

**UNIVERSIDAD CENTRAL “MARTA ABREU” DE LAS VILLAS**

**FACULTAD DE MATEMÁTICA, FÍSICA Y COMPUTACIÓN**

**DEPARTAMENTO DE FÍSICA**

**GRUPO DE FÍSICA DE LOS MATERIALES**



# **Desarrollo y caracterización de un material compuesto de matriz de aluminio**

**Autora: Yadelvys García Figueredo**

Santa Clara, Cuba, 2017

**UNIVERSIDAD CENTRAL “MARTA ABREU” DE LAS VILLAS**

**FACULTAD DE MATEMÁTICA, FÍSICA Y COMPUTACIÓN**

**DEPARTAMENTO DE FÍSICA**

**GRUPO DE FÍSICA DE LOS MATERIALES**



# **Desarrollo y caracterización de un material compuesto de matriz de aluminio**

Autora: Yadelvys García Figueredo

Tutor: Dr. Jesús Hernández Ruiz

Santa Clara, Cuba, 2017

## **DEDICATORIA**

---

Cuando tengo que tomar decisiones suelo pensármelo demasiado y es cuando muchos creen que soy indecisa, pero es que le doy relevante importancia a cuestiones que para otros son insignificantes. La verdad, si algo me caracteriza, es que me gusta acabar lo que empiezo, un juego, una competencia, una tarea, un libro,... una carrera; ¡mi carrera no podía ser la excepción! Y aquí estoy, con la controversia de a quién le dedico mi tesis de grado, es entonces que me remonto al comienzo de todo, a quién le debo la decisión de irme a estudiar lejos de mi hogar, de mi familia. Después de muchas vueltas una sola respuesta me da la emoción que buscaba: a mi abuelito querido, que no me dejó terminar de explicar y me dijo: ¡Ve! Me abrió las puertas a lo desconocido y salí de mi habitual confort para enfrentarme a la vida que no deja de enseñarme que se hace camino al andar, sólo hay que escoger el rumbo.

## **AGRADECIMIENTOS**

---

Agradecer es fácil, más cuando se tiene mucho que agradecer y a muchas personas. Mi familia, con sus más contras que pros, es la mejor del mundo. Eso suena un poco cursi, pero así lo siento, a cada momento han estado ahí si los necesito y me han apoyado incondicionalmente en mis estudios, cada uno aportando su granito de arena a esta inmensa montaña de necesidades. Mis amigos, los de siempre, no les hago distinción entre amigos y familia, para mí son lo mismo, porque he recibido de ellos en igualdad de condiciones. En la universidad he encontrado todo tipo de personas, pero de todas se aprende y aprendí que hay unas personitas especiales que nunca olvidaré, con los que compartí buenos y malos momentos, noches interminables de estudio, incertidumbres y miedos en las pruebas, de los que obtuve contención y fuerzas cuando lo necesité, con los que luché codo a codo contra el tiempo, el cansancio e incluso el desánimo, mis compañeros de cinco años de preparación. No puedo dejar de mencionar a mis profesores y tutor: Jesús E. Hernández Ruiz, que con esfuerzo y comprensión me han ayudado a cruzar la meta; en especial a uno que adoro, que nos hizo sus hijos y más que en la física nos guió en la vida: Víctor M. Mujica Marcelo. También a todos los amigos que me pusieron a disposición tiempo y recursos para la realización de este trabajo. A todos los que he mencionado, mis más sinceros agradecimientos, por ustedes he llegado hasta aquí. ¡GRACIAS!

## **RESUMEN**

---

En el presente trabajo se describe el procedimiento de obtención y caracterización de una variante económica y ambientalmente compatible de un material compuesto de matriz de aluminio que emplea como refuerzo materiales naturales o de desechos.

Primeramente, se caracterizaron los posibles materiales a emplear como refuerzo, la ceniza de bagazo de caña de azúcar colectada directamente de la caldera del central “Luis Arcos Bergnes” y la arcilla natural del yacimiento Miller. Empleando técnica de difracción de rayos X (XRD), fluorescencia de rayos X (XRF) y microscopía electrónica de barrido (SEM) se determinó que la ceniza está compuesta fundamentalmente por silicio (alrededor 80 %), expresado como  $\text{SiO}_2$ , y que las fases presentes son mayoritariamente cristobalita y tridimita. En el caso de la arcilla, también se empleó el análisis termogravimétrico (DTG). El estudio comparativo de la arcilla natural y calcinada mostró que en esta última están presentes las fases cuarzo, magnesio-hornablenda, diopsidio, albita y moscovita. Las fases presentes en la ceniza y en la arcilla calcinada son típicas de materiales cerámicos de elevada dureza, lo cual les confiere a estos dos materiales propiedades adecuadas para ser empleados como refuerzos en materiales compuestos de matriz de aluminio.

Luego, empleando técnicas de pulvimetalurgia, se fabricó un composite de matriz de aluminio que emplea como material de refuerzo a la ceniza antes estudiada. El estudio comparativo del composite aluminio-4 % ceniza de bagazo de caña de azúcar y de la matriz sin reforzar, mostró que la ceniza actúa favorablemente como material de refuerzo, al obtenerse incrementos significativos de la dureza del compuesto con respecto a la matriz sin reforzar.

## **ABSTRACT**

---

The process of obtaining and characterizing an economically and environmentally compatible variant of an aluminum matrix composite material that uses as reinforcement natural materials or waste, is describing in the present work.

Firstly, the possible materials to be used as reinforcement: the sugarcane bagasse ashes, collected directly from sugar factory boiler “Luis Arcos Bergnes”, and the natural clay from the Miller deposit, were characterized. Using X-ray diffraction (XRD) technique, X-ray fluorescence (XRF) and scanning electron microscopy (SEM), it was determined that the ash is composed mainly of silicon (about 80%), expressed as  $\text{SiO}_2$ , and that the phases present are mostly cristobalite and tridymite. In the case of clay, thermo gravimetric analysis (DTG) was also used. The comparative study of the natural and calcined clay showed that the quartz, magnesium-hornblende, diopsidium, albite and muscovite phases are present in the calcined clay. The phases present in ash and calcined clay are typical of high hardness ceramic materials, which gives these two materials suitable properties to be used as reinforcements in aluminum matrix composite materials.

Then, using powder metallurgy techniques, an aluminum matrix composite that uses as reinforcement material the previously studied ash was fabricated. The comparative study of the composite aluminum-4 % sugarcane bagasse ash and the unreinforced matrix showed that the ash acts favorably as a reinforcing material, resulting in significant increases in the hardness of the compound with respect to the unreinforced matrix.

## **TABLA DE CONTENIDO**

---

<b>DEDICATORIA</b> .....	2
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	3
<b>RESUMEN</b> .....	4
<b>ABSTRACT</b> .....	5
<b>LISTADO DE TABLAS</b> .....	8
<b>LISTADO DE SIGLAS EMPLEADAS</b> .....	10
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	11
<b>CAPÍTULO I. Materiales compuestos</b> .....	18
<b>1.1. Materiales compuestos. Generalidades</b> .....	18
<b>1.2. Materiales compuestos de matriz metálica</b> .....	19
<b>1.3. Materiales compuestos de matriz de aluminio</b> .....	20
<b>1.4. Materiales de refuerzo</b> .....	25
<b>1.4.1. Ceniza volante</b> .....	27
<b>1.4.2. Escoria siderúrgica</b> .....	28
<b>1.4.3. Ceniza de bagazo de caña de azúcar</b> .....	29
<b>1.4.4. Ceniza de cáscara de arroz</b> .....	30
<b>1.4.5. Otros residuos</b> .....	30
<b>1.4.6. Refuerzos de origen natural</b> .....	31
<b>1.4.7. Efectos de los refuerzos cerámicos sobre el comportamiento de la matriz de aluminio en AMCs</b> .....	31
<b>1.5. Métodos de producción para AMCs</b> .....	32
<b>1.5.1. Pulvimetalurgia</b> .....	34
<b>CAPÍTULO II. Materiales y Métodos</b> .....	36
<b>2.1. Caracterización de la SCBAB y de la ANC</b> .....	36
<b>2.2. Preparación de las muestras compuestas Al-SCBAB y de la matriz sin reforzar</b> .....	37
<b>2.3. Caracterización de las muestras compuestas Al-SCBAB y de la matriz sin reforzar</b> .....	38
<b>CAPÍTULO III. Presentación y discusión de los resultados</b> .....	40
<b>3.1. Caracterización de la ceniza de bagazo de caña de azúcar recogida directamente de la cardera del central cubano</b> .....	40

3.1.1.	Distribución del tamaño de las partículas de la SCBAB.....	40
3.1.2.	Composición química de la SCBAB.....	41
3.1.3.	Composición mineralógica de la SCBAB .....	42
3.1.4.	Aspecto morfológico de la SCBAB.....	43
3.2.	Caracterización de la arcilla del yacimiento de Miller .....	44
3.2.1.	Caracterización de la arcilla en su estado natural .....	44
3.2.2.	Caracterización de la arcilla calcinada .....	48
3.3.	Estudio comparativo de la morfología y la dureza del compuesto Al - SCBAB y su matriz sin reforzar .....	53
3.3.1.	Aspecto morfológico del compuesto Al - SCBAB y su matriz no reforzada .....	53
3.3.2.	La dureza del compuesto Al-SCBAB y su matriz no reforzada.....	53
	CONCLUSIONES.....	55
	RECOMENDACIONES.....	56
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	57



## **LISTADO DE TABLAS**

---

Tabla 1: Composición química de la SCBAB.....	41
Tabla 2: Composición química de la ANC obtenida por FXR.....	44
Tabla 3: Fases presentes en la arcilla calcinada durante 4 h a 1 000 °C. ....	48
Tabla 4: Dureza del compuesto Al-SCBAB y su matriz sin reforzar.....	54

## **LISTADO DE ILUSTRACIONES**

---

Figura 1: Distribución de tamaños de partículas de la SCBAB. ....	40
Figura 2: Patrón de difracción de rayos X de la SCBAB. ....	42
Figura 3: Microfotografías SEM de la SCBAB: (a) la morfología general; (b) y (c) aspectos de las partículas de cristobalita. ....	43
Figura 4: Patrón de difracción de rayos X de la ANC. ....	45
Figura 5: Curvas DTG de la ANC, comparándola con las curvas patrones de caolinita, Illita y montmorillonita. ....	46
Figura 6: Análisis DTG de la ANC. ....	47
Figura 7: Micrografía SEM de la ANCC mostrando el cuarzo y el análisis por microsonda correspondiente. ....	49
Figura 8: Micrografía SEM de una muestra de la ANCC y análisis por microsonda correspondiente al punto 20 (albita). ....	50
Figura 9: Microfotografía obtenida por SEM y resultados del análisis por microsonda que muestran la presencia de moscovita en la arcilla calcinada. ....	51
Figura 10: Microfotografía óptica de la muestra compuesta (izquierda) y la matriz de la muestra no reforzada (derecha). ....	53

## **LISTADO DE SIGLAS EMPLEADAS**

---

Al – SCBAB...	Composite de matriz de aluminio reforzado con la ceniza de bagazo de caña de azúcar recogida directamente de la caldera del central
AMCs.....	Composites de Matriz de Aluminio
ANC.....	Arcilla natural cubana
ANCC.....	Arcilla natural cubana calcinada
CFAMCs.....	AMCs reforzados con fibras continuas
DTA.....	Análisis Térmico Diferencial
DTG.....	Termogravimetría diferencial
MFAMCs.....	AMCs reforzados con monofilamentos
MMCs.....	Composites de Matriz Metálica
PAMCs.....	AMCs reforzados con partículas
SCBA.....	Ceniza de bagazo de caña de azúcar obtenida bajo condiciones de laboratorio
SCBAB.....	Ceniza de bagazo de caña de azúcar recogida directamente de la caldera de un central
SEM.....	Microscopía Electrónica de Barrido
SFAMCs.....	AMCs reforzados con bigotes o fibras cortas
XRD.....	Difracción de Rayos X
XRF.....	Fluorescencia de Rayos X

## **INTRODUCCIÓN**

---

### **Planteamiento y argumentación del problema**

La mayoría de los materiales que son utilizados diariamente proceden de fuentes no renovables; es decir, no son capaces de regenerarse. Estas fuentes no renovables se empobrecen paulatinamente, por lo que es necesario desarrollar nuevos materiales con propiedades comparables o mejores que los tradicionales y, además, que ocasionen menos impacto medioambiental.

Desde mediados del siglo pasado existe un marcado interés de la comunidad científica y técnica en la búsqueda, caracterización y validación de materiales compuestos (composites), los que globalmente deben poseer propiedades superiores a las de los materiales constituyentes por separado: la matriz y los materiales de refuerzo. Entre estos materiales compuestos se destacan los de matriz metálica (MMCs) y muy particularmente los composites de matriz de aluminio (AMCs), lo cual se debe, de una parte, a sus excelentes propiedades mecánicas y tribológicas (Lloyd, 1994; Itskos y col., 2011), y de otra, a que se trata de un metal ligero, de modo que con él pueden obtenerse composites apreciablemente livianos o de poco peso, pero que al mismo tiempo soportan cargas y esfuerzos relativamente altos (Surappa, 2003). Además, el aluminio es el tercer elemento en abundancia en la naturaleza (Kumar y Purohit, 2013).

Aun cuando los costos de los AMCs son relativamente más bajos que los del resto de los MMCs (Surappa, 2003), la búsqueda de opciones económicas en el desarrollo de estos materiales fue un problema de interés científico-técnico en el pasado (Kamat, Hirth y Mehrabian, 1989; Lloyd, 1994) y lo es en la actualidad (Zuhailawati, Samayamutthirian y Mohd Haizu, 2007; Włodarczyk-Fligier y col., 2008; Alaneme y Adewuyi, 2013). Entre estas opciones se destaca el empleo de cenizas de bagazo de caña de azúcar, de cáscara de arroz y de hojas de bambú entre otras cenizas de desechos agroindustriales (Alaneme y Adewuyi, 2013; Lancaster, Lung y Sujana, 2013; Saravanan y Senthilkumar, 2014; Fatile, Akinruli y Amori, 2014; Anas y Zafaruddin Khan, 2015; Subrahmanyam, Narsaraju y Rao, 2015) y de materiales naturales, tal como arena de sílice y diferentes tipos de arcillas (Zuhailawati, Samayamutthirian y Mohd Haizu, 2007; Jyothi y Bharath Kumar, 2015), en

calidad de materiales de refuerzo en los AMC's. El empleo de estas cenizas como materiales de refuerzo ha estado avalado por estudios que muestran que en ellas existe un elevado contenido de sílice ( $\text{SiO}_2$ ) y/o alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), así como la presencia de fases del tipo cerámica (Asavavisithchai y Tantisiriphaiboon, 2009; Alaneme y Adewuyi, 2013), necesarias para materiales de refuerzo en compuestos de aluminio.

La ceniza del bagazo de la caña de azúcar (SCBA) es un residuo de la agroindustria azucarera cubana que causa problemas de disposición. Además, su dispersión en el ambiente contamina el aire y afecta la salud humana. De este modo, el empleo de la SCBA y de otras cenizas de desechos agroindustriales, como material de refuerzo en AMC's ha devenido en una alternativa eficaz, pues con ellas se obtienen composites con buenas propiedades a un menor costo y a la vez se valoriza a un desecho, contribuyendo directamente con la reducción de la carga medioambiental (Lancaster, Lung y Sujun, 2013).

Algo similar ocurre con la arena de sílice y las arcillas, donde también están presente fases del tipo cerámica (Zuhailawati, Samayamutthirian y Mohd Haizu, 2007). En Cuba abundan las arcillas naturales y su posible empleo como refuerzo en materiales compuestos, ampliaría y diversificaría sus usos.

