja temperatura. Estas esferas se introducen en un horno tubular en presencia de nitrógeno con un flujo aproximado de 100 ml/min y a una temperatura de 1000 °C durante 6h (ver anexo D).

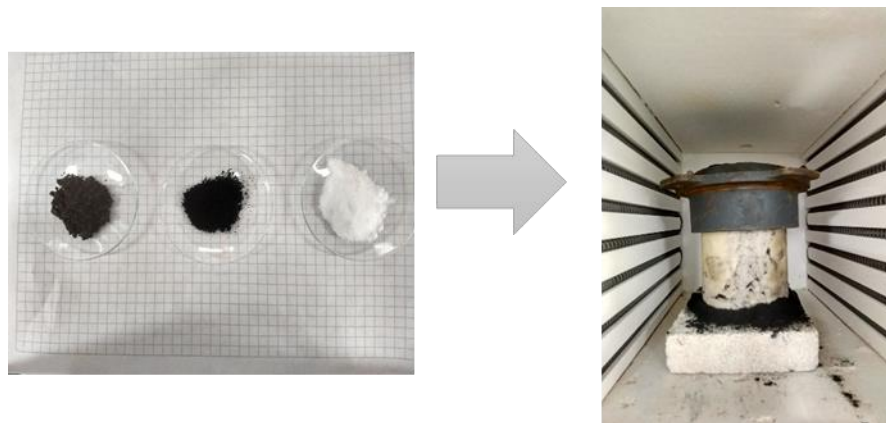


Figura 2 Esquema para el método MMS

4.2 Consolidación del Material Compuesto

La segunda etapa del procesamiento comprende la molienda de la aleación matriz (40 – 74 μm), la mezcla mecánica de la aleación matriz con el material de refuerzo, la compactación en verde a una presión de 20 - 30 MPa en pastillas de aproximadamente 1.2 cm de diámetro y la sinterización del material compuesto a 630°C en atmosfera de argón por 2 horas.

4.2.1 Molienda de la Aleación Matriz. La actividad se realizó en el laboratorio de molienda y beneficio de materiales asociado al grupo de investigación GIMBA del Parque Tecnológico Guatiguará de la UIS.

La aleación de aluminio; viruta inicialmente, se redujo de tamaño durante 10 minutos en un molino de anillos de alta energía a un tamaño de partícula entre 44 y 74 micrones. La tabla 2 muestra la composición química de la matriz de aluminio.

Tabla 2.

Composición química de la matriz

Aleación matrix	
Al	99,25 %
Otros	0,75 %

4.2.2 Mezcla Mecánica Matriz – Refuerzo. El aluminio en polvo se mezcló en un motero de ágata con fracciones de 1 y 2 wt% del material de refuerzo hasta obtener una distribución uniforme de las partículas en la en la matriz.

4.2.3 Compactación y Sinterización del Material Compuesto. El material compuesto (en polvo) se compactó en frío haciendo uso de una prensa hidráulica marca CALVER a una presión de 30 MPa en pastillas de 1,2 cm de diámetro y una masa de 1 gramo.

Los especímenes en verde se llevaron a un horno tubular para el procedimiento de sinterización eliminando el oxígeno de la atmósfera con un flujo de argón de 300 ml/min. El calentamiento del horno se realizó a una rata de 2.5 °C/min hasta una temperatura de 630 °C por 2h, luego se dejó enfriar el horno a temperatura ambiente a 3 °C/min.

5. Caracterización

5.1 Microscopía Electrónica de Barrido, Etapa I.

Se prepararon muestras de las esferas de resina RF, de la plantilla de carbón y de las esferas de SiC con núcleo de grafito.

Las muestras se llevaron al microscopio electrónico de barrido (SEM) obteniendo imágenes para la caracterización morfológica de los materiales. Adicionalmente se realizó el análisis elemental de composición haciendo uso de la sonda EDS acoplada al equipo de microscopía electrónica.

En la figura 3 aparecen las fotomicrografías de las resinas poliméricas de resorcinol y formaldehído, de la plantilla de carbón amorfo y de las esferas de SiC_p; las partículas tienen un tamaño de 250 a 650 nm de diámetro y una morfología uniforme y esférica que se mantiene a través de todo el procesamiento. En la figura 4, se muestran los espectros de dispersión EDS de la plantilla de carbón amorfo y de las partículas esféricas de SiC. Los resultados aportados por el laboratorio aparecen en el anexo E indicando la composición química de las muestras

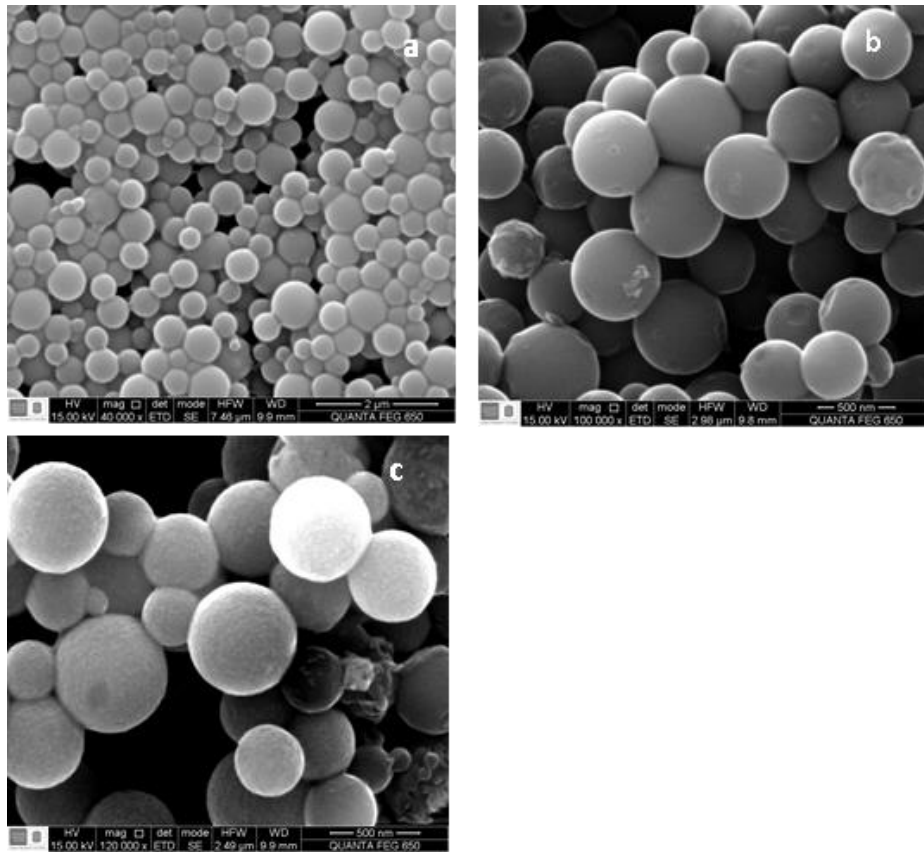


Figura 3 Microscopía electrónica de barrido **a.** esferas poliméricas RF, **b.** Plantilla esférica de carbón amorfo, **c.** Partículas de con núcleo de grafito SiC_p.

