

## COMPOFORJADO DE MATERIALES COMPUESTOS BASE Al-Si, REFORZADOS CON $\beta$ -SiC

### Compoforming of Al-Si/ $\beta$ -SiC composite materials

#### RESUMEN

Se reporta la caracterización morfológica preliminar de un composite metálico base Al-Si, reforzado con  $\beta$ -SiC y consolidado por Compoformado. Esta tecnología es un híbrido entre los procesos de fundición para composites metálicos particulados (CMRPs) y la forja semi-sólida. Las propiedades comunes a dichos materiales, se alcanzan gracias a la microestructura globular, debido a la agitación previa de la colada en estado semisólido, con una perfecta distribución de las partículas de refuerzo. Posteriormente, es posible alcanzar una mínima defectología (i.e. porosidades), mediante la aplicación de presiones de hasta 60MPa.

**PALABRAS CLAVES:** Agitación mecánica, compoformado, metalurgia semi-sólida, SiC

#### ABSTRACT

*Preliminary morphological characterization of a base Al-Si metal matrix composite, reinforced with  $\beta$ -SiC and manufactured by Compoforming is reported. This technology is a hybrid between the foundry process for particulate metal matrix composites (CMRPs) and the semisolid die-casting. The common properties of these materials are reached because the globular microstructure during the semisolid stirring, with a perfect distribution of the reinforced particles. Then, it is possible to have minimal defects (porosity) during the application of pressures of 60MPa approx.*

**KEYWORDS:** Compoforming, mechanical stirring, semi-solid metallurgy, SiC

#### 1. INTRODUCCIÓN

Actualmente las nuevas tecnologías de fundición para composites metálicos reforzados con partículas (CMRPs), están ganando reconocimiento gracias a que permiten generar piezas con buenas propiedades mecánicas. Entre las técnicas más reconocidas sobresale inicialmente el Stircasting, el cual puede ser catalogado como un proceso primario para la producción de materiales compuestos de matriz metálica, donde el refuerzo es incorporado mientras la aleación matriz se encuentra en estado líquido [1]. La dispersión del refuerzo se realiza por acción de la convección sobre el fundido, generada por una agitación mecánica [2]. Adicionalmente, ésta técnica es la que permite alcanzar las mayores fracciones en volumen de refuerzo [3].

Por otro lado, aquellas técnicas de fundición en las cuales la matriz se encuentra en estado semi-sólido, son de particular interés para la producción de CMRPs, ya que asocian un cierto ahorro energético, además de favorecer igualmente la dispersión del reforzante. Entre ellas, la más reconocida es el Thixocasting, asociada a la familia de procesos secundarios para la obtención de formas netas [4, 5]. En este conjunto de procesos, las técnicas

primarias son reconocidas con el término de Rheocasting. Entre ellas, la producción de aleaciones en estado semisólido mediante agitación mecánica ha sido bastante popular [6, 7].

Similar al Rheocasting, la técnica de fundición por excelencia para CMRPs, es el denominado Compocasting, considerado además como una técnica sencilla para el desarrollo de estos materiales. La misma consiste en la fundición semi-sólida de la matriz, donde paralelamente se realiza la agitación y la mezcla con el material de refuerzo, buscando no sólo una transformación microestructural, sino además la dispersión homogénea del refuerzo. Ésta técnica es realmente una variante del proceso de Stircasting, ya que en el compocasting el metal no se encuentra totalmente fundido [8]. Posteriormente se realiza un vaciado en un molde para la obtención de lingotes [9].

Para la producción de piezas de forma neta a partir de pastas de CMRPs, se pueden utilizar variaciones de la técnica de Squeeze-Casting (SC); un proceso donde se induce la infiltración a presión de la aleación en una preforma (refuerzo) [10, 11]. Adicionalmente, el SC posee un alto potencial para la creación de elementos

#### MARCO VALENCIA

Ingeniero Metalúrgico. M. Sc.  
Profesor Asociado  
Grupo de Productividad hacia la Competitividad (GPC)  
Escuela de Ingeniería de Antioquia  
[pfmaval@eia.edu.co](mailto:pfmaval@eia.edu.co)

#### ALEJANDRO MORALES\*

Ingeniero Mecánico  
Profesor Auxiliar  
[alejandro.morales@upb.edu.co](mailto:alejandro.morales@upb.edu.co)