La utilización de materiales de desechos y productos naturales como refuerzos para composites de acuerdo con Alaneme y Adewuyi (2013) contribuye a la solución de tres problemas, ya que proporciona la reducción de la contaminación medioambiental, rebaja el costo económico de la propia producción del compuesto y posible mejora tecnológica del mismo. De este modo, cooperar en la transformación de residuos y subproductos abundantes y de muy bajo costo en materiales de refuerzo para composites, constituye un reto técnicamente factible y económicamente ventajoso. En este sentido, el empleo de ceniza de bagazo de caña recogida directamente de las calderas de los centrales azucareros reporta un gran beneficio ecológico, ya que se consume un residuo agrícola y tecnológico, destinado a ser depositado en vertederos, evitando o al menos mitigando en gran medida la contaminación ambiental que provoca su disposición final. Además, su empleo como material de refuerzo pudiera sustituir el uso de otros materiales de mayor costo económico.

Al mismo tiempo, en Cuba como parte del redimensionamiento y reorganización productiva de la industria mecánica se ha indicado (PCC, 2017) priorizar la reactivación del mantenimiento industrial, incluyendo la producción y recuperación de partes, piezas de repuesto y herramientas.

Para el logro de estos objetivos y planes, ya en marcha, los MMCs y más particularmente los AMCs, pueden constituir elementos importantes fundamentalmente en la fabricación de piezas de repuestos para equipos y maquinarias, lo que les permita ser aprovechados durante más tiempo y alargar su vida útil. Sin embargo, a pesar de los beneficios que pudiera representar para el país contar con materiales compuestos de factura nacional para diferentes usos, de acuerdo con la revisión realizada se pudo constatar que sólo se han realizado esfuerzos aislados en el desarrollo y caracterización de materiales compuestos, tales son los casos de la fabricación, en el Centro de Investigación Metalúrgica (CIME) en colaboración con el Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas (CENIM) de Madrid (España) de un compuesto de matriz de cobre reforzada con partículas de wolframio mediante pulvimetalurgia para los calzos que son utilizados en los contactos eléctricos en los paneles de control de las grúas pórtico que operan en el puerto de la Ciudad de La Habana (Krivij y col., 2003); de un material compuesto de partículas de bagazo de caña de azúcar y polietileno por investigadores del Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA) y del Instituto de Ciencia y Tecnología de los Materiales (ICTM) de la Universidad de La Habana (Bermello y col., 2008); y el estudio de composites dentales que se realiza en el Instituto de Biomateriales de la Universidad de La Habana en colaboración con instituciones españolas (Veranes-Pantoja y col., 2005). También son ampliamente utilizados diferentes tipos de composites en el sector de la construcción, algunos de los cuales son de factura nacional.

De este modo, la presente investigación se enmarca en la política propuesta por el país para la producción de piezas de repuesto y componentes para equipos y herramientas y al mismo tiempo se suma a los esfuerzos en la búsqueda y caracterización de materiales que puedan sustituir a los tradicionales y aliviar la carga medioambiental. Particularmente el desarrollo de un AMC pudiera ser una ayuda para la insipiente industria automotriz cubana, para la sustitución de piezas y componentes de importación o como piezas de repuesto.

**Problema práctico:** Necesidad de desarrollar y caracterizar materiales compuestos de matriz metálica, en particular de matriz de aluminio, para su posible introducción en la industria mecánica nacional.

**Problema científico:** Se desconoce las potencialidades de la ceniza de bagazo de caña de azúcar colectada directamente de la caldera del central “Luis Arcos Bergnes” y de la arcilla natural del yacimiento Miller como posibles materiales de refuerzo para composites de matriz de aluminio, así como las propiedades generales de los compuestos fabricados con estos materiales.

**Objeto de investigación:** Material compuesto de matriz de aluminio y posibles materiales de refuerzo: ceniza de bagazo de caña de azúcar colectada directamente de la caldera del central “Luis Arcos Bergnes” y arcilla natural procedente del yacimiento de Miller.

**Campo de acción:** Propiedades morfológicas y micro-estructurales de los materiales de refuerzo y propiedades morfológicas y mecánicas del material compuesto de matriz de aluminio reforzado con uno de los materiales de refuerzo caracterizados.

**Población:** Está constituida por los composite de matriz de aluminio que emplean materiales de refuerzo naturales o de desechos.

**Muestra:** Está integrada por dos materiales de refuerzo: Ceniza de bagazo de caña de azúcar colectada directamente de la caldera del central “Luis Arcos Bergnes” (SCBAB) y arcilla natural cubana (ANC) del yacimiento Miller, y un composite de matriz de aluminio reforzado con uno de los materiales anteriores.

**Hipótesis:** Si se fabrica un material compuesto reforzado con ceniza de bagazo de caña de azúcar tomada directamente de la caldera del central o con una arcilla natural, bien sea en su estado natural o calcinada, se obtienen propiedades de dureza deseable en el composite, superior significativamente a las que posee la matriz sin refuerzo.

**Objetivo general:** Desarrollar y caracterizar un composite de matriz de aluminio que emplee como refuerzos materiales de desechos o naturales de procedencia nacional.

### **Objetivos específicos:**

1. Caracterizar la ceniza de bagazo de caña de azúcar colectada directamente de la caldera del central para determinar su potencial uso como material de refuerzo en AMCs.
2. Caracterizar la arcilla del yacimiento Miller en su estado natural y calcinado para determinar su potencial uso como material de refuerzo en AMCs.
3. Fabricar un composite de matriz de aluminio que emplee como material de refuerzo la ceniza de bagazo de caña de azúcar colectada directamente de la caldera del central.
4. Caracterizar morfológicamente el composite de matriz de aluminio reforzado con ceniza de bagazo de caña de azúcar colectada directamente de la caldera del central.
5. Estudiar comparativamente las propiedades de dureza del AMC reforzado con ceniza de bagazo de caña de azúcar colectada directamente de la caldera del central en relación con la matriz sin reforzar.

### **Tareas:**

1. Investigación documental sobre los materiales compuestos, particularizando en los materiales compuestos de matriz metálica y dentro de éstos en los de matriz de aluminio, y de los materiales de refuerzo, con énfasis en los materiales de desecho y naturales.
2. Caracterización de la ceniza de bagazo de caña colectada directamente de la caldera del central “Luis Arcos Bergnes”.
3. Caracterización de la arcilla del yacimiento Miller, tanto natural y como calcinada a una temperatura de 1 000 °C durante 4 horas.
4. A partir del análisis de los resultados obtenidos de las tareas 2 y 3, determinación de las potencialidades de ambos materiales, de la SCBAB del central “Luis Arcos Bergnes” y de la arcilla del yacimiento Miller calcinada a una temperatura de 1 000 °C durante 4 horas, para su uso como material de refuerzo de un compuesto de matriz de aluminio.
5. Fabricación mediante técnicas de pulvimetalurgia de un material compuesto de matriz de aluminio que emplea como material de refuerzo la ceniza de bagazo de caña de azúcar colectada directamente de la caldera del central “Luis Arcos Bergnes” con un 4 % en peso.



6. Caracterización de la morfología del composite de matriz de aluminio reforzado con 4 % en peso de ceniza de bagazo de caña de azúcar colectada directamente de la caldera del central “Luis Arcos Bergnes”.
7. Estudio comparativo de las propiedades de dureza del composite de matriz de aluminio reforzado con 4 % en peso de ceniza de bagazo de caña de azúcar colectada directamente de la caldera del central “Luis Arcos Bergnes” y de la matriz sin reforzar.

**Novedad Científica:** Caracterización de las propiedades morfológicas y de dureza del composite fabricado empleando como material de refuerzo ceniza de bagazo de caña de azúcar colectada directamente de la caldera del central “Luis Arcos Bergnes” y de las propiedades morfológicas y micro-estructurales de la ceniza y de la arcilla natural del yacimiento Miller, tanto en su estado natural, como calcinada a una temperatura de 1 000 °C durante 4 horas, lo que permitió determinar que la ceniza y la arcilla calcinada constituyen excelentes candidatos para ser empleados como materiales de refuerzo en composites de matriz de aluminio.

**Aporte Metodológico:** Metodología para la fabricación y caracterización de materiales compuestos de matriz de aluminio mediante la técnica de pulvimetalurgia, así como para la caracterización de los posibles materiales de refuerzo.

**Valor práctico:** Obtención de un material compuesto de matriz de aluminio que emplea ceniza de bagazo de caña de azúcar colectada directamente de la caldera del central “Luis Arcos Bergnes” con buenas propiedades de dureza.

**Métodos teóricos:** Entre estos métodos destacan los procesos de análisis y síntesis, inducción-deducción y generalización entre otros.

**Métodos Empíricos:** Se emplearon métodos generales de caracterización morfológica y micro-estructural de materiales, a saber, análisis granulométrico, estudio de composición química por fluorescencia de rayos X, de composición mineralógica por difracción de rayos X, microscopia óptica y electrónica de barrido, análisis termo-gravimétricos y ensayo de dureza entre otros.

**Procedimiento y técnicas:** Se emplean técnicas generales de caracterización morfológica y micro-estructural de materiales. En una primera etapa se caracterizan los posibles materiales de refuerzo, a saber: ceniza de bagazo de caña de azúcar colectada directamente de la caldera del central “Luis Arcos Bergnes” y la arcilla procedente del yacimiento Miller, en su estado natural y calcinada a una temperatura de 1 000 °C durante 4 h, para en un segundo momento, a partir del análisis de los resultados obtenidos para uno y otro material, determinar si estos materiales poseen o no potencialidades par ser usados como materiales de refuerzo en composites de matriz de aluminio. Determinadas las potencialidades de estos materiales para su empleo como refuerzos en composites de matriz de aluminio, se procede a la validación de los resultados antes obtenidos. Por un problema de tiempo y recursos, solo se fabrica y caracteriza un prototipo de composite con uno de los materiales y con un porcentaje fijo en la relación peso del refuerzo/peso del compuesto. Se fabrica mediante técnicas de pulvimetalurgia un AMC con SCBAB con una relación en peso del refuerzo/peso del compuesto del 4 %. Finalmente se estudia la morfología del compuesto Al-SCBAB y se evalúan mediante ensayos de dureza Vickers las propiedades de dureza del compuesto y de la matriz sin reforzar.

**Estructura de la tesis:**

Al tratarse de una tesis en general sobre caracterización de materiales, consta de tres capítulos, conclusiones, recomendaciones que proponen la continuidad al estudio iniciado y referencias bibliográficas, todo agrupado en un total de 64 páginas.

- Capítulo I. Materiales compuestos. Producción y caracterización
- Capítulo II. Materiales y Métodos
- Capítulo III. Presentación y discusión de los resultados
- Conclusiones
- Recomendaciones
- Referencias bibliográficas

## **CAPÍTULO I. Materiales compuestos**

---

En este capítulo se presentará un resumen de los conceptos generales referidos a los materiales compuestos, con énfasis en los composites de matriz de metálica y dentro de éstos a los de matriz de aluminio y a las opciones económicas de fabricación de los mismos. Se ofrecerán respuesta a preguntas tales como: qué es un composite, cómo está constituido, qué lo distingue de los materiales que lo constituyen, cómo se clasifican y cómo se fabrican entre otros aspectos que se discuten.

### **1.1. Materiales compuestos. Generalidades**

Un composite se define como un material compuesto por dos o más constituyentes de diferente naturaleza: la matriz y el o los materiales de refuerzo. Se refiere como: “constituyentes distintos”, básicamente, como materiales de composiciones químicas y estructuras físicas diferentes.

La matriz, de estructura continua, es el componente mayoritario y el refuerzo es el constituyente discreto que se distribuye a través de toda la matriz. La matriz y el refuerzo, de manera independiente, poseen diferentes propiedades, las que los caracterizan a uno y otro. Al unirse estos componentes y quedar constituido, el composite, se distingue por sus propiedades volumétricas, que en general, suelen ser significativamente superiores a las de cualquiera de sus constituyentes por separado (Sharanabasappa y Motgi, 2013; Surappa, 2003). Sin embargo, como es descrito por Sharanabasappa y Motgi (2013), muchos de los materiales comunes también tienen una pequeña cantidad de uno o más componentes dispersos en su estructura y no se consideran como composites, debido a que sus propiedades volumétricas son similares a las de sus constituyentes básicos por separado.

Las combinaciones de las propiedades deseadas en los composites son funciones de las propiedades de sus constituyentes, de las cantidades relativas de éstos, así como de la concentración, el tamaño, la forma, la distribución y la orientación de los refuerzos, los cuales pueden ser partículas, fibras, láminas o paneles (Flinn y Trojan, 1990).

Es necesario aclarar que, en las definiciones y análisis anteriores y en los que se realicen en el futuro, el término “fase”, que aparece en una parte significativa de la literatura científica referida al tema de los composites, se ha sustituido por "componente" o "constituyente"

debido a las recientes opiniones expresadas por Fakirov (2015), que ha indicado la práctica incorrecta en la comunidad de los materiales compuestos o composites de utilizar el término “fase” en lugar de “componente” cuando se trata de los composites. El término “fase” está muy bien definido en la termodinámica y se utiliza tanto en la física, la química, como en la ciencia de los materiales y otras ramas de la ciencia para la descripción de las diferentes fases en sistemas de uno o varios componentes, pero al tratar los materiales compuestos se ha hecho común que los investigadores se refieran a los componente o constituyente con el término “fase”, el cual debe reservarse única y exclusivamente para referirse al conjunto de partes homogéneas y de iguales propiedades de un sistema.

Los composites se clasifican generalmente en base a la naturaleza física o química de la matriz (Surappa, 2003) por ejemplo, composite de matriz polimérica, composite de matriz metálica y composite de matriz cerámica. Dado que en la presente investigación se decida a los composites de matriz metálica, particularmente a los de matriz de aluminio y dentro de estos a los que emplean como refuerzo materiales naturales o de desechos, a continuación, se consideraran los composites de matriz metálica y dentro de éstos a los de matriz de aluminio.

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

De acuerdo con Alonso (1994) son muy diversos los sistemas metálicos que han sido considerados para su uso como matriz en los composites de matriz metálica (MMCs). Entre estos sistemas empleados como matriz se pueden encontrar superaleaciones de base níquel y de base cobalto, e intermetálicos como los aluminuros de titanio y de níquel. Sin embargo, los más utilizados son los metales ligeros no ferrosos como el aluminio, el magnesio y el titanio, cuyas propiedades específicas pueden ser mejoradas para reemplazar metales más pesados en usos estructurales.

En la revisión realizada se han encontrado varios estudios (Surappa, 2003; Miracle, 2005; Włodarczyk-Fligier y col., 2008; Moutsautsou y col., 2009; Itskos y col., 2011; Dasgupta, 2012) que describen el surgimiento y reportan la actualidad de los MMCs. Estos composites constituyen no solo un tema de interés científico, sino que, dado por sus excelentes propiedades funcionales, que incluyen alta eficiencia estructural, excelente

resistencia al desgaste y atractivas características térmicas y eléctricas entre otras, se han transformado en un tema de gran importancia tecnológica y comercial. Los MMCs han encontrado un amplio campo de aplicaciones en sectores industriales tales como el transporte automovilístico y ferroviario, la industria aeronáutica y aeroespacial, el sector energético, la industria militar y de piezas y componentes para la industria en general.

Atendiendo al tipo de refuerzo utilizado los MMCs se dividen fundamentalmente en tres clases (Alonso, 1994), a saber: de refuerzo continuo o de refuerzo con fibras largas, de refuerzo con fibras cortas, y de refuerzos con partículas. Aunque refiriéndose a los AMCs Surappa (2003) distingue un cuarto tipo, los reforzados con monofilamentos. No se puede afirmar que un tipo sea mejor que el otro, pues cada uno de ellos presenta ventajas y desventajas, y la elección de un tipo u otro depende de para qué fin se fabrica, de cuáles son las propiedades que se desean obtener y de los recursos, medios y condiciones con que se cuenta para su desarrollo y caracterización. Sin embargo, los reforzados con partículas generalmente presentan un menor costo y el material que se obtiene es isotrópico, lo que lo hace adecuado para aplicaciones tribológicas dado por su buena resistencia al desgaste.