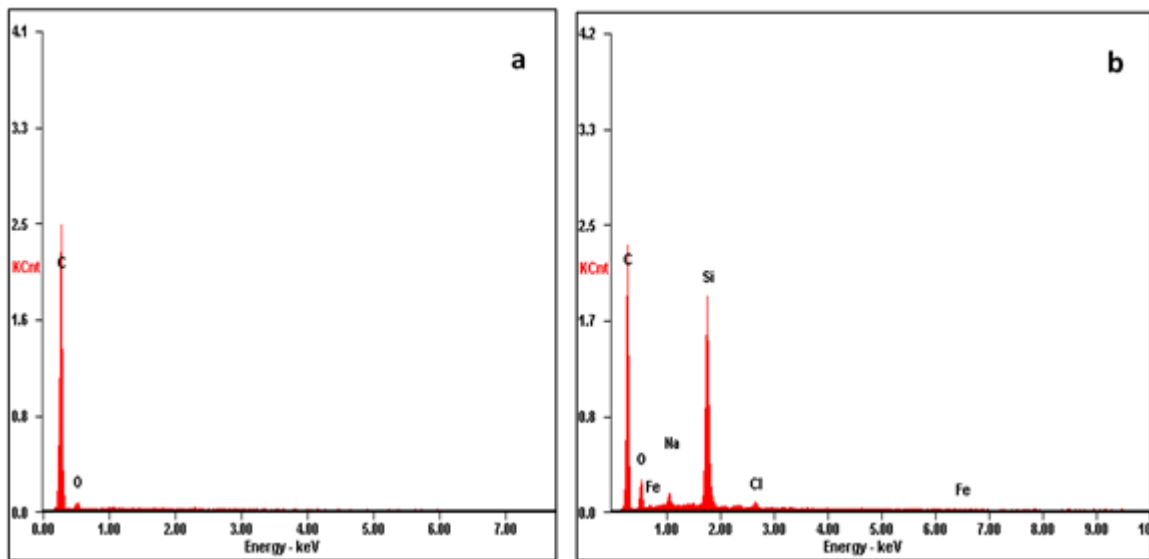


Figura 4 Espectros EDS a. plantilla esférica de carbón b. partículas de SiC_p

5.2 Difracción de Rayos X del material de refuerzo

En la figura 5 se muestra el difractograma de rayos X relacionado con la muestra del material de refuerzo; es decir, de las partículas esféricas de carburo de silicio.

En el espectro de difracción se aprecian picos a ángulos 2θ de 22, 36 y 60 grados, picos característicos para el β -SiC como se puede constatar en las bases de datos y en los resultados obtenidos por esta y otras investigaciones alrededor de este material (ver anexo E).

Los picos que aparecen a ángulos 2θ de 26 y 45 grados son característicos del grafito presente en el material de refuerzo, corresponden a las partículas de carbón usadas como plantilla que no reaccionaron con el silicio durante la síntesis en sales fundidas, adicionalmente se realizó la prueba de caracterización a una muestra de carbón que se sometió al mismo tratamiento de grafitización. Este y otros espectros del grafito aparecen en el anexo E.

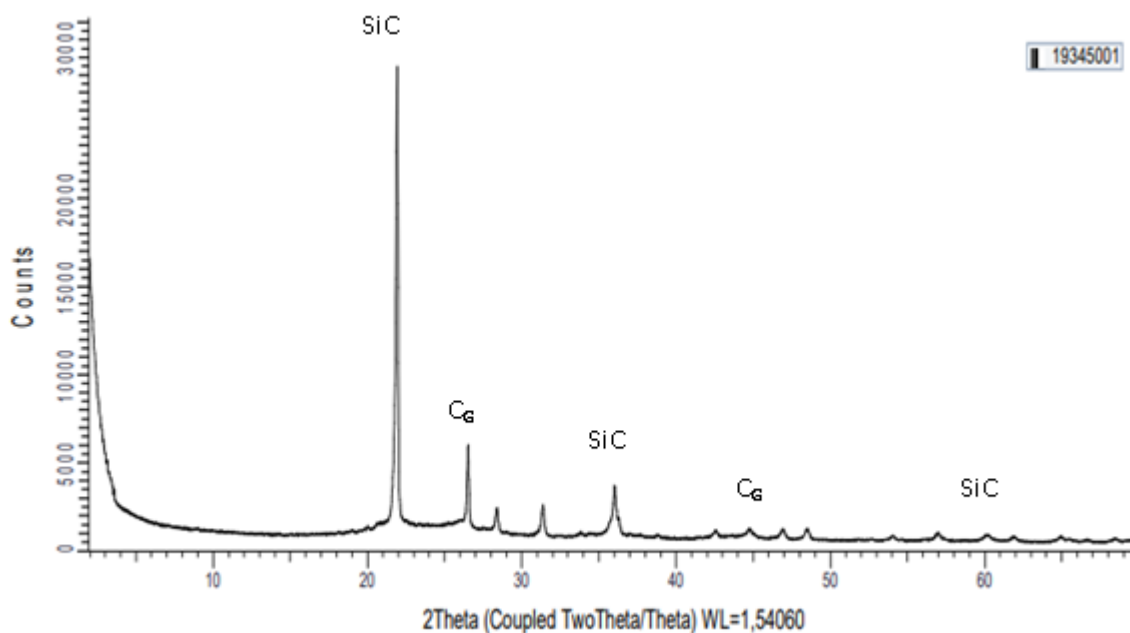


Figura 5 Espectro DRX de la muestra de SiC_p en el que se detecta carburo de silicio SiC y grafito C_G

5.3 Microscopía electrónica de barrido SEM-EDS del material compuesto consolidado.

Para la caracterización del material compuesto se utilizó un microscopio electrónico de barrido QUANTA FEG 650 y las imágenes fueron tomadas con las siguientes características: Alto vacío, voltaje de aceleración 15kV, detector para imágenes de Electrones secundarios (SE): Everhart Thornley detector ETD y de Electrones retrodispersados (BSE): Back scattered electrón detector (BSED) tipo SSD.