#### VLADIMIR MARTÍNEZ\*

Ingeniero Mecánico, M.Sc. Ph.D.  
[hader.martinez@upb.edu.co](mailto:hader.martinez@upb.edu.co)

\*Grupo de Investigación Sobre Nuevos Materiales (GINUMA)  
Universidad Pontificia Bolivariana  
A.A. 56006. Medellín. Colombia

libres de defectos, no requiere de mazarotas y demás elementos para la compensación de contracción, canales de alimentación, bebederos y otros, que promueven desperdicios durante la fundición tradicional de metales [12]. Una posible variación del SC es reportada en este trabajo, la misma denominada como Compoforjado, puede entenderse como un híbrido entre el Compocasting y la forja semi-sólida para pastas de CMRPs.

## 2. EXPERIMENTACION

El método de producción de CMRPs por Compoforjado es detallado en la Figura 1.

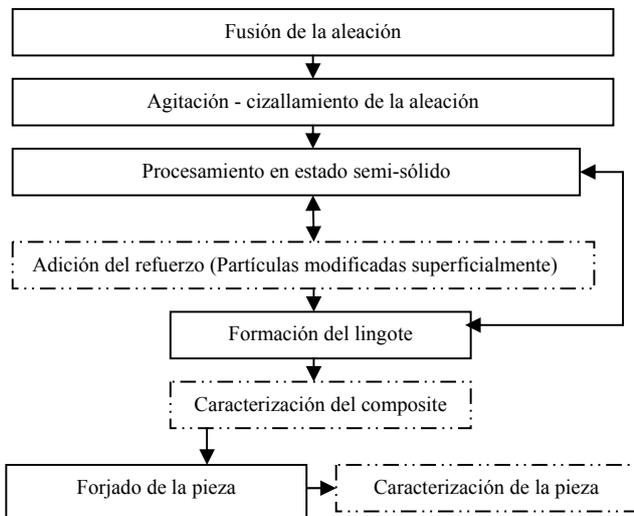


Figura. 1. Ruta para el Compoforjado de CMRPs

### 2.1 Tratamiento de la aleación matriz

En este trabajo se ha realizado el compoforjado de un composite Al-Si7-Mg0.3/ $\beta$ -SiCp/15wt. La fusión de la aleación tiene lugar a una temperatura de 617 °C, según la curva de enfriamiento (Figura 2). Comúnmente para las fundiciones de Al puede ser necesaria una desgasificación, en este caso sin embargo, el proceso completo es realizado en una atmósfera de Ar. La inmersión del agitador y la agitación sostenida toman lugar una vez se ha fundido la aleación.

La morfología de la aleación así preparada y luego de solidificar, consistirá de granos aproximadamente globulares. Dicha morfología resulta similar a la que puede obtenerse en operaciones de Thixocasting, caso en el que es posible obtener un comportamiento reológico particular en el estado semi-sólido de la aleación (i.e. mayor fluidez, menor viscosidad y un flujo laminar). En las operaciones posteriores, la morfología globular puede además aportar mejores características reológicas de cara

a la convección que tiene lugar durante la etapa de agitación mecánica.

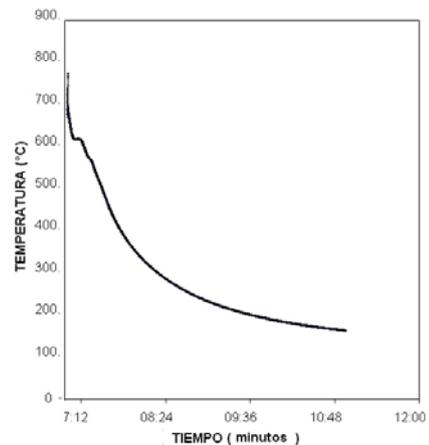


Figura 2. Curva de enfriamiento de la aleación-matriz

### 2.2 Mezclado con el material de refuerzo

El sistema de agitación empleado en este estudio consiste de un crisol en forma de cilindro recto y de un agitador de doble paleta, precalentado a 590 °C, recubierto con pintura de zirconia, así como el crisol para reducir al mínimo la disolución de la lámina en el metal fundido. Con el fin de aumentar la eficiencia en el cizallamiento del material e impedir la formación de un vórtice externo, en la parte superior del agitador, las paletas fueron dispuestas a 45°. De este modo, es posible evitar el atrapamiento de gases y promover la posterior dispersión de partículas. Este mecanismo es optimizado en la parte inferior con un conjunto de paletas a 90°, con lo cual se busca además evitar la sedimentación de partículas en el fondo del crisol.