Según Miracle (2005) las propiedades deseadas para estos composites se logran con la selección apropiada de los constituyentes y de los porcentos de éstos. Combinaciones adecuadas de estos dos elementos permiten obtener MMCs con un equilibrio único de propiedades físicas y mecánicas, buena resistencia a ambientes agresivos, buena resistencia al impacto y a la erosión y buenas propiedades de fatiga y fractura. Además, de este conjunto de buenas propiedades, los MMCs aportan mayor resistencia y rigidez, mayor resistencia al desgaste y menor coeficiente de expansión térmica que la aleación de la matriz. Sin embargo, como se explica en estudios realizados por diferentes autores (Moutsautsou, 2009; Itskos y col., 2011; Haque, Kumar y Hussain, 2014) el uso de los MMCs se ha visto limitado debido a su relativamente alto costo de producción.

### **1.3. Materiales compuestos de matriz de aluminio**

En la revisión bibliográfica realizada sobre este tema se ha podido constatar que en los últimos años se ha prestado una atención particular a la síntesis y caracterización de los materiales compuestos de matriz de aluminio (AMCs), y que una parte importante de las

investigaciones se han centrado en los AMC's reforzados con partículas, ya que como se dijo antes le confiere prácticamente propiedades isotrópicas al material, cuestión esta que no se puede lograr en los AMC's reforzados con fibras.

En este contexto, Alaneme y Adewuyi (2013) y Haque, Kumar, y Hussain (2014) explican que el composite de matriz de aluminio es el más versátil de todos los MMC's debido a varios factores, entre los que destacan la facilidad de procesamiento, costo relativamente bajo de las matrices de Al en comparación con otras matrices metálicas como las de Cu, Ti y Mg, buena combinación de propiedades físicas y mecánicas, buen desempeño a alta temperatura con adecuada expansión térmica, excelentes propiedades tribológicas, y una resistencia razonable a la corrosión. Esto ya había sido señalado por Miracle (2005), quien explicaba que era por estas razones que los AMC's habían encontrado una amplia gama de aplicaciones en diversas áreas tecnológicas y agregaba que se esperaba que la influencia de los AMC's como material de ingeniería continuara aumentando en los próximos años. Por supuesto, en la base de esto también se encuentra el hecho descrito por Kumar y Purohit (2013) de que el aluminio es el metal más abundante y el tercer elemento químico que más abunda en la corteza terrestre. Pudiera ser paradójico entonces, que a pesar de la abundancia del aluminio y de que este metal y sus aleaciones poseen un peso ligero y una combinación muy deseable de propiedades, las que, junto a las facilidades para procesarlo, permiten que con él se puedan fabricar piezas de una gran variedad de formas y dimensiones, sean precisamente los AMC's a los que más atención se les haya prestado en los últimos tiempos. Esto se debe según Surappa (2003) a que ningún material monolítico de aluminio o de aleaciones de este metal puede hacerle competencia a los AMC's. Y en este sentido destaca que las principales ventajas de los AMC's en comparación con los materiales no reforzados son las siguientes: mayor resistencia, mayor rigidez, disminución de la densidad, mejora las propiedades a altas temperaturas, en particular el coeficiente de expansión térmica puede ser debidamente controlado, mejora el rendimiento eléctrico, mejora la resistencia a la abrasión y al desgaste, y mejora la capacidad de amortiguación.

Desde hace ya algún tiempo varios autores (Surappa, 2003; Maruyama, 1998) vienen apuntando que el uso de AMC's en el sector del transporte será inevitable y deseable en los próximos años debido al aumento de las regulaciones ambientales que son muy estrictas y al énfasis en la necesidad de ahorro de combustible. La utilización de AMC's proporciona

beneficios significativos, incluyendo beneficios en el rendimiento, con la mayor duración de los componentes y una productividad mejorada; beneficios económicos con el ahorro de energía y el menor costo de mantenimiento; así como beneficios ambientales, ya que son menores los niveles de ruido y de emisiones contaminantes al aire (Surappa, 2003; Rana, Purohid y Das, 2012,). Además, los AMCs están destinados a sustituir materiales monolíticos, incluyendo aleaciones de aluminio, aleaciones de hierro, aleaciones de titanio y compuestos basados en polímeros en varias aplicaciones. Sin embargo, la falta de conocimiento e información sobre las posibilidades de utilización de estos materiales, por parte de los usuarios potenciales, han obstaculizado el uso más amplio de los AMCs, por lo cual, reconociendo estas dificultades, la comunidad de AMCs en Estados Unidos, Europa, Japón y otros países, están buscando enfoques de consorcio y redes para implementar el uso cotidiano de las aplicaciones de AMCs en las diversas esferas de la sociedad contemporánea (Surappa, 2003).

El refuerzo en los AMCs podría estar en forma de fibras continuas, discontinuas, o partículas; y en fracciones de volumen o de peso que varían según se explicó antes en correspondencia con la combinación de propiedades que se desean obtener. Los AMCs, dependiendo del tipo de refuerzo, se pueden clasificar como se indicó antes para los materiales compuestos de matriz metálica en cuatro tipos (Surappa, 2003):

- a) AMCs reforzados con partículas (PAMCs).
- b) AMCs reforzados con fibras cortas (SFAMCs).
- c) AMCs reforzados con fibras continuas (CFAMCs).
- d) AMCs reforzados con monofilamentos (MFAMCs).

A continuación, se explican brevemente los aspectos esenciales de cada uno de estos tipos de AMCs, de acuerdo con la descripción que de ellos ha realizado Surappa (2003).

#### **a) AMCs reforzados con partículas (PAMCs)**

Estos materiales compuestos generalmente contienen refuerzos cerámicos en forma de partículas, entre los que destacan los óxidos, carburos o boruros ( $Al_2O_3$  o  $SiC$  o  $TiB_2$ ), los cuales pueden estar presentes en una fracción volumétrica de hasta el 30 % cuando se usan para aplicaciones de resistencia estructural y de resistencia al desgaste. Sin embargo, en las

aplicaciones electrónicas, la fracción volumétrica del refuerzo podría ser de alrededor del 70 %. Los PAMCs son menos costosos en comparación con los CFAMCs. Las propiedades mecánicas de los PAMCs son inferiores comparadas con los AMCs reforzados con fibras cortas o con fibras continuas, pero muy superiores a las aleaciones de aluminio no reforzadas. Las propiedades mecánicas y la homogeneidad de compuesto dependen del tamaño de las partículas de refuerzo, su porcentaje en peso y del método de fabricación del composite (Haque, Kumar Bharti y Hussain Ansari, 2014; Lloyd, 1994). Estos compuestos son de naturaleza isotrópica y pueden someterse a una variedad de operaciones de conformado que incluyen extrusión, laminación y forja.

En los AMCs reforzadas con partículas y fibras cortas, la matriz es el constituyente portador principal. El papel del refuerzo es reforzar y rigidizar el material compuesto evitando la deformación de la matriz por retención mecánica.

#### **b) AMCs reforzados con fibras cortas y bigotes (SFAMCs)**

Estos materiales compuestos contienen refuerzos en forma de fibras y bigotes de pequeña longitud. Los compuestos de matriz de aluminio reforzados con fibra corta de alúmina fueron uno de los primeros y más populares AMCs desarrollados y utilizados en pistones.

Los compuestos reforzados con fibras cortas y bigotes se producen ya sea por mezclado y compactación en estado sólido o por vía de infiltración en estado líquido. Las propiedades mecánicas de los compuestos reforzados con bigotes son superiores en comparación con los compuestos similares reforzados con partículas o con fibras cortas. Sin embargo, en los últimos años el uso de bigotes como refuerzos en AMCs se está desvaneciendo debido a los peligros percibidos para la salud. Los AMCs reforzados con fibras cortas presentan características entre la de fibra continua y los AMCs reforzados con partículas.

#### **c) AMC reforzados con fibras continuas (CFAMCs)**

Los refuerzos en forma de fibras continuas deben tener un diámetro menor de 20  $\mu\text{m}$  y los más empleados suelen ser de alúmina, SiC o carbono. Las fibras pueden ser orientadas paralelamente entre sí o en forma de pretejidos, los cuales son trenzados antes de la producción del material compuesto. Los CFAMCs se producen por infiltración con presión.



En estos compuestos, el refuerzo es de los dos componentes el que principalmente soporta la carga, y el papel de la matriz de aluminio es unir el refuerzo y transferir y distribuir la carga. Los CFAMCs con fibras orientadas paralelamente entre sí que muestran una marcada direccionalidad, esto es, en la dirección perpendicular a la orientación de las fibras se encuentra que la resistencia es significativamente inferior que la resistencia en la dirección en que éstas están orientadas.

Tales compuestos, como señalan Kamat, Hirth y Mehrabian (1989) en fecha tan temprana, a pesar de sus propiedades únicas, no son rentables para la mayoría de las aplicaciones, debido a los altos costos de los materiales de refuerzos y de los procesos de fabricación y secundarios que se requieren.

#### **d) AMCs reforzados con monofilamentos (MFAMCs)**

Los monofilamentos son fibras de gran diámetro (100 a 150  $\mu\text{m}$ ), usualmente producidas por deposición química en fase de vapor de SiC o de boro en un núcleo de fibra de carbono o alambre de Wolframio. La flexibilidad de los monofilamentos es baja en comparación con los multifilamentos. Los materiales compuestos de matriz de aluminio reforzados con monofilamentos se producen mediante técnicas de unión por difusión, y se limitan a matrices de aleación de aluminio superplastificado. En estos compuestos también es característica la dependencia de la resistencia con respecto a la orientación, en este caso de los monofilamentos (Surappa, 2003).

Además de los cuatro tipos de AMCs descritos anteriormente, se han desarrollado otras variantes de composites de matriz de aluminio conocidos como AMCs híbridos para fines muy específicos y con una utilidad reducida, estos contienen esencialmente más de un tipo de refuerzo. Por ejemplo, mezcla de partículas y bigotes, o mezcla de fibras y partículas o mezcla de refuerzos duros y blandos. Un ejemplo típico de AMC híbrido es el reportado por Surappa (2003) compuesto de una matriz de aluminio que contiene una mezcla de fibra de carbono y partículas de alúmina, el cual es usado en aplicaciones de revestimiento. Otro, es el caso de un AMC híbrido que tiene como refuerzo tanto el SiC duro como las partículas de grafito blando, las cuales mejoran la maleabilidad de la matriz, mientras que otras propiedades valiosas como la dureza pueden coexistir. También se desarrollan

compuestos de aluminio híbridos en los que, como refuerzo, además de partículas cerámicas de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiC}$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , se incluyen nano-láminas de grafeno, ya que además de excelentes propiedades eléctricas, térmicas y ópticas, el grafeno posee excelentes propiedades mecánicas (Surappa, 2003; Zoltán Károly, 2014). Otra variante de composites híbridos son aquellos en que la matriz es la que resulta ser una mezcla, como el caso reportado por Fatile, Akinruli y Amori (2014) en que la matriz es una aleación de Al-Mg-Si y el refuerzo es ceniza de la tusa del maíz.

En los últimos años del pasado siglo las investigaciones relativas al desarrollo y caracterización de AMCs se concentraron en los PAMCs, debido fundamentalmente a que poseen propiedades isotrópicas, lo cual permite la realización de operaciones posteriores de conformado y, además, son de fácil fabricación y un costo relativamente inferior en comparación con los AMCs reforzados con fibras y filamentos (Maruyama y Hunt, 1999). Esto en buena medida continúa siendo así en el presente, incluso se ha ampliado con la aparición de los nano composites de matriz de aluminio que emplean nano partículas como material de refuerzo (Rana, Purohit, y Das, 2012; Kayode Aliyu y col., 2015; Veličković y col., 2016).

Como se ha analizado, cada uno de estos tipos de composites presenta sus ventajas y desventajas y la decisión de cual tipo emplear depende de varios factores, pero fundamentalmente de las propiedades que se desean posea el composite. Al mismo tiempo, los SFAMCs y CFAMCs presentan problemas con los costos sobre todo de los materiales de refuerzo, además, los que emplean bigotes pueden ser peligrosos para la salud, mientras los PAMCs además de las ventajas ya señaladas, no presentan estos problemas, por lo cual en las condiciones de Cuba puede ser una alternativa la fabricación y caracterización de composites de matriz de aluminio del tipo PAMCs.

#### **1.4. Materiales de refuerzo**

Los materiales de refuerzo empleados en los AMCs se pueden agrupar en dos tipos, los del tipo cerámico y los metálicos e inter metálicos. De estos dos tipos de refuerzos los más estudiados y empleados son los cerámicos y dentro de estos, las partículas cerámicas debido a que poseen un grupo de propiedades, comunes a los materiales cerámicos entre las que

destacan, baja densidad y altos niveles de dureza, resistencia, módulo de elasticidad y estabilidad térmica. Sin embargo, también se presentan algunas limitaciones comunes a los materiales cerámicos tales como problemas de reactividad con el aluminio, baja o nula humectabilidad o mojabilidad de estas partículas por el aluminio líquido, baja ductilidad y baja compatibilidad con la matriz de aluminio (Alonso, 1994; Rana, Purohit y Das, 2012). De los diferentes materiales de refuerzos cerámicos, el óxido de aluminio o alúmina ( $Al_2O_3$ ) y el carburo de silicio (SiC) son los que más se usan (Haque, Kumar Bharti y Hussain Ansari, 2014), debido precisamente a su humectabilidad relativamente alta en comparación con otros materiales cerámicos y su compatibilidad con el aluminio (Rana, Purohit y Das, 2012).

Al mismo tiempo, el efecto del refuerzo en la matriz de aluminio depende no solo del tipo de refuerzo, sino que también de la forma del refuerzo. Eso fue discutido en el epígrafe anterior, cuando se describió la clasificación de los AMC's según el tipo de refuerzo. Atendiendo a esto, tal vez hubiere sido más riguroso decir clasificación de los AMC's atendiendo a la forma del refuerzo. Como se describió antes, en un compuesto de matriz de aluminio, los refuerzos más comúnmente usados presentan forma de fibra larga, de fibra corta / bigote, o partícula, y también puede emplearse como refuerzo una mezcla de estas configuraciones. Asimismo, se indicó que las aleaciones de aluminio reforzadas con fibras cortas / bigotes suelen mostrar mejores propiedades mecánicas que la aleación de aluminio reforzada con partículas, pero, entre sus desventajas, además del costo, está que poseen un cierto grado de anisotropía. De acuerdo con Rana, Purohit y Das (2012), para superar las barreras de los costos relativamente altos y las propiedades de anisotropía asociadas con el refuerzo en forma de fibras, se están desarrollando nuevos materiales fibrosos y refuerzos híbridos que incorporan partículas en las fibras.

De otra parte, se encuentran los refuerzos de tipo metálico o inter metálico, los cuales generalmente presentan una mojabilidad mucho mejor con el aluminio o las aleaciones de aluminio líquido que los polvos cerámicos. Las ventajas de los refuerzos del tipo metálico radican en su alta ductilidad, alta humectabilidad, alta compatibilidad con la matriz de aluminio en comparación con la cerámica, así como su gran resistencia y módulo de elasticidad en comparación con la matriz de aluminio.

A pesar de que la gama de materiales de refuerzos, de uno y otro tipo, estudiada es muy amplia (Lloyd, 1994; Zuhailawati, Samayamutthirian y Mohd Haizu, 2007; Włodarczyk-Fligier y col., 2008; Alaneme y Adewuyi, 2013), la introducción de nuevos refuerzos cerámicos en AMCs constituye un activo campo de investigación para conseguir mejorar las propiedades finales de los AMCs y evitar algunos de los problemas, de reactividad o falta de ella y de compatibilidad que aparecen entre los refuerzos del tipo cerámico y la matriz de aluminio. Entre estos esfuerzos destacan el empleo de diferentes materiales en los que están presentes en porcentos relativamente altos partículas y fases del tipo cerámicas (Anilkumar, Hebbar y Ravishankar, 2011; Moutsautsou y col., 2009) y muy particularmente los materiales de refuerzo a partir de desecho agrícolas e industriales (Alaneme y Adewuyi, 2013; Lancaster, Lung y Sujan, 2013; Saravanan y Senthilkumar, 2014; Fatile, Akinruli y Amori, 2014; Anas y Zafaruddin Khan, 2015; Subrahmanyam, Narsaraju y Rao, 2015) y de materiales naturales (Zuhailawati, Samayamutthirian y Mohd Haizu, 2007; Jyothi y Bharath Kumar, 2015).