En la microestructura del material compuesto sintetizado de la figura 6, se observa lo siguiente:

- nódulos del material reforzante (SiC_p) cuyo tamaño esta entre 50 y 100 micrones,
- partículas de aluminio parcialmente sinterizado
- pequeñas porosidades.

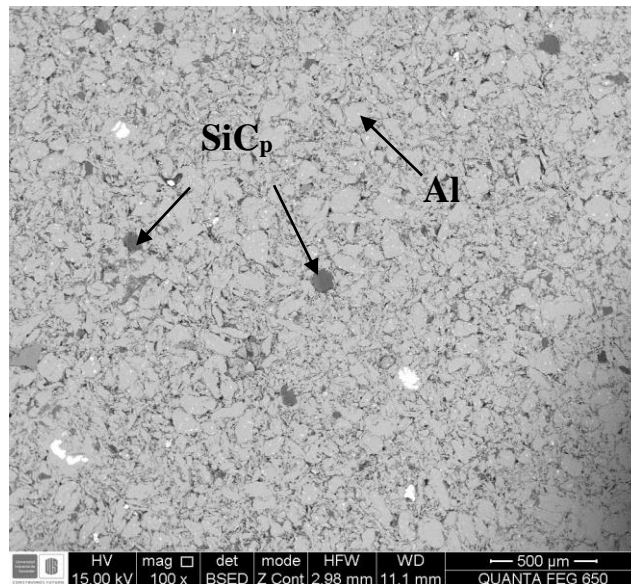


Figura 6 Microestructura del material compuesto sintetizado. 1 wt% SiC_p.

Esta observación indica que las partículas de material reforzante tienden a aglomerarse durante la mezcla con los polvos de aluminio, posiblemente debido a fuerzas electrostáticas o energía superficial de las mismas. La sinterización parcial de los granos de aluminio indica que se requiere de una mayor temperatura de sinterización y mayor tiempo de tratamiento.

En la figura 7, la microestructura de los nódulos de material reforzante. En esta estructura se observa la acumulación de SiC_p cuyo tamaño es del orden de 0,5 micrones (fig. 7.a), en la estructura ampliada de uno de estos nódulos se pueden observar algunas partículas de este material en corte donde se visualiza la película de carburo de silicio de unos cuantos nanómetros recubriendo el núcleo de grafito de las partículas (fig. 7.b); también se observa el grado de adherencia entre los granos de la matriz de aluminio y el nódulo de material de refuerzo (fig. 7.c). En el Anexo F se muestran los espectros EDS de un nódulo de SiC_p y del núcleo de una de estas partículas.

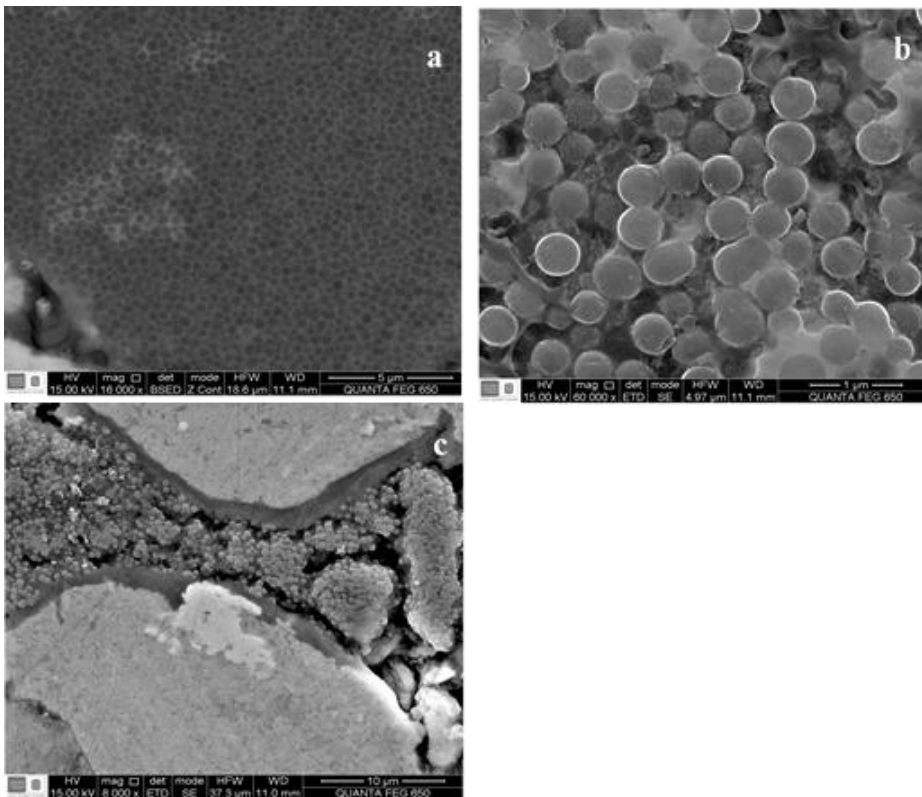


Figura 7 Microestructura de los nódulos de material reforzante a) aglomeración de SiC_p, b) estructura ampliada de uno de los nódulos de SiC_p, c) adherencia entre el nódulo de refuerzo y la matriz.

6. Conclusiones

Se obtuvo un material compuesto de matriz metálica de aluminio reforzado con 1 wt% de partículas esféricas de carburo de silicio con núcleo de grafito. En su estructura la presencia de nódulos de material reforzante debido a aglomeración preferencial de las partículas durante el mezclado de los polvos.

Se sintetizaron in situ esferas de carburo de silicio sobre plantillas esféricas de carbón amorfo por el procedimiento de sales fundidas. Estas esferas poseen un diámetro de partícula de 250 a 650 nanómetros y se caracterizaron mediante la técnica de microscopía electrónica de barrido SEM-EDS y la técnica de difracción de rayos X.

El carbón amorfo remanente que conforma los núcleos de las esferas de carburo de silicio, se llevó a grafitización en horno tubular a 1100 °C con un flujo de nitrógeno constante.