Posteriormente, la temperatura del sistema es disminuida hasta 593°C. A este valor, según la curva de la Figura 2, se garantiza la formación de fases sólidas en un máximo de 40%-wt. Esta fracción ha sido además reportada en trabajos similares [13]. La agitación es realizada a 600 RPM. y luego de adicionar las partículas de refuerzo, la misma es mantenida por un periodo de 10min. Balasivanandha y colaboradores [14] también han reportado tiempos similares para la producción de CMRPs mediante agitación mecánica.

### 2.3 Forja semi-sólida

Una vez sintetizado el composite, se procedió con la forja y obtención de piezas de forma neta. Las variables generales de proceso son listadas en la Tabla 1. Los detalles de la puesta a punto y operación automática del

equipo de proceso han sido reportados en un trabajo paralelo [15].

Variable	Valor	Unidades
Temperatura de compocasting	593	°C
Tiempo de agitación	10	min
Velocidad de agitación	600	rpm
Atmósfera del proceso (Ar)	0.5	Lt. min <sup>-1</sup>
% reforzante	15	%-wt
Tamaño de partículas	38	µm
Presión Compoforjado	60	MPa
Tiempo de mantenimiento de la presión	12	s
Temperatura de moldes	180-220	°C

Tabla 1. Variables generales para el Compoforado del composite Al-Si7-Mg0.3/ $\beta$ -SiCp/15<sub>wr</sub>

Finalmente, fue realizado un tratamiento térmico a las piezas, consistente en un tratamiento en solución a 548°C durante 8 horas y con enfriamiento en agua a temperatura ambiente; luego se procedió con un envejecimiento artificial (T6) a 170°C durante 6 horas con enfriamiento en aire. La Figura 3 es una imagen de la pieza compoforada.



Figura 3. Pieza compoforada

## 2.4 Modificación superficial del $\beta$ -SiC

Antes de proceder con la explicación de los resultados relativos al Compoforado del composite Al-Si7-Mg0.3/ $\beta$ -SiCp/15<sub>wr</sub>, conviene aclarar que el éxito de una técnica de proceso semejante, depende fundamentalmente de la habilidad para superar el obstáculo físico-químico que plantea la escasa mojabilidad de sólidos cerámicos por parte de metales líquidos [16]. En tal sentido, puede argumentarse que se logra una mayor mojabilidad cuando se manifiesta una disminución del ángulo de contacto ( $\theta$ ) ilustrado en la ecuación (1) en la que  $\sigma$  es la tensión superficial.

$$\cos \theta = (\sigma_{SiC} - \sigma_{SiC/Al}) / \sigma_{Al} \quad (1)$$

Para el caso que fue de interés en este trabajo, la mojabilidad del SiC por parte del aluminio es bastante escasa por no decir mínima. Esta circunstancia no permite garantizar la formación de una interfase suficientemente fuerte y calificada para la transferencia de carga desde la matriz al material reforzante, sin rotura alguna [17]. Existen recursos útiles para la mejora de la

mojabilidad, como el uso de elementos reactivos que pueden mejorar la adhesión en un determinado sistema metal-cerámico i.e. Li, Cu, Mg o Si, [18]. También es posible recurrir a la modificación superficial del reforzante, utilizando recubrimientos metálicos para generar una interfase metal-metal y por lo tanto, una mayor compatibilidad.

Para la promoción de adherencia en el sistema Al/SiC, investigaciones previas han demostrado que el uso de recubrimientos base Ni o Cu, es de utilidad para aumentar la mojabilidad, resultando en un incremento de la resistencia del composite, su tenacidad y una mejorada dispersión del reforzante dentro del metal fundido [19-20]. Así las cosas, en esta investigación se trabajó en la modificación superficial de las partículas de  $\beta$ -SiC vía recubrimientos base Cu, tal como se menciona a continuación. Para más detalle puede consultarse en un trabajo paralelo [21].