En la revisión realizada, se constató que existe un creciente interés en la exploración de opciones de bajo costo para el desarrollo de AMCs con la particularidad de que se obtengan altos niveles de rendimiento en las aplicaciones de servicio, similares o superiores a las obtenidas con los refuerzos tradicionales y al mismo tiempo que sean compatibles con las rigurosas regulaciones medioambientales existentes hoy día. (Surappa, 2003; Christy, Murugan y Kumar, 2010; Alaneme y Adewuyi, 2013; Lancaster, Lung y Sujan, 2013; Zuhailawati y col., 2016). A continuación, por su importancia para el presente trabajo, se describen brevemente algunos de estos materiales.

#### **1.4.1. Ceniza volante**

La ceniza volante es uno de los residuos generados durante la combustión del carbón mineral en las plantas de producción de energía. Esta ceniza es ampliamente usada como material puzolánico en la industria cementera y de la construcción. También se usa con muy buenos resultados como material de refuerzo en AMCs, debido a que es un residuo que posee alto contenido de componentes del tipo cerámico y es liviano y barato (Anilkumar, Hebbar, y Ravishankar, 2011).

En dependencia de la mina de procedencia del carbón y del procedimiento de quema empleado, la composición de la ceniza volante puede ser muy variada. Sin embargo, todas las cenizas volantes contienen cantidades sustanciales de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , y en menores cantidades óxidos de Mg, Ca, Na, K. Generalmente presentan forma esférica, con tamaños de grano variable y son de los refuerzos más livianos que pueden encontrarse para la fabricación de materiales compuestos (Tripathy, 2009). En el caso de Cuba no se cuenta con este residuo y su importación sería un factor a considerar seriamente, pues elevaría el costo de producción de los composites y de lo que se trata es de buscar alternativas económicamente viables.

#### **1.4.2. Escoria siderúrgica**

La escoria siderúrgica se genera durante la fabricación de acero cuando se funde la chatarra. La composición química de la escoria depende de la composición de los minerales de hierro, de las cenizas del coque utilizado como combustible (en el caso de los hornos de cubilote), de los óxidos de los fundentes empleados, etc. Sin embargo, en todas las escorias siderúrgicas los principales componentes son: CaO,  $\text{SiO}_2$ , MgO,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , S, FeO, MnO,  $\text{K}_2\text{O}$  (Murthy y col., 2014).

La escoria siderúrgica es un residuo sólido peligroso, ya que contiene pequeñas cantidades de óxidos de Pb, As y Cr los cuales son dañinos para la salud. Internacionalmente se generan grandes cantidades de escoria, las cuales generalmente se descartan de manera inadecuada. La utilización de estas escorias como materiales de refuerzo en compuestos de matrices metálicas, cerámicas y poliméricas, que está teniendo lugar desde hace ya algún tiempo con buenos resultados (Sridhar Raja, y col., 2015), a la vez que contribuye a la solución un problema tecnológico, la búsqueda de materiales de refuerzo económicos y que proporcionen adecuadas propiedades al composite, ayuda también a mitigar el impacto medio ambiental desfavorable que ocasiona este residuo.

El inconveniente mayor de las partículas de escoria de acero para su empleo como material de refuerzo en compuestos con matriz de aluminio o aleaciones de aluminio es que muestra una baja humectabilidad y durante la fabricación de composites, cuando el proceso primario de fabricación se realiza en estado líquido, es necesario añadir determinadas

sustancias para mejorar la humectabilidad de las partículas de escoria en el aluminio líquido. Sin embargo, se ha demostrado que aún en estos casos se pueden obtener aumentos considerables en la dureza y disminución de la densidad del compuesto al aumentar el contenido de la escoria siderúrgica (Sridhar Raja, y col., 2015).

En el caso de Cuba el empleo de este residuo como material de refuerzo en AMCs pudiera ser viable.

#### **1.4.3. Ceniza de bagazo de caña de azúcar**

El bagazo de caña de azúcar es un subproducto procedente de la agroindustria azucarera. Se trata de un residuo fibroso y puede encontrarse en grandes cantidades, tanto en Cuba como en otros países que producen azúcar a partir de la caña. El bagazo es ampliamente utilizado en la alimentación animal, producción de papel, tableros o madera prensada y en la producción de energía.

El bagazo de caña de azúcar está compuesto por celulosa, hemicelulosa, lignina, ceniza y cera. La composición del bagazo lo convierte en un ingrediente ideal para ser aplicado y utilizado como fibra de refuerzo en materiales compuestos con el fin de crear nuevos materiales que posean propiedades físicas y químicas distintas (Lancaster, Lung y Sujan, 2013).

Cuando el bagazo es empleado en la generación de energía, es incinerado en las calderas de los centrales o de las plantas generadoras de energía que lo utilizan. La ceniza resultante constituye una amenaza al medio ambiente ya que se disponen en vertederos sin ningún otro uso. Recientemente se ha reportado (Aigbodion y col., 2010) el empleo de la ceniza de bagazo de caña de azúcar como material de refuerzo en AMCs resistente al desgaste y con buenas propiedades de dureza y resistencia (Lancaster, Lung y Sujan, 2013; Anas y Zafaruddin Khan, 2015).

En el caso particular de Cuba se genera una gran cantidad de ceniza de bagazo de caña de azúcar durante la quema del bagazo para la producción de energía. Estudios previos realizados por Villar-Cociña y col. (2013) muestran que esta ceniza puede ser empleada como material puzolánico en la industria cementera y de la construcción. Al mismo tiempo

como presenta altos contenidos de sílice en forma de dióxido de silicio y está constituida por fases del tipo cerámicas, entonces muestra enormes potencialidades de usarse como refuerzo en AMCs.

#### **1.4.4. Ceniza de cáscara de arroz**

La cáscara de arroz es la parte de la semilla que cubre el grano, la cual al ser separada de éste se desecha o es utilizado para otros fines, entre los que destacan la alimentación animal y la generación de energía. En este último caso, al quemarse la cáscara de arroz para la generación de energía, se produce como residuo, ceniza de cáscara de arroz.

Esta ceniza contiene una alta concentración de sílice, generalmente más de 80 - 85 % (Alaneme y Alumabi, 2013; Jyothi y Kumar, 2015) en forma de dióxido de silicio. Estos contenidos de sílice hacen a la ceniza de cáscara de arroz un material potencialmente apto para refuerzo en AMCs. En Cuba en los últimos años se ha potenciado la producción arrocería, sobre todo en las provincias de Sancti Spíritus y Gramma, por lo que pudiera disponerse de ceniza de cáscara de arroz para la fabricación de materiales compuestos de matriz de aluminio.

#### **1.4.5. Otros residuos**

Otros residuos agroindustriales pueden ser empleados como refuerzos en materiales compuestos y particularmente en MMCs. De estos los principales que quedan por mencionar son las fibras y cenizas de cáscara de coco, de palma, de la planta de maíz y de bambú (Alaneme y Adewuyi, 2013; Lancaster, Lung y Sujjan, 2013; Jyothi y Kumar, 2015), estos son ampliamente utilizados en general para la conformación de tejidos, como abono para la industria agrícola, en la elaboración de materiales compuestos que se emplean en la construcción como es el caso de cementos mejorados y en el amueblado. Además, son empleados como generadores de energía, como también es el caso de los estiércoles de los ganados vacunos, caprinos y bovinos, los cuales son biomásas abundantes en los países en que la agroindustria es un rublo económico importante.

En Cuba se genera gran cantidad de residuos agrícolas y forestales que se utilizan como biomasa, siendo estos la principal fuente de energía renovable en el país, ya sea mediante

su conversión en gas o mediante su quema directa. Las cenizas generadas por la incineración de estos residuos presentan en todos los casos que el mayor porcentaje de su composición química corresponde al  $\text{SiO}_2$ , lo que les confiere posibilidades para ser utilizadas como material de refuerzo en MMCs.

#### **1.4.6. Refuerzos de origen natural**

El empleo de refuerzos de origen natural en materiales compuestos ya se mencionó en el epígrafe anterior cuando se refirió el uso de fibras naturales de la cáscara del coco o la madera del bambú para refuerzo en concretos. En el caso particular de los AMC's en la búsqueda de opciones económicas en la fabricación de estos composites, se ha incursionado con buenos resultados con el empleo de arcillas y arenas de sílice (Zuhailawati, Samayamutthirian y Mohd Haizu, 2007; Manohar, Chikkanna y Gowd, 2012; Omole, Barnabas y Akinfolarin, 2015). Tanto las arcillas como las arenas de sílice presentan en su composición química elevados porcentajes de dióxido de silicio y de otros compuestos que capacitan a estos materiales para su empleo en calidad de refuerzos en AMC's. Además, en el caso del empleo de la arena de sílice como material de refuerzo Zuhailawati, Samayamutthirian y Mohd Haizu (2007) demostraron que se logra un composite de propiedades adecuadas, con densidad ligeramente inferior a la de la matriz sin reforzar y a un menor costo. Las arcillas se han empleado desde la segunda mitad del siglo pasado con buenos resultados, incluso en composite de matriz polimérica (Lan y Pinnavaia, 1994).

En Cuba se cuenta con yacimientos de ambos materiales, de arena de sílice y de arcillas naturales, las cuales pudieran ser fuente de estas materias primas para la producción de AMC's.

#### **1.4.7. Efectos de los refuerzos cerámicos sobre el comportamiento de la matriz de aluminio en AMC's**

La presencia de una determinada fracción volumétrica de refuerzo cerámico, bien sea en forma de partícula, fibra corta/bigote o fibra continua en los AMC's modifica el comportamiento de la matriz de aluminio durante la fabricación, y su posterior tratamiento térmico y uso en servicio. Esto incluye por supuesto, a los materiales de refuerzos antes discutidos, que poseen en su composición partículas y/o fases del tipo cerámica. Los



cambios que se producen en la matriz pueden dividirse según Surappa (2003) en intrínsecos y extrínsecos. Estos cambios pueden ampliar significativamente los límites de las propiedades físicas, mecánicas y tribológicas de las aleaciones de aluminio.

Los intrínsecos incluyen efectos microestructurales y modificación de las propiedades térmicas, en particular la resistencia térmica, y asociada con ella el comportamiento de la fatiga y la propagación de las fracturas durante la vida de servicio del compuesto. Estas modificaciones dependen de la composición de la matriz, el tamaño, la morfología y fracción volumétrica del refuerzo; y del método de producción del composite entre otros factores. Mientras, los cambios extrínsecos incluyen una mejoría significativa de las propiedades tribológicas del compuesto con relación a la matriz sin reforzar (Aigbodion y col., 2010; Itkos y col., 2011; Alaneme y Alumabi, 2013; Veličković y col., 2016). Por ejemplo, las buenas propiedades de resistencia al desgaste por deslizamiento de diferentes tipos de AMCs que emplean como refuerzo materiales cerámicos, han condicionado el desarrollo, desde finales del siglo pasado (Surappa, 2003), de diferentes tipos de AMCs para los sistemas de frenado ligero de muchos medios de transporte. Este es solo un ejemplo en el que tanto los efectos intrínsecos como los extrínsecos de los refuerzos cerámicos en los AMCs se aprovechan para obtener un nuevo material con propiedades superiores a sus constituyentes por separado.

### **1.5. Métodos de producción para AMCs**

De acuerdo con lo descrito hasta ahora, las características y propiedades de los AMCs dependen de las propiedades de la matriz, del tipo de refuerzo empleado, su tamaño, morfología, fracción volumétrica, etc.; y del método de producción del composite entre otros factores.

Los métodos de fabricación a escala industrial de los AMCs se pueden clasificar en dos grandes grupos (Surappa, 2003), a saber:

- (I) Procesos de fabricación en estado líquido
- (II) Procesos de fabricación en estado sólido

Los procesos de fabricación en estado líquido consisten en incorporar el material de refuerzo, o sea, el componente disperso, en la matriz metálica fundida, seguido del proceso de solidificación. El propósito final es obtener un composite con un alto nivel de sus propiedades mecánicas, lo que requiere de un buen enlace entre el componente disperso, el refuerzo, y la matriz líquida, para lo cual es necesario que el metal líquido moje al refuerzo. Sin embargo, no todos los refuerzos presentan una buena mojabilidad con el aluminio y se hace necesario mejorar la humectación del componente disperso, lo que se consigue recubriéndolo con determinadas sustancias. El recubrimiento adecuado no sólo reduce la energía de interface, sino que también evita la interacción química entre el componente disperso y la matriz (Saravanan y col., 2015).

Se reporta (Tabish, 2009) que entre los principales problemas relacionados con el uso de los procesos en estado líquido para producir materiales compuestos de matriz metálica se encuentran: la humectación del componente disperso en la matriz metálica, la reacción entre el refuerzo y la matriz, la distribución de refuerzo en la matriz y la porosidad, inherente a todos los procesos de fundición.

Por otra parte, la fabricación en estado sólido de compuestos de matriz aluminio o de matriz metálica en general, es el proceso en el que se forman MMCs como resultado de la unión del metal de la matriz y el refuerzo, o componente disperso, debido a la difusión mutua que se produce entre ellos, en estado sólido, a temperatura elevada y baja presión.

Durante el proceso de fabricación del composite, tal vez uno de los desafíos más grandes es lograr la distribución homogénea del refuerzo en la matriz para así obtener una microestructura con un mínimo de defectos (Kandpal, Kumar y Singh, 2014), al menos en niveles tolerables. Otro de los elementos a tener en cuenta es el costo de producción del composite. Estos dos elementos han condicionado la preferencia por los composite reforzados con partículas, para cuya producción se pueden utilizar diversos procedimientos.

A pesar de que existen otros criterios de clasificación de los procedimientos de fabricación de los compuestos de matriz metálica (Ramu y Ranjit Bauri, 2009), en cualquier variante de clasificación, la fabricación de estos materiales, habitualmente implica métodos físicos como proyección térmica, pulvimetalurgia, aleación mecánica, colada convencional, bajo

presión o por infiltración, junto a métodos químicos como el de obtención de las partículas de refuerzo in situ. Cada uno de estos procedimientos tiene sus ventajas e inconvenientes. Sin embargo, la vía pulvimetalúrgica presenta, generalmente, mejores propiedades, en términos de mayor resistencia de los compuestos, que las obtenidas por otros métodos, y a unos costos de fabricación aceptables.

Por su importancia para esta investigación, a continuación, se detalla la técnica de metalurgia de polvos o pulvimetalurgia.

### **1.5.1. Pulvimetalurgia**

La metalurgia de polvos o pulvimetalurgia es el proceso de mezclar materiales en polvos finos, presionándolos en una forma deseada (compactada) y luego calentando el material comprimido en una atmósfera controlada hasta temperaturas cercanas a la fusión de la matriz para unir a los materiales (sinterización). El proceso de metalurgia de polvos generalmente consiste en cuatro pasos básicos: (1) fabricación de los polvos, (2) mezclado de los polvos, (3) compactación o prensado en frío y (4) sinterización (Rana, Purohit y Das, 2012).

La compactación se lleva a cabo generalmente a temperatura ambiente. El prensado en frío se utiliza para producir lo que se llama un cuerpo verde, que es aproximadamente 80 % denso y puede ser manejado fácilmente. El cuerpo verde prensado en frío se coloca en un recipiente sellado y se desgasifica para eliminar cualquier vestigio de la humedad absorbida, fundamentalmente por las partículas del refuerzo. A continuación, se realizan el proceso de sinterización a temperatura elevada y presión atmosférica; y finalmente se ejecutan los procesamientos secundarios opcionales para obtener propiedades especiales o mejorar el material compuesto (Kandpal, Kumar y Singh, 2014).