La plantilla de carbón amorfo, precursor fundamental en la síntesis de partículas esféricas de carburo de silicio, se obtuvo a partir de la pirolisis de resinas esféricas de resorcinol y formaldehído generadas en una síntesis rápida bajo irradiación ultrasónica

7. Recomendaciones

Para evitar la formación de racimos o nódulos y mejorar la dispersión de SiC_p en la matriz de aluminio, se recomienda disgregar las partículas con ultrasonido de mayor potencia antes, después y durante el procesamiento de la plantilla de carbón y la síntesis de SiC. Además, se aconseja aumentar el tiempo de mezcla de los polvos de aluminio y SiC_p en un sistema más eficiente para esta actividad.

Para mejorar el grado de sinterización del material compuesto se recomienda, disminuir el tamaño de partícula de la matriz de aluminio a un diámetro similar al de las partículas de material reforzante, aumentar la temperatura y el tiempo de tratamiento.

Referencias Bibliográficas

- Abbasipour, B., Niroumand, B., & Vaghefi, S. M. (2010). Compocasting of A356-CNT composite. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 1561-1566.
- Adebesi, A. (2011). Metal Matrix Composite Brake Rotor: Historical Development and Product Life Cycle Analysis. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering. IJAME*, 471 - 480.
- Akhlaghi, F., Lajevardi, A., & Maghanaki, H. (2004). Effects of casting temperature on the microstructure and wear resistance of compocast A356/SiC_p composites: a comparison between SS and SL routes. *Materials Process Technology*, 155–156: 1874–1880.
- Ashby, F. M. (2011). *Materials Selection in Mechanical desing*. Burlington: BH.
- Babalola, P. O., Bolu, C. A., Inegbenebor, A. O., & Odunfa, K. M. (2014). Development of Aluminium Matrix Composites: A Review. *Online International Journal of Engineering and Technology Research*, 1-11.
- Barbera, K., Frustreri , L., Italiano , G., Spadaro, L., Frusteri , F., Perathoner, S., & Centi, G. (2014). Low temperature graphitization of amorphus carbon nanospferes . *Chinese Journal of Catalysis*, 869-876.
- Bodukuri, A. K., Eswaraiah, K., Rajendar, K., & Sampath, V. (2016). Fabrication of Al-SiC-B4C Metal Matrix Composite by Powder Metallurgy Technique and Evaluating Mechanical Properties. *Perspectives in Science*, 8, 428-431.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2013). *Materials Science and Engineering, An Introducción*. USA: wiley.

- Casati, R., & Vedani, M. (2014). Metal Matrix Composites Reinforced by Nano-Particles: A Review. *metals*, 65-83.
- Dehghan, H. A., & Shahmiri, M. (2012). Production of A356–1 wt% SiC nanocomposite by the modified stir casting method. *Materials Science and Engineering, A*, 556, 921–926.
- Dhiyaneswaran, S., & Amirthagadeswaran, K. S. (2011). Comparative Study of Disc Brake Materials through Computer Aided Engineering. *International Journal of Modern Engineering Research*, 173-179.
- Govindan, M., & Viji, B. (2017). Design and Analysis of Automobile Brake Disc by Using Al/SiC MMC. *International Journal of Innovative Research in Science Engineering and Technology*, 4815-4825.
- Hinman, J., & Suslick, K. S. (2017). Nanostructured Materials Synthesis using ultrasound. *Topics in current chemistry*, 375(1).
- Kainer Ulrich, K. (2006). *Metal Matrix Composite: Custom-made Materials for Automotive and aerospace engineering*. Wiley - VCH .
- Kalpajkian, S., & Schmith, S. R. (2009). *Manufacturing Engineering and Technology sixth edition in SI UNITS*. USA: PEARSON.
- Khosravi, K., & Akhilaghi, F. (2015). Comparison of microstructure and wear resistance of A356–SiC_p composites processed via compocasting and vibrating cooling slope. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 25(8), 2490-2498.
- Kim, J.-K., Tjong, S. C., & Mai, Y. W. (2017). Effect of Interface Strength on Metal Matrix composites Properties. *Comprehensive Composite Materials II*, 22-59.
- Lo, J. (2005). Designing a Composite Material for Use in Brake Applications. *Materials Science Forum*, 475-479, 1109-1112.

- Mavhungu, S. T., Akinlabi, E. T., Onitiri, M. A., & Varachia, F. M. (2016). Aluminum Matrix Composites for Industrial Use: Advances and Trends. *Procedia Manufacturing*, 178-182.
- Mitra, R., & Mahajan, Y. R. (1995). Interfaces in Discontinuously Reinforced Metal matrix Composites: An Overview. *Bulletin of Materials Science*, 18(4), 405-434.
- Narayanan, B., Deshmukh, S., Shrestha, L. K., Ariga, K., Pol, V. G., & Sankaranarayanan, S. K. (2016). Cavitation and radicals drive the sonochemical synthesis of functional polymer spheres. *Applied Physics letters*, 109(4), 041901.
- Onat, A., Akbulut, H., & Yilmaz, F. (2007). Production and characterisation of silicon carbide particulate reinforced. *Journal of Alloys and Compounds*, 375–382.
- Purohit, R., Rana, R. S., & Verma, C. S. (2012). fabrication of Al-SiC_p composites through powder Metallurgy Process and Testing Of Properties . *International Journal of Engineering Research and applications*, 420-437.
- Ramnath, V. &. (2014). Aliminum Metal Matrix Composites - A Review. *Reviews on advanced materials science* , 38. 55-60.
- Rashid, A. (2014). Overview of Disc Brakes and Related Phenomena - a review, (10)4. *International Journal of Vehicle Noise and Vibration*, 257-301.
- Ravindran, P. K., Manisekar, P., Rathika, P., & Narayanasamy. (2013). Tribological properties of powder metallurgy – Processed aluminium self lubricating hybrid composites with SiC additions. *Materials and Desing*, 561-570.
- Rethwish, D. G., & Callister, W. D. (2014). *Materials Science and Engineering an Introduction*. United States of America: Jhon Wiley and Sons.