La metalurgia de polvos es un método altamente desarrollado para fabricar componentes fiables, mezclando los polvos elementales o prealeados juntos, compactando esta mezcla y sinterizando o calentando la pieza prensada en un horno de atmósfera controlada para unir las partículas metalúrgicamente. El proceso de pulvimetalurgia es un método de fabricación de piezas único, altamente rentable en la producción de piezas simples o complejas cercanas a las dimensiones finales. El procesamiento por pulvimetalurgia proporciona las

siguientes ventajas: producción de formas complejas hasta tolerancias dimensionales muy cercanas, con pérdida mínima de chatarra y menos operaciones de mecanizado secundario, las propiedades físicas y mecánicas de los componentes pueden predecirse mediante un adecuado control de los materiales de partida y los parámetros del proceso, capacidad de incorporar una fracción de volumen de refuerzo relativamente alta y fabricación de materiales compuestos con aleación de matriz y sistemas de refuerzo que son inmiscibles mediante fundición líquida. Sin embargo, este método requiere polvos de aleación que son generalmente más caros que el material a granel, e implica procesos complicados durante la fabricación del material. Por lo tanto, la metalurgia de polvo puede no ser una técnica de procesamiento ideal para la producción en masa.

## **CAPÍTULO II. Materiales y Métodos**

---

En este capítulo se presentará de forma breve, cómo y con qué se procedió para la caracterización de dos posibles materiales de refuerzo: una ceniza de bagazo de caña de azúcar colectada directamente de la caldera de un central cubano y de una arcilla de procedencia también nacional, tanto en su estado natural como calcinada, para determinar sus posibilidades para ser usados como refuerzos en AMCs. De igual forma, se describe el proceso de preparación de las muestras compuestas de matriz de aluminio reforzado con la SCBAB y de la matriz sin reforzar, así como sus estudios morfológicos y determinación experimental de la dureza Vickers.

### **2.1. Caracterización de la SCBAB y de la ANC**

La ceniza (SCBAB) empleada en estos estudios se colectó directamente de la caldera del central “Luis Arcos Bergnes” en Camajuaní, Villa Clara y, por otra parte, la arcilla natural cubana (ANC) procede de un yacimiento cercano al poblado de Miller, también en la provincia de Villa Clara.

La SCBAB y la ANC se molieron en un molino de bolas de cerámica con frecuencia de rotación de 150 rpm durante 60 min y después se tamizaron. Las partículas que finalmente se emplearon en los experimentos corresponden a las fracciones que fueran colectadas por debajo de 150  $\mu\text{m}$ .

Para el estudio de la arcilla se prepararon dos tipos de muestras, una muestra fue de la arcilla del yacimiento de Miller en su estado natural y la otra luego de calcinada durante 4 h a una temperatura de 1 000 °C y dejada enfriar lentamente dentro del propio horno.

En el caso de la SCBAB se determinó la distribución de partículas empleando un analizador de tamaño de partícula por difracción laser (Malvern Mastersizer Particle Size Analyzer and Mastersizer Software long bed Version 2.19) con agua desionizada y partículas dispersas por agitación ultrasónica durante 60 segundos.

La composición química de ambos materiales se determinó por espectroscopía de fluorescencia de rayos X (XRF). Se usó un espectrómetro Phillips PW1400 con tubo de Rh, a 30 kV y 60 mA.

La composición mineralógica de los dos materiales en estudio se determinó mediante difracción de rayos X (XRD) empleando un difractómetro Phillips MPD 1880. Se usó radiación Cu K $\alpha$ , y la identificación de las fases se realizó con el empleo de las bases de datos PAN - ICSD (2016) (PANanalytical Inorganic Crystal Structure Database) y PDF-2 de ICDD (2016) (Powder Data File of International Center for Diffraction Data). En el caso de la arcilla fueron analizadas muestras de la ANC y de la ANCC.

En el caso de la ANC se realizaron estudios de termogravimetría (DTG). Se empleó un equipo Perkin-Elmer DTA7 y una termobalanza Perkin-Elmer TGA7. Ambos estudios se realizaron en atmósferas de oxígeno incrementando la temperatura hasta 1 000 °C con rapidez de 10 °C/min.

El estudio morfológico se realizó empleando técnicas de microscopía electrónica de barrido (SEM). En el caso de la SCBAB se usó un microscopio FEI Quanta 600 FEG, mientras que en el caso de la arcilla solo se estudiaron muestras de la ANCC y para ello se empleó un microscopio modelo FEI Quanta 200 FEG. Además, en este caso se realizaron análisis por microsonda a puntos seleccionados de las muestras.

## **2.2. Preparación de las muestras compuestas Al-SCBAB y de la matriz sin reforzar**

Las muestras compuestas se han preparado empleando la técnica de la metalurgia de polvos. Se hicieron dos tipos de muestra, una primera fue un AMC reforzado con ceniza de bagazo de caña de azúcar de la caldera (Composite Al-SCBAB) y el segundo tipo, una matriz de aluminio sin refuerzo. Fue seleccionado como la matriz, polvo de metal de un 99,5 % de aluminio de grado reactivo. El refuerzo seleccionado fue las cenizas de bagazo de caña de azúcar recogidas directamente de la caldera de la fábrica de azúcar cubano.

El polvo de aluminio se acondiciona previamente antes de añadirle la SCBAB y mezclar los polvos. Este procedimiento de preacondicionamiento consiste en secar el polvo de aluminio en un horno con una atmósfera de nitrógeno a la temperatura de 450 °C, hasta que no se

observó ningún cambio adicional en la masa. El procedimiento requiere normalmente alrededor de 4 horas para eliminar las moléculas de gas de agua asociadas presentes en la película de óxido hidratado de las partículas de polvo de aluminio para evitar la posterior porosidad en el material compuesto y se enfrió a continuación el polvo de aluminio a temperatura ambiente en desecadores con zeolita activada.

La SCBAB se añadió al polvo de aluminio hasta un nivel de 4 % en peso y luego se mezclaron los polvos en un mezclador de agitación durante dos minutos hasta que se consiguió una mezcla homogénea de los polvos.

Los polvos mezclados se compactaron en moldes cilíndricos de acero inoxidable ( $19,60 \pm 0,01$ ) mm y ( $46,91 \pm 0,01$ ) mm de diámetro y longitud, respectivamente. Esta operación se realizó de forma manual utilizando una prensa mecánica y a temperatura ambiente. De la misma manera se procedió con la matriz no reforzada. En ambos casos, la presión aplicada fue de 10 tn.

Finalmente, las muestras se sometieron al proceso de sinterizado en un horno a 600 °C, bajo un flujo constante de nitrógeno. El calentamiento del horno se inició después de que las muestras fueron introducidas dentro de él. La temperatura de 600 °C se alcanzó alrededor de 60 min. Tras el proceso de sinterizado, las muestras se retiraron del horno y se dejaron enfriar en desecadoras con zeolita activada.

### **2.3. Caracterización de las muestras compuestas Al-SCBAB y de la matriz sin reforzar**

Cinco muestras de cada tipo fueron sometidos a la prueba de dureza Vickers y una de cada tipo se asignó para el estudio morfológico por microscopía óptica.

La dureza es una medida de cómo la materia sólida puede soportar presiones con objetos de varias formas cuando actúan sobre él con una fuerza permanente durante un tiempo dado. Hay tres tipos de pruebas que se utilizan para la medición de dureza, sin embargo, en el presente trabajo sólo se consideró la prueba de dureza Vickers. Las medidas de dureza Vickers se llevaron a cabo con el fin de investigar la influencia de SCBAB en la dureza de la matriz y se llevó a cabo usando un medidor de dureza Vickers con una incertidumbre de

medición de 1 %. Antes del ensayo, las superficies de las muestras se pulieron usando los papeles de esmeril de malla 1 000.

Por último, los ensayos se realizaron en las cinco muestras de cada tipo (cinco del AMC Al-SCBAB y cinco de la matriz sin refuerzo como muestra comparativa). La carga aplicada en todos los casos fue de 5 kg durante 10 segundos.

El estudio morfológico de los dos, el compuesto de Al-SCBAB y la matriz de aluminio sin refuerzo se realizó utilizando un microscopio óptico Novel. Primeramente, las superficies planas de los discos cilíndricos fueron devastadas utilizando una serie de papeles abrasivos de diferente malla y luego pulidas con pasta de diamante.



### **CAPÍTULO III. Presentación y discusión de los resultados**

En este capítulo se presentan y analizan los principales resultados a los que se arriba luego de los procesos de caracterización de la SCBAB, de la ANC y la ANCC, así como del estudio comparativo de la morfología y la dureza del compuesto Al - SCBAB y su matriz sin reforzar.

#### **3.1. Caracterización de la ceniza de bagazo de caña de azúcar recogida directamente de la cardera del central cubano**

##### **3.1.1. Distribución del tamaño de las partículas de la SCBAB**

La figura 1 muestra la distribución del tamaño de las partículas de la SCBAB, observándose que tal distribución es variable. De acuerdo con la curva granulométrica, las cenizas tienen una granulometría fina con un tamaño de diámetro del grano de alrededor de entre 0,7 y 130  $\mu\text{m}$  y tamaño medio ( $D_{50}$ ) de 34,97  $\mu\text{m}$ .

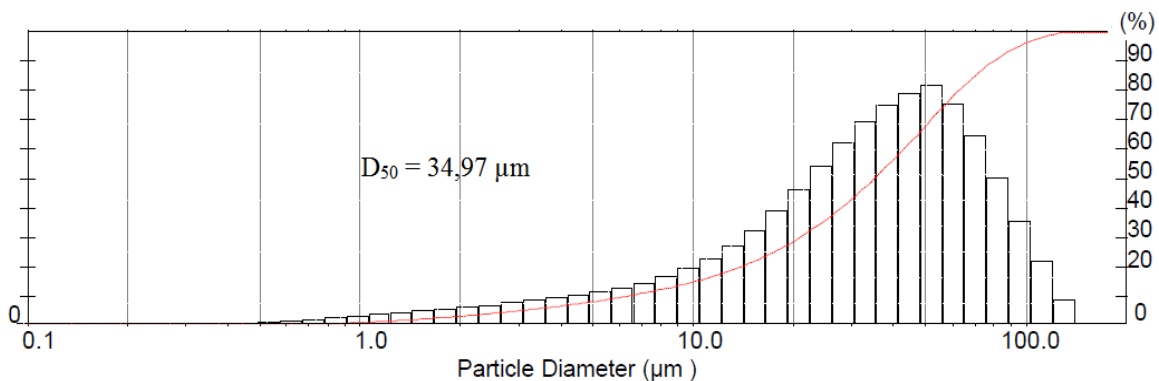


Figura 1: Distribución de tamaños de partículas de la SCBAB.

Esta ceniza presenta una finura similar a otros polvos y cenizas empleadas como material de refuerzo en AMCs (Sharanabasappa y Motgi, 2013). Desde esta perspectiva es apropiada para su uso como material de refuerzo en estos composites, y particularmente en los casos en que se fabrican mediante sinterización, pues con la elevación de la temperatura a valores cercanos a los de fusión del aluminio durante tiempos relativamente prolongados, se favorece la difusión atómica en estado sólido entre las superficies de las partículas de la matriz de aluminio y las de la ceniza que se encuentran en contacto, con lo cual se logra la

cohesión de los constituyentes y consecuentemente se condicionan buenas propiedades de resistencia y dureza entre otras propiedades mecánicas del compuesto.

### 3.1.2. Composición química de la SCBAB

Empleando técnicas de fluorescencia de rayos X (XRF) se determinó la composición química de la SCBAB, estos resultados se muestran en la tabla 1.

Tabla 1: Composición química de la SCBAB por XRF.

Óxidos	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	Otros	PI
<b>m; %</b>	79,9	5,14	4,04	3,41	2,11	2,03	1,49	0,25	0,12	0,76	0,75
<b>PI:</b> Pérdida por ignición											

Según se puede apreciar, el óxido principal en la composición de la SCBAB es el dióxido de silicio o sílice (SiO<sub>2</sub>) con 79,9 % de la masa total, seguido de óxido de potasio (K<sub>2</sub>O), óxido de fósforo (III) o fosfato (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) y óxido de calcio (CaO). El resto de los óxidos, tales como óxido de hierro III (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), óxido de magnesio (MgO) y óxido de aluminio o alúmina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), están presentes en cantidades más pequeñas, concluyéndose que casi el 80 % de la masa de la SCBAB corresponde al dióxido de silicio.

Una comparación de esta ceniza (SCBAB) con otras cenizas de bagazo de caña de azúcar (SCBA) calcinadas bajo condiciones de laboratorio reportados en trabajos anteriores (Morales y col., 2009; Frías y Villar-Cociña, 2007) muestra que sus composiciones químicas son similares. En estos casos también el SiO<sub>2</sub> está presente como el óxido principal seguido de óxido de calcio y óxido de hierro (III), suma que alcanza valores superiores a 80 %. De acuerdo con lo planteado, la SCBAB tiene potencial para ser utilizado como material de refuerzo en AMCs.

### 3.1.3. Composición mineralógica de la SCBAB

Mediante técnicas de difracción de rayos X (XRD) se estudió la composición mineralógica de la SCBAB. La figura 2 muestra los resultados, donde se puede apreciar que esta ceniza está formada por cristobalita (sílice) como fase principal con estructura cristalina cúbica, seguido de tridimita beta (fase hexagonal).

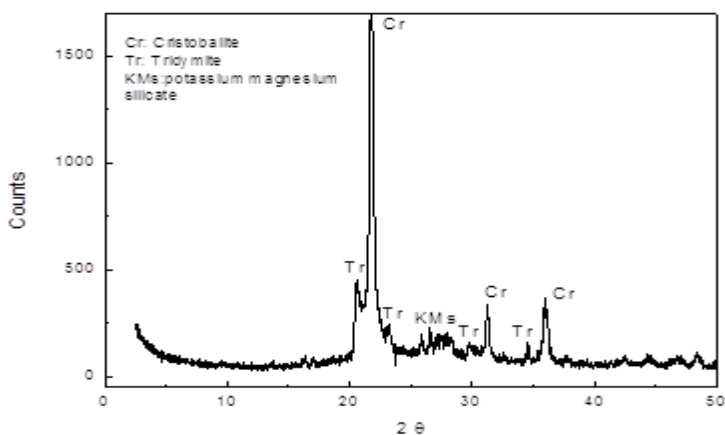


Figura 2: Patrón de difracción de rayos X de la SCBAB.

En estudios anteriores con cenizas de bagazo de caña de azúcar calcinado a 800 y 1 000 °C (Frías y Villar-Cociña, 2007; Villar-Cociña y Frías, 2008), fue identificada claramente una importante fase vítrea en la zona entre 15 y 35° (2 theta), y compuestos tales como calcita y cuarzo como las principales fases cristalinas en la ceniza de bagazo de partida obtenida a 800 °C. Sin embargo, un aumento de la temperatura (1 000 °C) produjo un ligero cambio en la composición mineralógica de esta ceniza, al detectarse la presencia de compuestos cristalinos identificados como óxido de calcio y cristobalita. De este modo, es importante resaltar que la presencia de cristobalita en la SCBAB puede ser un indicador de que la temperatura en la caldera alcanza alrededor de 1 000 °C o más. Esta formación es resultado del proceso de recristalización a partir de la sílice amorfa a cristalina, que tiene lugar a altas temperaturas que se alcanzan en la caldera.

También se detectaron trazas de silicato de magnesio y potasio ( $K_2MgSi_5O_{12}$ ) y picos atribuidos al carbono. La presencia de carbono se puede explicar por la combustión incompleta del bagazo. La presencia de calcio y fosfato de magnesio ( $Ca_{2.81}Mg_{0.19}(PO_4)_2$ )

no está excluida, lo que es posible debido a que el fósforo se puede encontrar entre los nutrientes más comunes de la tierra, que pueden formar diferentes compuestos con otros elementos presentes en la caña de azúcar. La banda amplia y débil localizada entre 15 y 35° (2 theta) es una señal de la presencia de materia amorfa.

Las fases más abundantes en la SCBAB incluyen cristobalita y tridimita, formas alotrópicas de dióxido de silicio (SiO<sub>2</sub>). Esto, junto con la presencia de silicatos, da a la SCBAB amplias perspectivas para su uso como material de refuerzo cerámico en la fabricación de materiales compuestos de matriz metálica, en particular de AMCs.

### 3.1.4. Aspecto morfológico de la SCBAB

Empleando técnicas de microscopía electrónica de barrido (SEM) se llevó a cabo el estudio morfológico de la SCBAB, cuyas imágenes resultantes se muestra en la figura 3.

Es bien conocido que la morfología y estructura de las cenizas depende directamente del proceso de incineración que se le aplique y de la temperatura que se alcance en dicho proceso. La micrografía de la figura 3a muestra la morfología general de las partículas de la SCBAB, presentándose una mezcla heterogénea de partículas de cristobalita y partículas con forma irregular, superficie porosa y lisa, típica de materiales orgánicos. Mientras las otras micrografías (figuras 3b y 3c) muestran respectivamente las estructuras en capas y la porosidad que son característicos de las partículas de cristobalita.

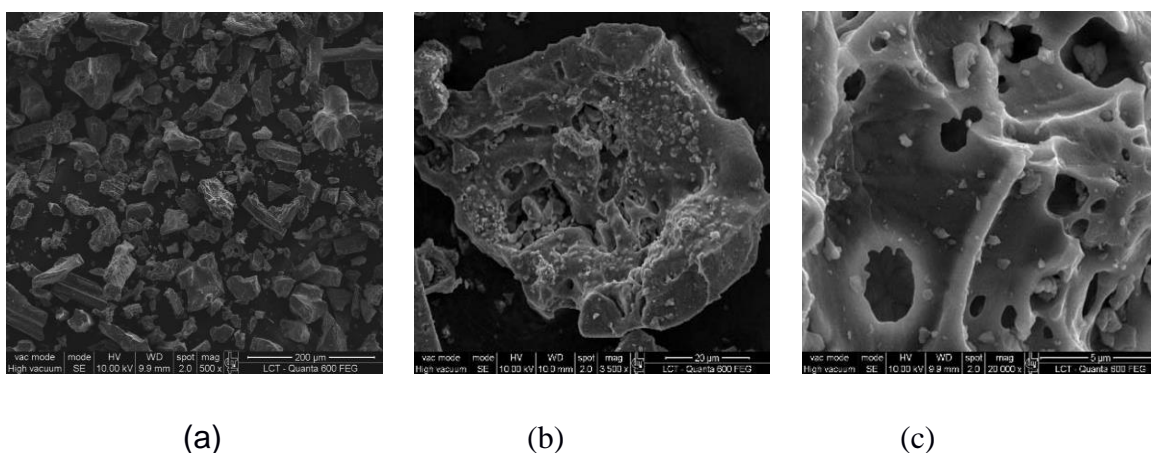


Figura 3: Microfotografías SEM de la SCBAB: (a) la morfología general; (b) y (c) aspectos de las partículas de cristobalita.

### 3.2. Caracterización de la arcilla del yacimiento de Miller

La arcilla procedente del yacimiento de Miller fue caracterizada en su estado natural y no se observaron cambios por encima de los 900 °C, por lo que se decide someterla a un proceso de calcinado bajo la hipótesis de que conduciría a estructuras cerámicas de alta refractariedad y dureza, como los necesarios para reforzar materiales compuestos de matriz de aluminio. Por tanto, el estudio de esta arcilla se realiza en su estado natural y calcinado a 1 000 °C.

#### 3.2.1. Caracterización de la arcilla en su estado natural

##### 3.2.1.1. Composición química de la arcilla en su estado natural

Por medio del empleo de la técnica de fluorescencia de rayos X (FRX) se obtuvo la composición química de la arcilla del poblado de Miller en su estado natural, estos resultados se presentan en la tabla 2.

Tabla 2: Composición química de la ANC obtenida por FRX.

Óxidos	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	CaO	K <sub>2</sub> O	MnO	SO <sub>3</sub>	Otros	PI
m; %	43,98	24,73	11,13	2,63	1,99	1,38	1,10	0,14	0,08	3,11	9,81
<b>PI:</b> Pérdida por Ignición											

Como se puede apreciar, el óxido principal en la composición química de la arcilla natural es el dióxido de silicio o sílice (SiO<sub>2</sub>) con 43,98 % de la masa total, seguido de óxido de aluminio o alúmina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) con 24,73 %, y los óxidos de hierro III (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) y de magnesio (MgO) con 11,13 % y 2,63 % respectivamente. El resto de los óxidos, tales como óxido de sodio (Na<sub>2</sub>O), óxido de calcio (CaO) y óxido de potasio (K<sub>2</sub>O), están presentes en cantidades más pequeñas. Como se puede apreciar la relación molar SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> es aproximadamente 2:1.

Al existir un elevado contenido de sílice (SiO<sub>2</sub>) y alúmina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) en esta arcilla le otorga, en primera aproximación, amplias posibilidades para ser utilizada como material de refuerzo en AMCs.

### 3.2.1.2. Composición mineralógica de la arcilla en su estado natural

Al efectuar la caracterización física de la arcilla bajo estudio mediante difracción de rayos X (XRD), se observó la presencia de montmorillonita, illita y caolinita, como se aprecia en la figura 4.

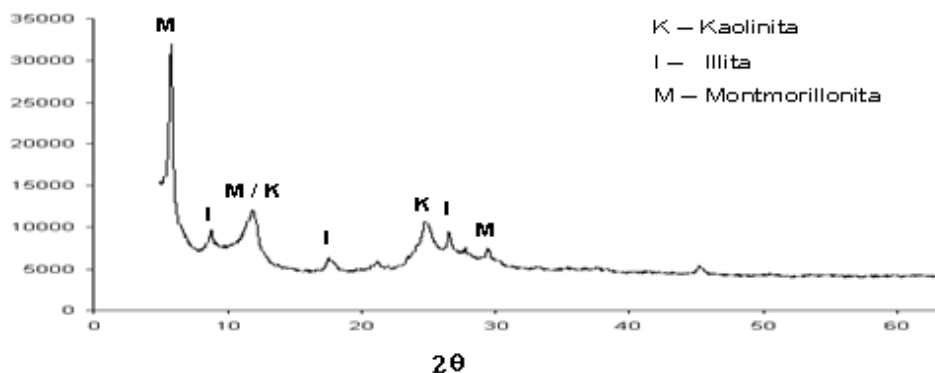


Figura 4: Patrón de difracción de rayos X de la ANC.

De acuerdo a la composición química presentada anteriormente y los resultados de la XRD, la arcilla estudiada, teniendo en cuenta los criterios de Alton (Wade y Mattox, 1976), puede ser clasificada como una caolinita.

En la caracterización de una arcilla perteneciente a la región de Guanajuato en México (Fuentes y col., 2008) se observó una fracción de color amarillo, color similar al de la arcilla que se estudia, observando que en el difractograma correspondiente se apreciaba la presencia de caolinita, que es un material fino que aporta plasticidad, así como feldespato plagioclasa (material con propiedades de material fundente) y cuarzo, además de la probable presencia de Montmorillonita y clorita, lo cual le confiere características de material arcilloso caolinítico.

### 3.2.1.3. Curvas termogravimétricas diferenciales de la arcilla en su estado natural

El estudio de la arcilla del yacimiento de Miller en su estado natural mediante técnicas de termogravimetría diferencial (DTG) y el análisis comparativo con los patrones DTG para la caolinita, illita y montmorillonita se presenta en la figura 5, donde se muestran

simultáneamente las curvas DTG típicas de estas arcillas en su estado puro y la experimental correspondiente ANC.

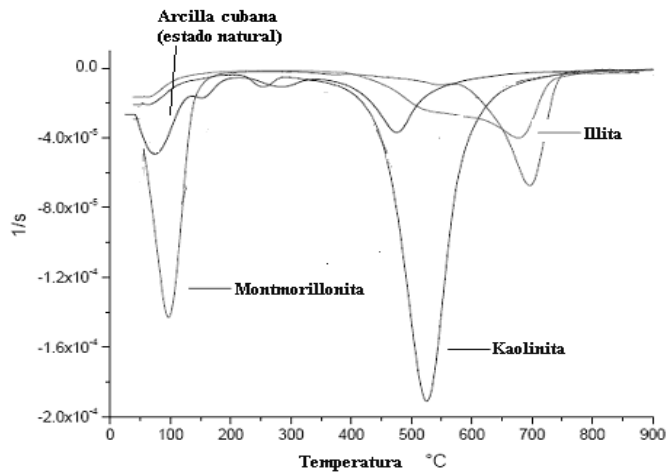


Figura 5: Curvas DTG de la ANC, comparándola con las curvas patrones de caolinita, Illita y montmorillonita.

La curva de DTG de la arcilla cubana presenta las características comunes de las arcillas naturales. Como, por ejemplo, la pérdida de agua interlaminar que sufre en el rango de temperatura de 50 a 200 °C, lo que podría ser un indicador de la presencia de montmorillonita en la arcilla cubana bajo estudio (se puede observar cómo aparece este efecto en la curva patrón de montmorillonita), mientras que en el rango de 400 a 650 °C ocurre el proceso de deshidroxilación, lo cual es característico de las caolinitas (obsérvese este efecto en la caolinita pura). Estos resultados concuerdan bien con la identificación de cristales por XRD.

Sin embargo, mientras por XRD aparece la presencia de illita, el análisis por DTG no indica su presencia en la arcilla cubana debido a la ausencia del pico endotérmico que se observa en el patrón de illita, pero esto es probablemente debido al hecho de que la fase illita está presente en pequeñas cantidades y su señal está solapada con la de la caolinita formando una banda ancha.

Al analizar más detenidamente la curva DTG para la arcilla natural cubana que se muestra en la figura 6, se infiere no solo la pérdida de las aguas de hidratación y de constitución, sino también la destrucción de la red cristalina de la caolinita y la fusión de aquellos

componentes menos refractarios. Véase un efecto endotérmico por debajo de los 100 °C relacionado con la pérdida de humedad superficial, un efecto endotérmico menos marcado por encima de los 200 °C relacionado con la pérdida de agua de los espacios interlaminares en la caolinita y otro efecto endotérmico más marcado aproximadamente entre los 350 °C y 750 °C, el cual corresponde con la pérdida del agua hidroxílica (de constitución), que ocasiona la destrucción de la red cristalina de la caolinita.

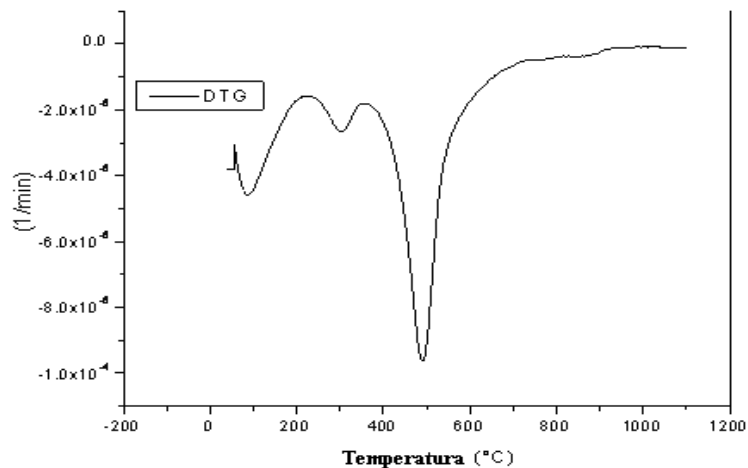


Figura 6: Análisis DTG de la ANC.

Como se puede apreciar en el DTG, por encima de los 900 °C no se observan cambios en la arcilla estudiada, por lo que se decide someterla a un proceso de calcinado durante 4h a una temperatura de 1 000 °C y luego dejarla enfriar lentamente dentro del horno, con el objetivo de estudiar los productos de las reacciones topoquímicas que ocurrirían en la misma durante el proceso de calcinación, los cuales deben conducir a estructuras cerámicas de alta refractariedad y dureza, como los necesarios para reforzar AMCs.



### 3.2.2. Caracterización de la arcilla calcinada

#### 3.2.2.1. Composición mineralógica de la arcilla calinada

Mediante la técnica de XRD se analizó la composición fásica de la arcilla del yacimiento de Miller luego del proceso de calcinación, para lo cual se observaron las fases que se reportan en la tabla 3.

Tabla 3: Fases presentes en la arcilla calcinada durante 4 h a 1 000 °C.

Fase	Fórmula química
Cuarzo	$\text{SiO}_2$
Magnesio-hornblenda	$(\text{Ca,Na})_{2,28}(\text{Mg,Fe,Al})_{5,15}(\text{Si,Al})_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
Moscovita	$(\text{K,Na})(\text{Al,Mg,Fe})_2(\text{Si}_{3,1}\text{Al}_{0,9})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
Diopsidio	$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$
Albita	$\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$

#### 3.2.2.2. Aspecto morfológico y caracterización por microsonda de la arcilla calcinada

Simultáneamente se efectuó un estudio por SEM de la arcilla y se hizo análisis por microsonda en algunos puntos como se muestra a continuación.

En la figura 7 aparece la micrografía de una muestra de la arcilla natural cubana calcinada obtenida por SEM y el análisis por microsonda, que como se puede apreciar por la composición química y por la morfología del mineral, corresponde con un grano de cuarzo, que coincide con una de las fases caracterizadas por XRD. El dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) es uno de los componentes de la arena, en la naturaleza se da de forma natural como cuarzo y se encuentra también formando parte de las arcillas, al igual que se reporta en los trabajos anteriores (Gaviria, Hernández y Vargas, 2004), su punto de fusión es de 1713 °C, por lo que a la temperatura de calcinación de la muestra estudiada no sufrió ningún cambio.

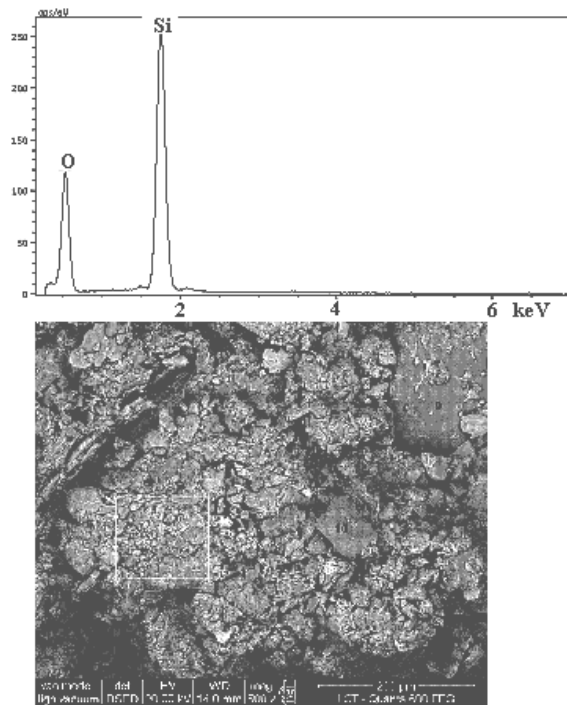


Figura 7: Micrografía SEM de la ANCC mostrando el cuarzo y el análisis por microsonda correspondiente.

En la figura 8, se aprecia la imagen obtenida por SEM de una parte de la muestra calcinada, en el punto 20 aparece señalado un grano de Albita, una de las fases cristalinas que, parcialmente, no se destruyó durante el proceso de calcinación.