- Sajan, T., Pillai, R., Pai, B., Satayanarayana, K., & Rohatgi, P. (2007). Fabrication and characterization of Al - 7Si - 0.35Mg/ fly ash metal matrix composites processed by different stir casting routes. *Composite Science and Technology* 67, 3369 - 3377.
- Sajjadi, S. A., Ezatpour, H. R., & Torabi Parizi, M. (2012). Comparison of microstructure and mechanical properties of A356 aluminum alloy/Al₂O₃ composites fabricated by stir and compo-casting processes. *Material & Design*, 34, 106-111.
- Srinivasan, D., Kadaveveramath, R., Rajendran, S., & Ganesh. (2017). State-of-Art Review of Ceramic Reinforced Aluminum Metal Matrix Composite and its Machining Characteristics. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences*, 154-164.
- Surappa, M. (2003). Aluminium Matrix Composites: Challenges and Opportunities. *Sadhana vol 28 parts 1 & 2*, 319-334.
- Suslick, K., & Bang, J. H. (2010). Applications of ultrasound to the synthesis of nanostructured materials. *Advanced Materials*, 1039-1059.
- Telang, K., Rehman, A., Dixit, G., Das, S., & Azad, M. (2010). Alternate Materials In Automobile Brake Disc Applications With Emphasis On Al Composites- A Technical Review. *Journal of Engineering Research and Studies*, 35-46.
- Vani, V. V., & Chak, S. K. (2018). The effect of process parameters in Aluminum Metal Matrix Composites with Powder Metallurgy. *Manufacturing Review*, 5, 7.
- Vilas G. Pol, L. K. (2014). Tunable, Functional Carbon Spheres Derived from Rapid Synthesis of. *Applied Materials and Interfaces*, 6, 10649–10655.
- Wei, G. (20 de junio de 2016). *Rapid Synthesis and Structure Control of Carbon Spheres by Ultrasoun Method*. Trondheim, Norwegian: NTNU.

- Ye, J., Zhang, S., & Lee, W. (2011). Novel low temperature synthesis and characterization of hollow silicon carbide spheres. *Microporus and Mesoporus Materials*, 25-30.
- Ye, J., Zhang, S., & Lee, W. E. (2013). Molten salt synthesis and characterization of SiC coated carbon black particles for refractory and castable applications. *Journal of the European Ceramic Society*, 33, 2023-2029.
- Zhang, Y., Shi, E.-W., Chen, Z.-Z., Li, X.-B., & Xiao, B. (2006). Large-scale fabrication of silicon carbide hollow spheres. *Journal of Materials Chemistry*, 4141 - 4145 .

Apéndices

Apéndice A. Algunas propiedades mecánicas y físicas de partículas cerámicas.

Tabla A1

Propiedades mecánicas y físicas de varias partículas cerámicas empleadas como refuerzo

Cerámico	densidad g/cm ³	Módulo Elástico		Dureza Knoop	Resistencia a la compresión		Conductividad Térmica		Cohesiente de Expansión Térmica		Conductividad Térmica específica
		Gpa	10 ⁶ psi		Mpa	Ksi	W/mK	Btu.ft/h	10 ⁻⁶ /°K	10 ⁻⁶ /°F	
SiC	3,21	430	62,4	2480	2800	406,1	132	76,6	3,4	6,1	41,1
B4C	2,52	450	65,3	2800	3000	435,1	29	16,8	5	9	11,5
Al ₂ O ₃	3,92	350	50,8	2000	2500	362,6	32,6	18,9	6,8	12,2	8,3
TiC	4,93	345	50	2500	2500	362,6	20,5	11,9	7,4	13,3	4,2

Nota: adaptado de Aluminum Matrix Composites for Industrial Use: Advances and Trends (Mavhungu, 2016)

Apéndice B. Técnicas de procesamiento, Stir Casting y Vibrating Cooling Slope (VCS).

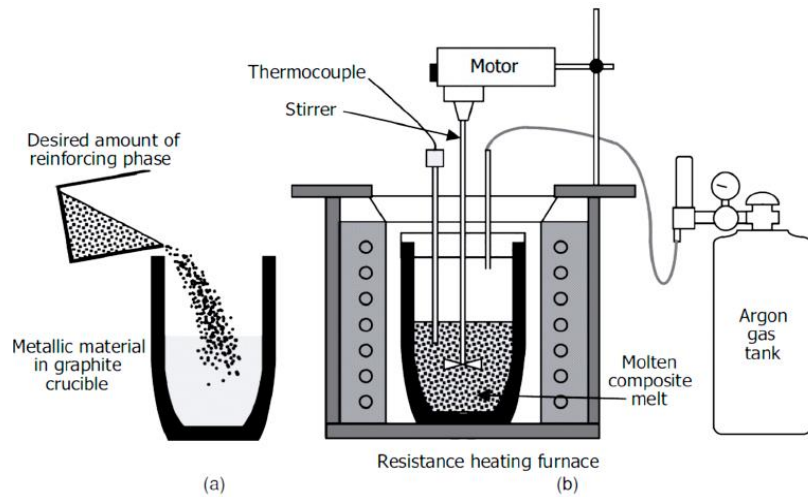


Figura B1 instalación típica del Stir Casting a) mezcla de los ingredientes b) agitación mecánica. Adaptado de Adebisi, (2011)

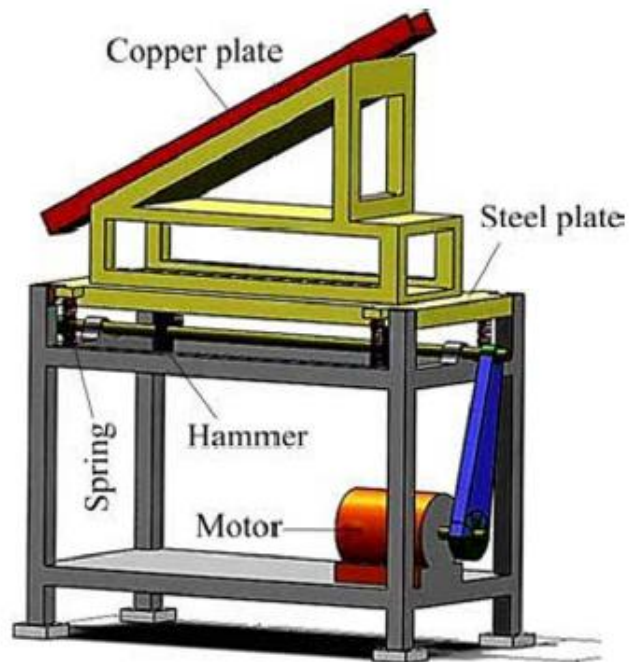


Figura B2. Representación del aparato empleado en el proceso VCS adaptado de (Khosravi & Akhilaghi, 2015)