En el análisis por microsonda se detectan los elementos típicos de la fórmula química de la albita:  $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ , aunque también se presenta en otras variedades como  $(\text{Na},\text{Ca})\text{AlSi}_3\text{O}_8$  y  $(\text{Na},\text{K})\text{AlSi}_3\text{O}_8$ . Está compuesta por silicato de sodio y aluminio, frecuentemente con el sodio parcialmente sustituido por calcio o potasio hasta un diez por ciento. Su color puede ser blanco, incoloro, crema, verde claro, azul claro, amarillo claro, rojo pálido, carmelita claro y gris, algunos tipos son iridiscentes. Alcanza una dureza entre 6 y 6,5. Sus cristales son triclinicos, generalmente planos y laminar formando grupos compactos. También se presentan en forma prismática corta y en forma tubular. Se presentan en forma agrupada, nunca en forma simple o formando parte de una matriz. La densidad está en el orden de 2.6 - 2.63  $\text{g}/\text{cm}^3$ . La albita es usada industrialmente en la producción de cerámicas. Este compuesto es muy importante en el estudio de la formación de las rocas (Gaviria,

Hernández y Vargas, 2004). En esta muestra calcinada, de acuerdo con los criterios de Armbruster (1990), la albita ha facilitado la fusión de las arcillas, con las que ha formado un material cerámico que sirve de pegamento para unir al resto de las fases altamente refractarias que se detectaron.

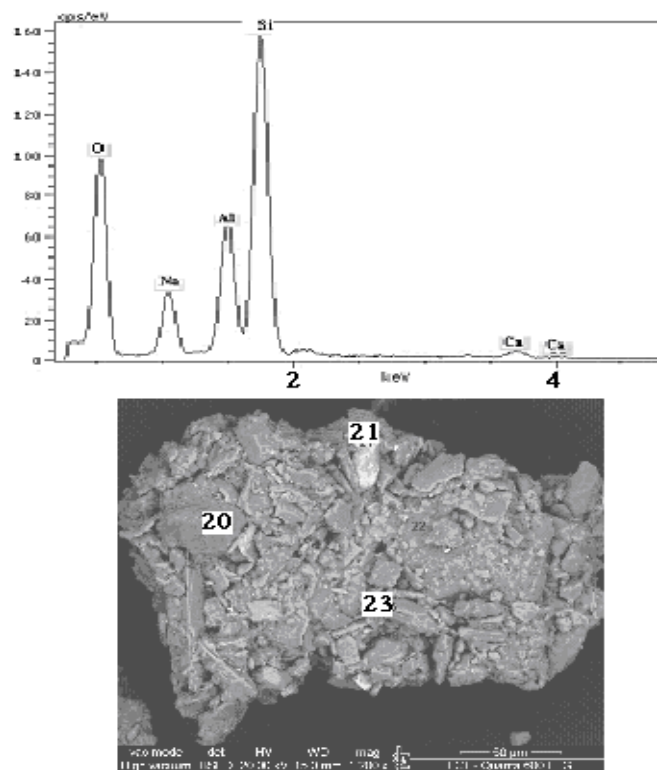
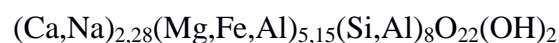


Figura 8: Micrografía SEM de una muestra de la ANCC y análisis por microsonda correspondiente al punto 20 (albita).

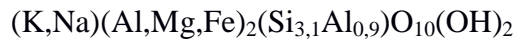
En la propia figura 8 se aprecia en el punto 21 un grano de cuarzo, del cual ya se habló anteriormente y en el punto marcado con el número 23, un grano de hornblenda, otra de las fases que se detectó mediante XRD. Se muestra además el análisis por microsonda que permitió identificar a este compuesto como uno de los componentes de la arcilla calcinada. Su fórmula química es:



La hornblenda es común en muchas piedras ígneas que van del granito al gabbro; también está presente como elemento en piedras metamórficas. La hornblenda también aparece en

algunas piedras volcánicas y se reporta normalmente alterando a la biotita o la clorita. Este componente de las arcillas estudiadas no sufrió cambios durante el proceso de calcinación producto a su elevado punto de fusión.

Otra de las fases detectadas por XRD fue la moscovita, que en la figura 8 aparece marcada por el punto 23 y en la figura 9 a un mayor aumento; su fórmula química es:



Su composición química se reporta en la literatura formada por:

11,82 % K<sub>2</sub>O, 38,38 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 45,23 % SiO<sub>2</sub>, 4,29 % H<sub>2</sub>O

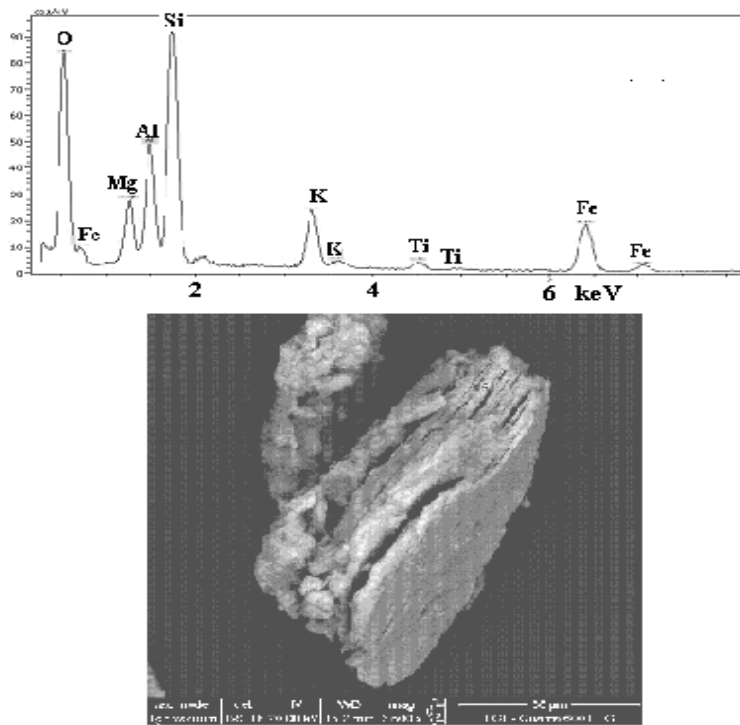


Figura 9: Microfotografía obtenida por SEM y resultados del análisis por microsonda que muestran la presencia de moscovita en la arcilla calcinada.

Dentro de las características de este componente se encuentra que presenta una estructura cristalina Seudo-hexagonal de la clase Prismática, con una dureza entre 2 - 2,5 y una densidad relativa entre 2,76 - 3,1 g/cm<sup>3</sup>. Este mineral aparece asociado comúnmente, en esquistos, granitos, piedras areniscas y pegmatitas dónde forma parte de los cristales

grandes. Se forma a partir de los procesos, hidrotermales y metamórficos; también se forma a partir de la cristalización de piedras ácidas, apareciendo en los granitos, en las micas, apatitas y pegmatitas, y en los granitos en la mayoría de los casos es producto de las transformaciones magmáticas (metamorfismos e hidrotermalismo). Presentan bajo coeficiente de conductibilidad térmica, es resistente a las temperaturas altas y los cambios térmicos, debido principalmente a que su coeficiente de dilatación es bajo. Debido a sus propiedades se emplea como aislante eléctrico, se usa en los condensadores, reóstatos, teléfonos, lámparas eléctricas y fusibles, también es empleado como adsorbentes para la eliminación de contaminantes en aguas y efluentes líquidos (Bravo, 2009).

La última de las fases detectadas por XRD en la muestra de arcilla calcinada es el diopsidio, que es una roca importante que forma parte de varios minerales metamórficos y es un componente básico de las rocas ígneas, también es encontrado en los meteoritos.

El diopsidio es parte de una serie de soluciones sólidas importantes del grupo del piroxeno, que incluye al hedenbergita  $\text{CaFeSi}_2\text{O}_6$ , y la augita,  $(\text{Ca,Na})(\text{Fe,Mg,Al})(\text{Al,Si})_2\text{O}_6$ .

Es el mineral de su grupo más rico en magnesio. Es típicamente blanco o verde y puede tener un lustre vítreo bueno. Mientras el color de diopsidio con cromo es mucho más luminoso. El sistema cristalino del diopsidio es monoclinico;  $2/m$  y los cristales son prismáticos. La sección cruzada cuadrada es distintiva en los cristales prismáticos. También aparece en forma granular, columnar y macizo. Presenta una dureza entre 5 - 6, su densidad específica es aproximadamente  $3,3 \text{ g/cm}^3$ . Se encuentra asociado a minerales como fluorita, dolomita, clorita, olivina, meteoritos férricos y la calcita (Griffen, 1981).

La mayoría de las fases presentes en los productos de la calcinación de la arcilla estudiada, corresponden a materiales cerámicos de elevada dureza (Brindley y Brown, 1980), los cuales presentan propiedades adecuadas para ser empleados como refuerzos tanto de MMCs como los de matriz de aluminio.

### **3.3. Estudio comparativo de la morfología y la dureza del compuesto Al - SCBAB y su matriz sin reforzar**

#### **3.3.1. Aspecto morfológico del compuesto Al - SCBAB y su matriz no reforzada**

Con el empleo de la técnica de microscopía óptica se observó las microestructuras tanto del AMC estudiado: Al-SCBAB como de su matriz sin reforzar, cuyas micrografías se representan en la figura 10.

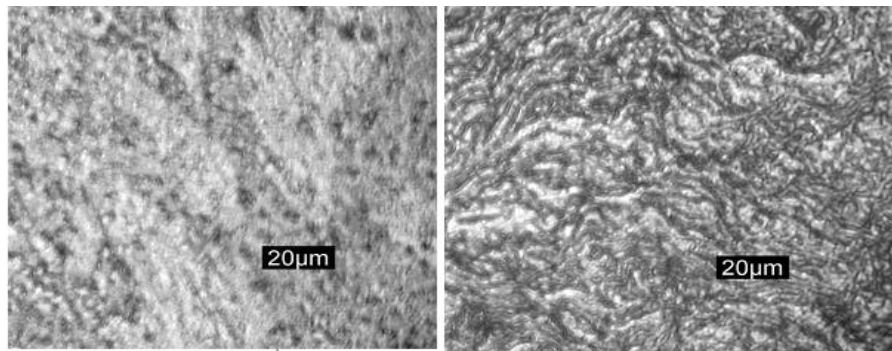


Figura 10: Microfotografía óptica de la muestra compuesta (izquierda) y la matriz de la muestra no reforzada (derecha).

Se puede apreciar un cambio de apariencia del composite con respecto a la matriz no reforzada. La tonalidad de la matriz no reforzada (derecha) es más intensa que en el composite (a la izquierda). La microfotografía de la izquierda muestra que la SCBAB se distribuye uniformemente en la matriz metálica y se logra una buena unión entre la matriz de aluminio y este refuerzo. Más notablemente, la SCBAB y el aluminio son prácticamente distribuidos uniformemente a lo largo de la muestra, es decir, las variaciones insignificantes de fracciones locales que se pueden apreciar, tal vez debido a la falta de homogeneidad de la preforma, se pueden evitar mediante una mezcla suficiente del polvo de aluminio y SCBAB.

#### **3.3.2. La dureza del compuesto Al-SCBAB y su matriz no reforzada**

Los resultados de la prueba de dureza Vickers, que se realizó por el método que le da nombre, aparecen en la Tabla 4.

Tabla 4: Dureza del compuesto Al-SCBAB y su matriz sin reforzar.

<b>Mediciones</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>Promedio</b>
<b>Matriz sin reforzar</b>	86,5	87,5	89,0	89,0	92,5	<b>88,9</b>
<b>Al-SCBAB</b>	92,3	93,5	93,5	93,9	96,5	<b>93,94</b>

Se puede apreciar que la dureza media aumenta de 88,9 HV para la matriz no reforzada a 93,94 HV para el AMC Al-SCBAB. Este incremento de la dureza está en el orden de lo reportado por otros investigadores (Moutsoutsou y col., 2009) para materiales compuestos de naturaleza similar.

A través de las pruebas estadísticas (Pair Simple t test, ANOVA y otros) se puede verificar que la dureza media del compuesto aumentó significativamente en comparación a la matriz sin reforzar. El software SPSS y Pair Simple t test se emplearon para el análisis estadístico. A medida que la hipótesis nula estableció que la diferencia entre la dureza media de la matriz no reforzada y la del AMC Al-SCBAB es igual o mayor que cero, y, como hipótesis alternativa de que esta diferencia es menor que cero, se obtuvo que para un nivel de confianza de 0,05 la diferencia entre las medias es significativa.

Los valores de dureza se incrementaron posiblemente debido a la presencia de fases cerámicas de la ceniza de bagazo (cristobalita y tridimita) y su interacción con la matriz dúctil. Como se explica por Aigbodion y compañeros (2010), referido por Lancaster, Lung y Sujan (2013), en cuanto al endurecimiento de los composites, la adición de partículas en la aleación matriz aumenta la energía de deformación en la periferia de las partículas en la matriz y estas tendencias pueden deberse a la formación de la dislocación en el límite de las partículas de cerámica por la diferencia en el coeficiente de termo-expansión entre la matriz y las partículas de cerámica.

Para AMCs que emplean diferentes residuos agroindustriales como materiales de refuerzo, se ha informado que la dureza aumenta hasta cierto límite, cuando aumentan las relaciones en peso de cenizas con un alto contenido de sílice (Usman y col., 2014; Jyothi y Kumar, 2015).

## **CONCLUSIONES**

---

1. La SCBA colectada directamente de la caldera del central “Luis Arcos Bergnes” y triturada, tienen forma irregular y distribución de tamaño variable. Presenta una granulometría fina, con diámetro de grano mayoritariamente entre 10 y 100  $\mu\text{m}$  y diámetro medio ( $D_{50}$ ) de 34,97  $\mu\text{m}$ .
2. La SCBAB está formada básicamente por sílice, en concentraciones de aproximadamente 80 %. La cristobalita y la tridimita son las principales fases cristalinas presentes en esta ceniza. La caracterización física de la SCBAB por XRD muestra también la presencia de silicatos de potasio y magnesio.
3. La ANC procedente del yacimiento de Miller en Villa Clara, puede clasificarse como una caolinita, en la que además se encuentran montmorillonita e illita. En tanto, por técnicas de XRD, SEM y microsonda en la ANC calcinada durante 4 h a una temperatura de 1 000 °C se pudieron caracterizar las fases cuarzo, magnesio-hornblenda, diopsidio, albita y moscovita.
4. Tanto la SCBAB como la ANCC al estar constituidos por fases del tipo cerámica, constituyen excelentes candidatos para ser empleados como materiales de refuerzo para compuestos de matriz metálica, en particular de matriz de aluminio.
5. Un nivel de 4 % en peso de SCBAB en AMCs actúa favorablemente como material de refuerzo de este tipo de composite. En particular, se produce un aumento significativo de la dureza de 88,9 HV para la matriz no reforzada a 93,94 HV para la matriz con la adición de esta ceniza.



## **RECOMENDACIONES**

---

1. Fabricar y caracterizar un composite de matriz de aluminio que emplee como material de refuerzo a la arcilla natural del yacimiento Miller calcinada durante 4 h a 1 000 °C.
2. Evaluar la resistencia al desgaste y otras propiedades mecánicas tanto del composite de matriz de aluminio que emplea como material de refuerzo al bagazo de caña de azúcar, como de su similar que emplee a la arcilla del yacimiento Miller calcinada durante 4 h a 1 000 °C.
3. Estudiar el comportamiento de las propiedades de ambos composites para diferentes niveles de peso del material de refuerzo con relación al peso total del compuesto.

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

1. AIGBODION V. S. y col., (2010), "Effect of Bagasse Ash Reinforcement on the Wear Behavior of Al-Cu-Mg/Bagasse Ash Particulate Composites", *Acta metallurgica Sinica*, Vol. 23, No. 2, pp. 81 - 89.
2. ALANEME, K. K. y ADEWUYI, E. O., (2013), "Mechanical behavior of Al-Mg-Si matrix composite reinforced with alumina and bamboo leaf ash", *Metall. Mater. Eng.*, Vol. 19, No. 3, pp. 177-187.
3. ALANEME, K. K. y ALUMABI, P.A., (2013), "Corrosion and wear behavior of rice husk ash—Alumina reinforced Al–Mg–Si alloy matrix hybrid composites", *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 2, No. 2, pp. 188–194.
4. ALONSO SUÁREZ, A., (1994), "Evaluación de la mojadura de partículas cerámicas por aluminio mediante el método de infiltración", Tesis doctoral. Universidad de Alicante, España.
5. ANAS, M. y ZAFARUDDIN KHAN, M., (2015), "Comparison of Hardness and Strength of Fly Ash and Bagasse Ash Al-MMCs", *IJSART*, Vol. 1, No. 7, pp. 88 - 93.
6. ANILKUMAR, H.C., HEBBAR, H.S. y RAVISHANKAR, K.S., (2011), "Mechanical properties of fly ash reinforced aluminium alloy (Al6061) Composites", *International Journal of Mechanical and Materials Engineering IJMME*, Vol. 6, No.1, pp. 41 - 45.
7. ARMBRUSTER, T., BURGI, H. B., KUNZ, M., GNOS, E., BRONNIMANN, S. y LIENERT, C., (1990), "Variation of displacement parameters in structure refinements of low albite", *Amer. Mineral.*, Vol. 75, pp. 135 - 140.
8. BELVER, C., BAÑARES, M. A. y VICENTE, M. A., (2004), "Materiales con propiedades tecnológicas obtenidos por modificación química de un caolín natural", *Bol. Soc. Esp. Cerámica y vidrio*, Vol. 43, No. 2, pp. 148 - 154.
9. BERMELLO, A., DÍAZ, D., MARTÍNEZ, R., QUINTANA, G., MIERES, G. y LEAL, J. A., (2008), "Estudio de un material compuesto de partículas de bagazo de caña y matriz de polietileno mediante espectrometría FTIR", ICIDCA, Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar, Vol. XLII, No. 1 - 3, pp. 106 - 111.
10. BHASKAR CHANDRA KANDPAL, JATINDER KUMAR y HARI SINGH, (2014), "Production Technologies of Metal Matrix Composite: A Review", *Journal of*

*International Research in Mechanical Engineering & Technology IJRMET*, Vol. 4, No. 2, pp. 27 - 32

11. BRAVO, N. P., “Utilización de adsorbentes para la eliminación de contaminantes en aguas y efluentes líquidos”, Tesinas de la Universidad de Belgrano, No. 86. <http://donessolares.awardspace.com/Holistica/Gemoterapia/Descripcion/diopsidio.htm>
12. BRINDLEY, G.M. y BROWN, G., *Cristal structures of clay minerals and their X-ray identifications*, Mineralogical Society, London, 495 p., (1980).
13. CHRISTY, T. V., MURUGAN, N. y KUMAR. S., (2010), “A Comparative Study on the Microstructures and Mechanical Properties of Al 6061 Alloy and the MMC Al 6061/TiB<sub>2</sub>/12P”, *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, Vol. 9, No. 1, pp. 57 - 65.
14. DASGUPTA, R., (2012), “Aluminium Alloy-Based Metal Matrix Composites: A Potential Material for Wear Resistant Applications”, *International Scholarly Research Network, ISRN Metallurgy*, Vol. 2012, 14 páginas.
15. DEER, W. A., ZUSSMAN, J. y HOWIE, R. A., *Rock-forming minerals*, Vol. 4A, *Framework silicates : feldspars*, 2nd ed., Geological Society, London, 972 p., (2001).
16. FAKIROV, S. (2015), “Composite material - is the use of proper definitions important?”, *Materials Todays*, Vol. 18, No.10, pp. 528 - 529.
17. FATILE, O.B., AKINRULI, J. I. y AMORI, A. A., (2014), “Microstructure and Mechanical Behaviour of Stir-Cast Al-Mg-Si Alloy Matrix Hybrid Composite Reinforced with Corn Cob Ash and Silicon Carbide”, *International Journal of Engineering and Technology Innovation*, Vol.4, No. 4, pp. 251-259.
18. FLINN, R. A. y TROJAN, P. K., “Engineering Materials and their Applications”, 4ta ed., Houghton Mifflin Company, Boston, 953 p., (1990).
19. FRÍAS, M., VILLAR-COCIÑA, E., (2007), “Influence of calcining temperature on the activation of sugar-cane bagasse: Kinetic parameters”, *Advances in Cement Research*, Vol. 19, No. 3, pp. 109 - 115.
20. FUENTES, R., MEJÍA, O., DE LA ROSA, M.G., CAUDILLO, B., GUZMÁN, J. J. y GALLEGA Y., (2008), “Evaluación de mezclas de arcillas de la región de Guanajuato”, *Acta Universitaria*, Universidad de Guanajuato, Vol.18, No. 3, México.

21. GAVIRIA, S., HERNÁNDEZ, O. y VARGAS, O., (2004), “Relación entre procesos de erosión y geoquímica de sedimentos y suelos de Checua, Cuenca Alta del Río Bogotá”, *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, Vol. 28, No. 109, pp. 497 - 508.
22. GRIFFEN, D.T. y PHILLIPS W. R., *Optical Mineralogy: The nonopaque minerals*, Ed. W.H. Freeman & Co. Ltd, 1er ed., 677 p., (1981).
23. HAQUE, S., KUMAR BHARTI, P. y HUSSAIN ANSARI, A., (2014), “Mechanical and Machining Properties Analysis of Al6061-Cu-Reinforced SiC<sub>p</sub> Metal Matrix Composite”, *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, No. 2, pp. 54 - 60.
24. HASHMI, T. Q., (2015), “Liquid State Methods of Producing Metal Matrix Composites: A Review Article”, *International Journal of Research in Mechanical Engineering & Technology (IJRMET)*, Vol. 5, No. 1, pp. 103 - 106.
25. HASSAN, M. A. y col., (2014), “Development of Aluminium Metal Matrix Composite Using Stir Casting Method”, *International Journal of Engineering and Science (IJES)*, Vol. 3, No. 8, pp. 36 - 39.
26. ITSKOS, G. y col., (2011), “Compaction of High-Ca Fly Ash-Al and Al-Alloys Composite: Evaluation of their Microstructural and Tribological performance”, *Coal Combustion and Gasification Products 3*, pp. 75 – 82.
27. JYOTHI P. N. y BHARATH KUMAR B. S., (2015), “Comparison of Mechanical Properties of Al-5%Si Alloy Reinforced with Cow dung ash and Rice husk ash”, *International Journal of Latest Research in Engineering and Technology IJLRET*, Vol. 1, No. 4, pp. 55 - 58.
28. KAMAT, S. V., HIRTH J. P. y MEHRABIAN, R. (1989), “Mechanical properties of particulate-reinforced aluminum-matrix composite”, *Acta Metall.*, Vol. 37, No. 9, pp. 2395 - 2402.
29. KANDPAL, B.C., KUMAR, J. y SINGH, H. (2014), “Production Technologies of Metal Matrix Composite: A Review”, *Journal of International Research in Mechanical Engineering & Technology IJRMET*, Vol. 4, 27 páginas.
30. KAYODE ALIYU, I. y col., (2015), “Microstructure and Properties of Spark Plasma Sintered Aluminum Containing 1wt. % SiC Nanoparticles”, *Metals 2015*, No. 5, pp. 70-83.

31. KRIVIJ, N., ALFONZO-TRUJILLO, E., GARCÍA-SÁNCHEZ, L. L., VILLALONGA, J. A., FORMOSO-PREGO, A., ALGUACIL, F. J. y CORES-SÁNCHEZ, A., (2003), “Obtención y caracterización de materiales compuestos W-Cu para contactos eléctricos”, *Rev. Metal. Madrid* **39**, pp. 289 - 297.
32. KUMAR SURAGIMATH, P. y PUROHIT, G. K., (2013), “A Study on Mechanical Properties of Aluminium Alloy (LM6) Reinforced with SiC and Fly Ash”, *Journal of Mechanical and Civil Engineering IOSR-JMCE*, Vol. 8, No. 5, pp. 13 -18.
33. LAN, T. y PINNAVAIA, T. J., (1994), “Clay-Reinforced Epoxy Nanocomposites”, *Chem. Mater*, Vol. 1994, No. 6, pp. 2216-2219.
34. LANCASTER, L.M., LUNG, H. y SUJAN D., (2013), “Utilization of Agro-Industrial Waste in Metal Matrix Composites: Towards Sustainability”, *International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering*, Vol.7, No.1, pp. 35 - 43.
35. LLOYD, D. J., (1994), “Particle reinforced aluminium and magnesium matrix composites”, *Int. Mat. Reviews*, Vol. 39, No. 1, pp. 1- 23.
36. MARTÍNEZ MATEOS, N., BUSQUETS MATAIX, D., SALVADOR MOYA, M.D. y AMIGÓ BORRÁS, V., (2002), “Propiedades mecánicas de compuestos de matriz de aluminio reforzados con partículas cerámicas, obtenidos por extrusión de polvos”, VIII Congreso Nacional de Propiedades Mecánicas de Sólidos, Gandia, pp. 215 - 224.
37. MARUYAMA, B., (1998), “Progress and promise in aluminium metal matrix composites”, *NewsLett AMPTIAC*, Vol. 2, No. 3, pp. 132 -140.
38. MARUYAMA, B. y HUNT. W.H., (1999), “Discontinuously Reinforced Aluminum - Current Status and Future-Direction”, *JOM*, Vol. 51, No. 11, pp. 59-61.
39. MIRACLE, D. B., (2005), “Metal matrix composites – From science to technological significance”, *Composites Science and Technology*, Vol. 65, No. 15 - 16, pp. 2526 - 2540.
40. MORALES, E. V. et al., (2009), “Effects of calcining conditions on the microstructure of sugar cane waste ashes (SCWA): influence in the pozzolanic activation”, *Cement and Concrete Composites ELSEVIER*, Vol. 31, No 1, pp. 22 - 28.
41. MORRAL, FR., JIMENO, E. y MOLERA, E., Metalurgia general, Tomo 2, 1era ed., Reverté, 764 p., (1985).

42. MOUTSAUTSOU, A. y col., (2009), "Synthesis of Aluminum – Based Metal Matrix Composite (MMCs) with Lignite Fly Ash as reinforcement materials", World of Coal Ash (WOCA) Conference, Lexington, KY, USA, 13 páginas.
43. MURTHY, I.N., y col., (2014), "Comparative Studies on Microstructure and Mechanical Properties of Granulated Blast Furnace Slag and Fly Ash Reinforced AA 2024 Composites", *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, Vol. 2014, No. 2, pp. 319-333.
44. PCC, Lineamientos de la política económica y social del partido y la revolución, <http://www.cubadebate.cu/noticias/2011/05/09/descargue-en-cubadebate-los-lineamientos-de-la-politica-economica-y-social-pdf/#.WUREMrSRTIV>
45. RAMU, G. y RANJIT BAURI, (2009), "Effect of equal channel angular pressing (ECAP) on microstructure and properties of Al – SiCp composites", *Materials & Design, Elsevier*, Vol. 30, No. 9, pp. 3554 - 3559.
46. RANA, R. S., PUROHIT, R. y DAS, S., (2012), "Review of recent Studies in Al matrix composites", *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Vol. 3, No. 6, pp. 1-16.
47. SARAVANAN, S. D. y SENTHILKUMAR, M., (2014), "Mechanical Behavior of Aluminum (AlSi10Mg)-RHA Composite", *International Journal of Engineering and Technology, IJET*, Vol. 5, No. 6, pp. 4834 - 4840.
48. SARAVANAN, SUBRAMANIAN, K., SIVAKUMAR, D. B., SATHYANANDHAN, M. y SANKARA NARAYANAN, R., (2015), "Fabrication of aluminium metal matrix composite – a review", *Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences JCHPS Special*, National Conference On Recent Trends and Developments in Sustainable Green Technologies, 82 páginas.
49. SHARANABASAPPA, R. P. y MOTGI, B.S. (2013), "A Study on Mechanical Properties of Fly Ash and Alumina Reinforced Aluminium Alloy (LM25) Composites", *Journal of Mechanical and Civil Engineering IOSR*, Vol. 7, No.6, pp. 41 - 46.
50. SRIDHAR RAJA, K.S. y col., (2015), "Effect of Steel Slag on the Impact Strength of Aluminium Metal Matrix Composite", *Applied Mechanics and Materials*, Vols. 766-767, pp. 240-245.

51. SUBRAHMANYAM, A. P. S. V. R., NARSARAJU, G. y RAO, B. S., (2015), "Effect of Rice Husk ash and Fly ash Reinforcements on Microstructure and Mechanical properties of Aluminium alloy (AlSi10Mg) Matrix Composites", *International Journal of Advanced Science and Technology*, Vol. 76, pp. 1-8.
52. SURAPPA, M. K., (2003), "Aluminium metal matrix composites: challenges and opportunities", *Sadhana*, Vol. 28, No.1 - 2, pp. 319 - 334.
53. TABISH, Q. H., (2009), "Liquid State Methods of Producing Metal Matrix Composites: A Review Article", *International Journal of Research in Mechanical Engineering & Technology IJRME*, Vol. 5, pp. 103-110.
54. TRIPATHY, S. (2009), "Studies on Aluminum–Fly-Ash Composite Produced by Impeller Mixing", National Institute of Technology, Rourkela (Deemed University). Tesis en opción al grado de Master of Technology in Metallurgical & Materials Engineering.
55. USMAN, A. M. y col., (2014), "Production and Characterization of Aluminium Alloy - Bagasse Ash Composites", *Journal of Mechanical and Civil Engineering IOSR-JMCE*, Vol. 11, No. 4, pp. 38 - 44.
56. VARGAS, Y. M., GÓMEZ, V., VÁZQUEZ, E., GARCÍA, A., AGUILAR, G., MURRIETA, H. y SALMÓN, H., (2008), "Caracterización espectroscópica, química y morfológica y propiedades superficiales de una montmorillonita mexicana", *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, Vol. 25, No.1, p. 135 - 144.
57. VELDE, B., Introduction to Clay Minerals, chemistry, origins, uses and environmental significance, Chapman & Hall., 198 p., (1992).
58. VELIČKOVIĆ, S. y col., (2016), "Tribological properties of aluminium matrix nano composites", *Applied Engineering Letters*, Vol. 1, No. 3, pp. 72-79.
59. VERANES-PANTOJA, Y. y col. (2005), "Determinación de la profundidad de curado y propiedades mecánicas de composites dentales fotopolimerizables experimentales", *RCOE*, Vol. 2, No. 10, pp. 151 - 170.
60. VILLAR-COCIÑA, E. y FRÍAS, M., (2008), "Sugar cane wastes as pozzolanic materials: application of mathematical model", *Materials Journal ACI*, Vol. 105, No. 3, pp. 258 - 264.

61. VILLAR-COCIÑA, E., FRÍAS, M., HERNÁNDEZ-RUIZ, J. y SAVASTANO JR. H, (2013), “Pozzolanic behaviour of a bagasse ash from the boiler of a Cuban sugar factory”, *Advances in Cement Research*, Vol. 25, No. 3, pp. 136-142.
62. WADE, A. y MATTOX, R. B., “Elementos de cristalografía y mineralogía”, Ed. Omega, traducción de la 2ª ed, Barcelona, pp. 325 – 348, (1976).
63. WŁODARCZYK-FLIGIER, A., DOBRZAŃSKI, L.A., KREMZER, M. y ADAMIAK, M., (2008), “Manufacturing of aluminium matrix composite materials reinforced by Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles”, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Vol. 27, No. 1, pp. 99 - 102.
64. ZOLTÁN KÁROLY, CSABA BALÁZSI, KATALIN BALÁZSI, ATTILA PETRIK, JÁNOS LÁBÁR, y AYAJ DHAR, (2014), “Hybrid aluminum matrix composites prepared by spark plasma sintering (SPS)”, *Eur. Chem. Bull.*, Vol.3, No. 3, pp. 247 – 250.
65. ZUHAILAWATI, H.; SAMAYAMUTTHIRIAN, P. y MOHD HAIZU, C. H., (2007), “Fabrication of Low Cost Aluminium Matrix Composite Reinforced With Silica Sand”, *Journal of Physical Sciences*, Vol. 18, No. 1, pp. 47 - 55.
66. ZUHAILAWATI y col., (2016), “Mechanical Properties of Friction Stir Processed 1100 Aluminum Reinforced with Rice Husk Ash Silica at Different Rotational Speeds”, *International Journal of Metallurgical & Materials Engineering*, Vol. 2, No. 120, 6 páginas.