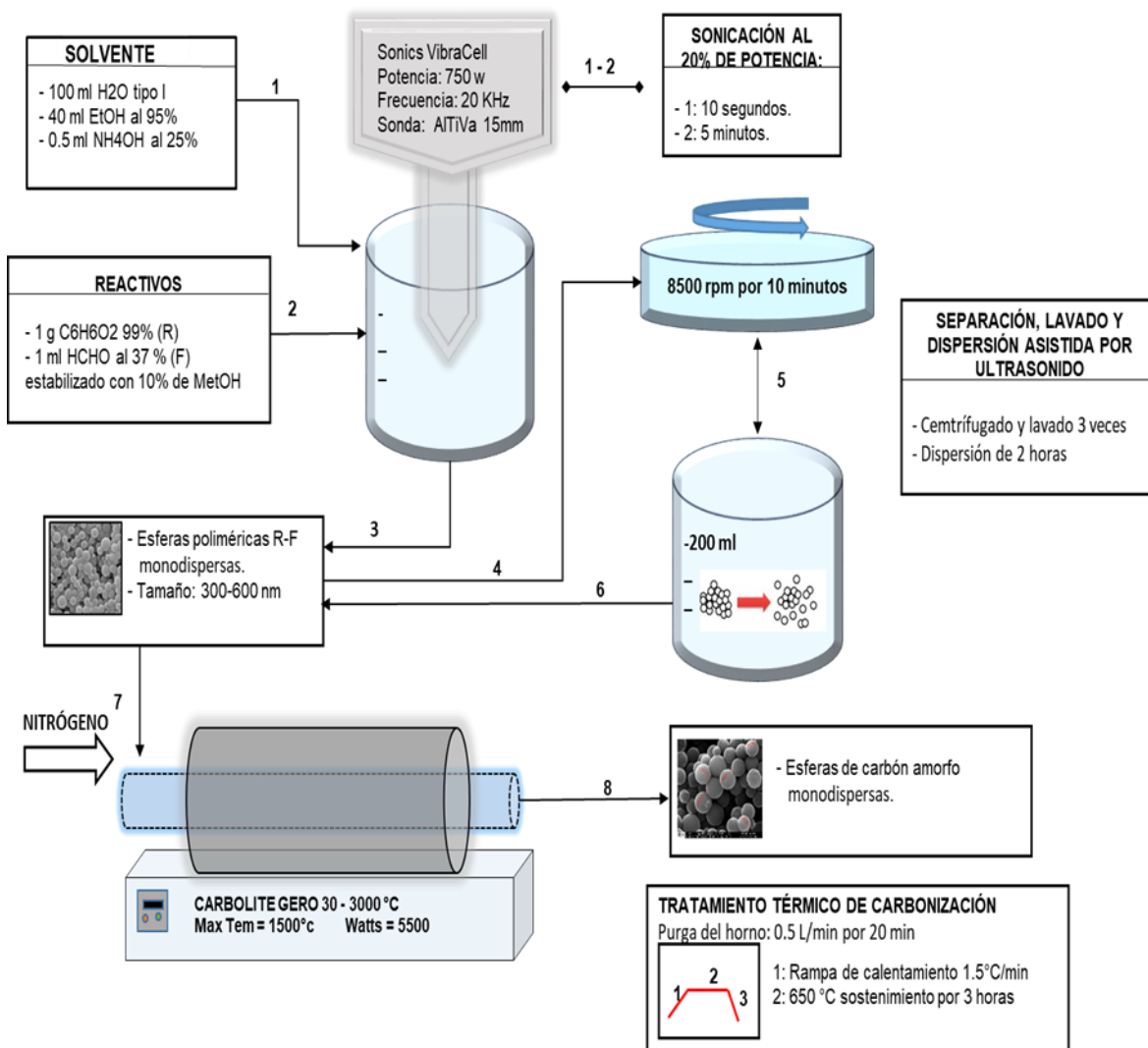
Apéndice C. Perfil de atributos vs requisitos de diseño de un AIMMC para discos de freno.**Tabla C1**

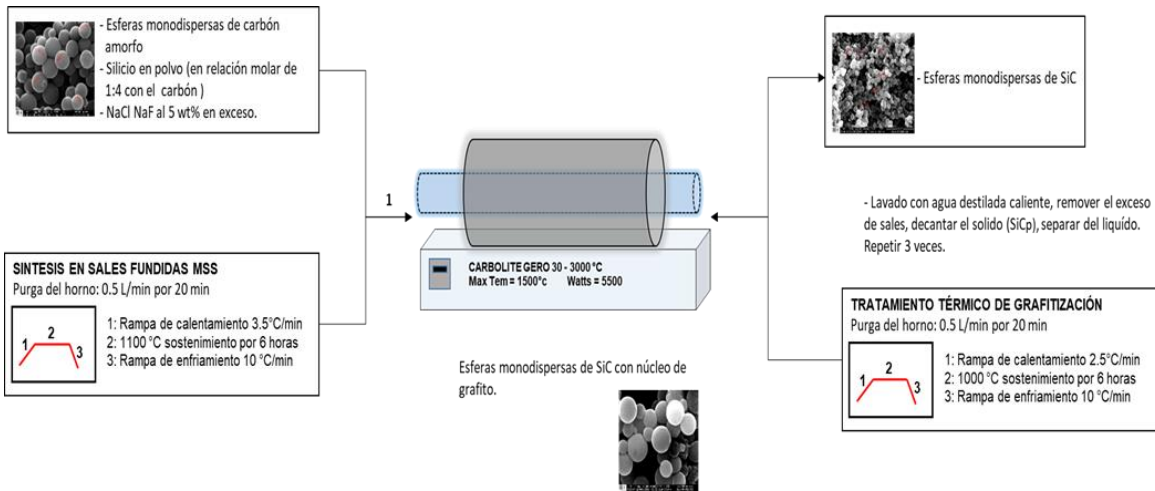
Perfil de propiedades del material frente a los requisitos de diseño en la fabricación de discos de freno

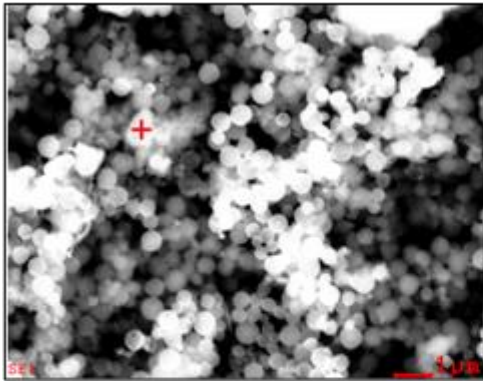
Nota: adaptado de (Lo, 2005) *

Propiedad del Material	Requerimiento funcional (en comparación con la Fundición gris, CI)
Densidad	La densidad del AIMMC es de 2.7g/cm ³ , la fundición gris tiene una densidad de 7.3g/cm ³ .
Coefficiente de Expansión térmica (CTE)	El AIMMC posee un CTE ligeramente mayor al de la fundición, esto es: menos estabilidad dimensional y menos resistencia a la fatiga. Se puede hacer equivalente.
Conductividad Térmica (TC)	La TC del AIMMC es al menos 3 veces mayor. Es mejor conductor del calor que CI.
Calor específico (SH)	AIMMC tiene menor SH que CI
Resistencia al Choque térmico	La resistencia al choque térmico es al menos 10 veces mayor que la fundición gris.
Resistencia a la fatiga	Para minimizar la fatiga térmica se requiere de un bajo módulo y de un bajo CTE, el AIMMC tiene menor módulo y menor CTE.
Propiedades a alta temperatura	El AIMMC tiene una temperatura operacional máxima muy inferior a la CI, esto conlleva a menor temperatura de servicio y menor integridad de la superficie de desgaste.
Resistencia	Los AIMMCs tienen mayor resistencia mecánica que la fundición para soportar mayores cargas, mayor torque de frenado y mayores esfuerzos térmicos.
Módulo elástico	Se puede conseguir un módulo elástico equivalente con el de la CI, un alto módulo disminuye la resistencia al choque térmico y un módulo muy bajo promueve deformación mecánica.
Capacidad de amortiguamiento	Los AIMMC ofrecen menos ruido, vibración y aspereza de las superficies.
Resistencia a la Corrosión	Los AIMMCs poseen mayor resistencia a la corrosión.
Maquinabilidad	Acarrea mayores costos pero puede ser evitada.

Lo, J. (2005). Designing a Composite Material for Use in Brake Applications. Materials Science Forum, 475-479, 1109-1112.

Apéndice D. Diagrama de flujo de procesos para obtener SiC_p.



Anexo E Resultados de laboratorio de la caracterización del material, difractogramas.

<i>Elemento</i>	<i>Wt%</i>
C	68.73
O	08.13
Na	01.23
Si	20.59
Cl	00.90
Fe	00.41

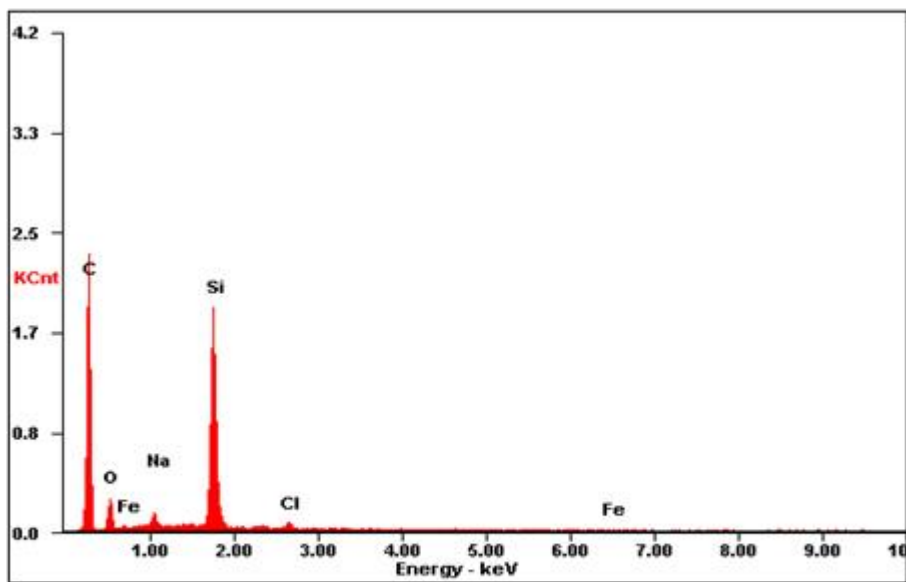
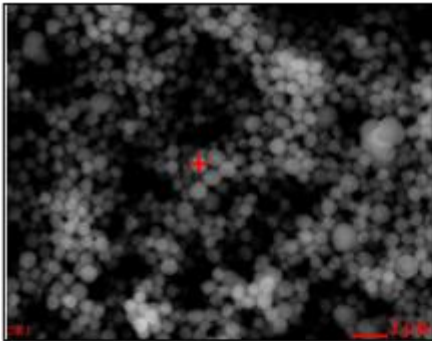


Figura E1 Resultados EDS Muestra Sic



<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>C</i>	90.51	92.70
<i>O</i>	09.49	07.30

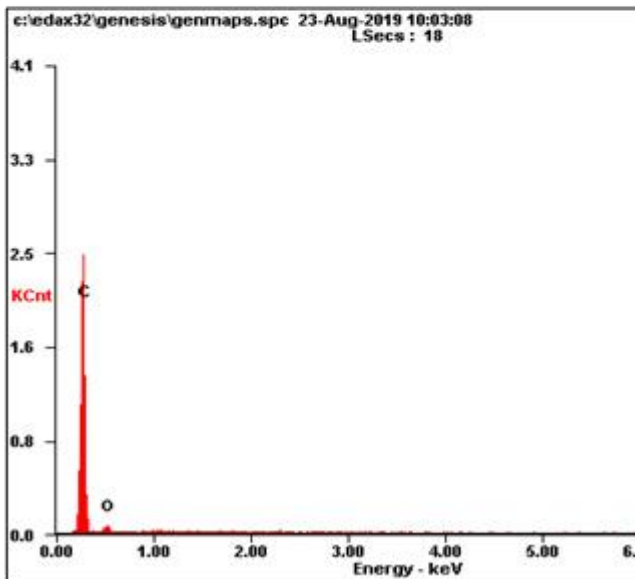


Figura E1 Resultados EDSMuestra De Carbón

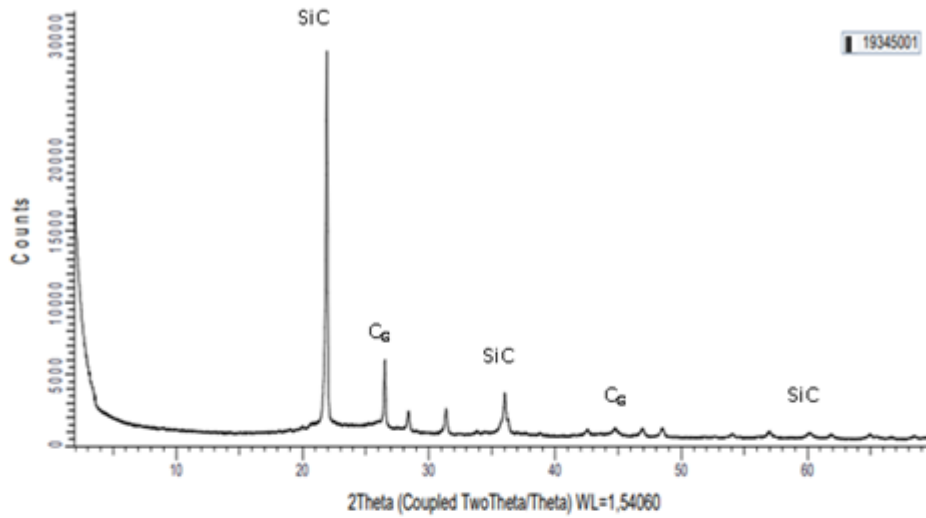


Figura E Espectro DRX de las partículas de SiC con núcleo de grafito

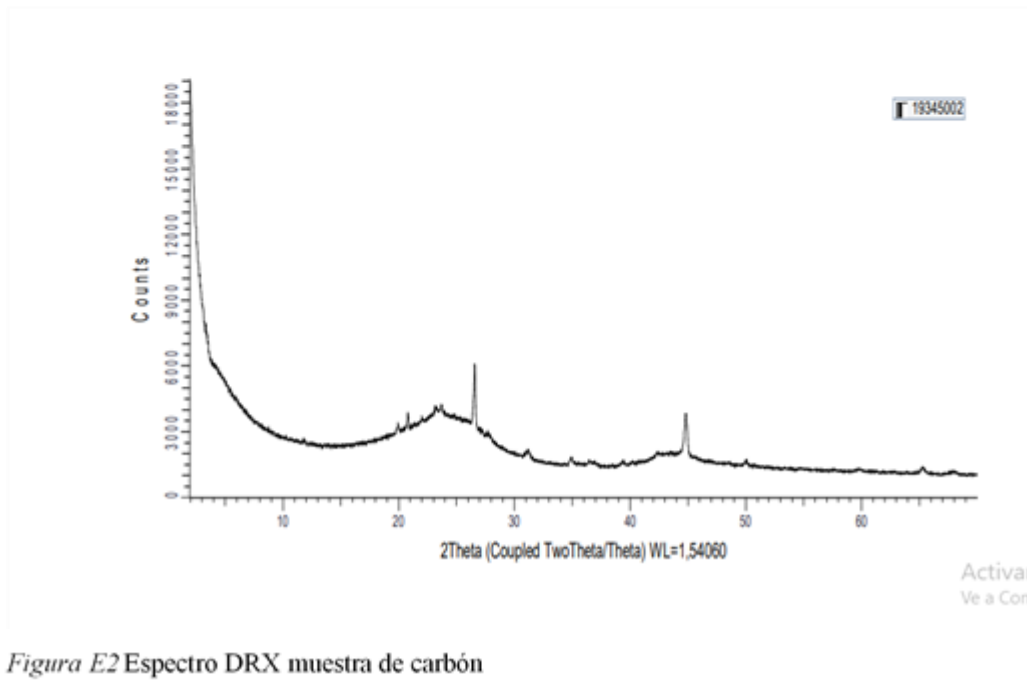


Figura E2 Espectro DRX muestra de carbón

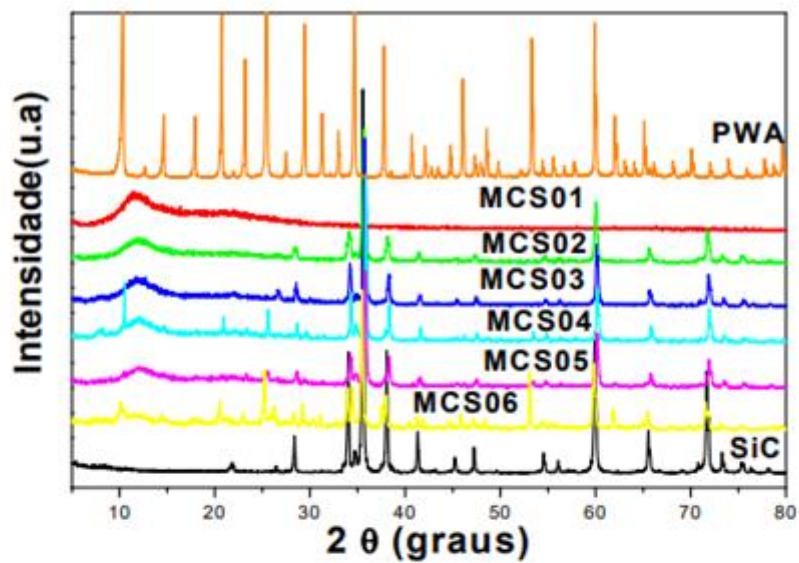


Figura E1 difractograma típico para el carburo de silicio

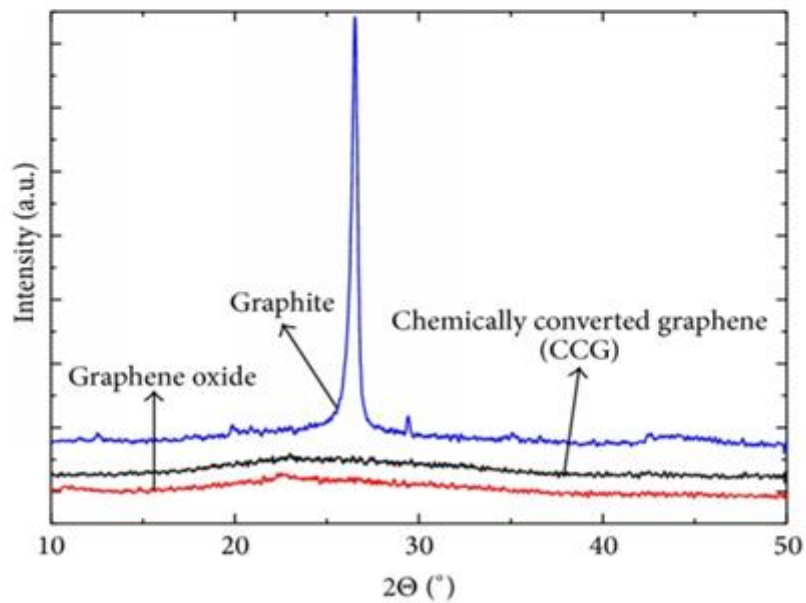


Figura E2 Difractograma típico del grafito

Apéndice F. Espectros EDS Material de refuerzo a) Nódulo de SiC_p, b) Núcleo de una partícula de SiC_p.