## 2.5 Recubrimiento con Cu

En una primera etapa se ha intentado absorber SnCl<sub>2</sub> en la superficie del  $\beta$ -SiC mediante un baño de sensibilización. Una vez en el baño, las partículas son agitadas durante 25 ó 30min. Luego se filtra la solución y se lava el  $\beta$ -SiC con agua destilada. En segundo lugar, se pasa a un baño de PdCl<sub>2</sub> o de activación, procediendo igual que en el caso de la sensibilización para el filtrado y lavado del  $\beta$ -SiC.

En la penúltima etapa del proceso de recubrimiento se ha preparado una solución de CuSO<sub>4</sub>.5H<sub>2</sub>O y Potasio Sodio Tartrato. Intentando mantener el pH en un valor máximo de 12.0 [22], se procede a la adición de partículas y a la agitación sostenida.

Posteriormente se adiciona formaldehído (H-CHO), agitando continuamente hasta observar que la solución se torna transparente, lo cual indica que el cobre metálico se ha depositado sobre la superficie de las partículas. Después de esta operación, se procede a filtrar como en los casos anteriores y se traslada el producto para un secado en vacío a 80°C, con el fin de evitar su oxidación.

## 3. RESULTADOS Y CARACTERIZACIÓN

### 3.1 Morfología del $\beta$ -SiC modificado

La Figura 4a es una imagen SEM de partículas de  $\beta$ -SiC luego del baño de sensibilización. La Figura 4b, corresponde al análisis cualitativo, el cual muestra la presencia de Sn producto del SnCl<sub>2</sub> usado como catalizador. En la Figura 5a, se observan las partículas modificadas con Cu. A partir del análisis de campo por EDS (Figura 5b), se observa la presencia de Sn y Pd, el

primero producto del baño previo de sensibilización y el segundo del baño de activación. También se observa la presencia de Cu como consecuencia del baño de recubrimiento.

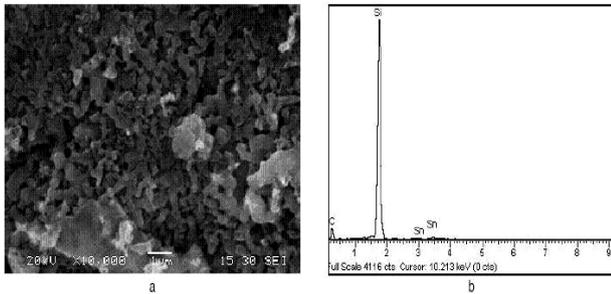


Figura 4. Partículas de  $\beta$ -SiC sin Cu: (a) Imagen SEM, (b) EDS de campo

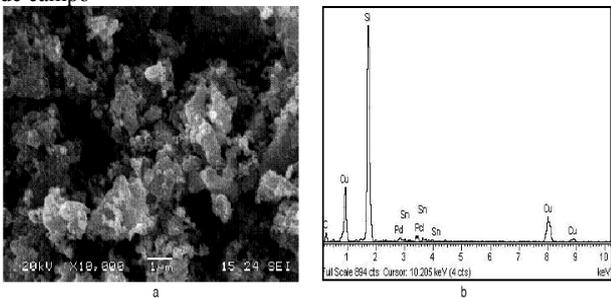


Figura 5. Partículas de  $\beta$ -SiC modificadas: (a) Imagen SEM, (b) EDS de campo

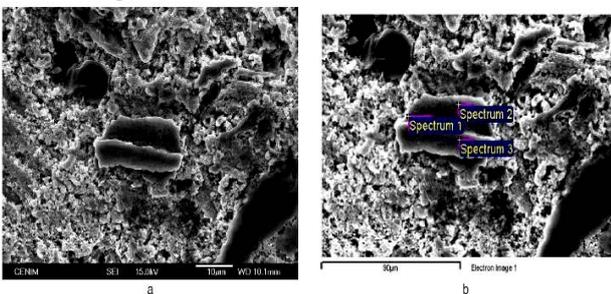


Figura 6. Partículas de  $\beta$ -SiC modificadas: (a) Imagen SEM, (b) EDS puntual

Elemento	% (wt)	% (at.)
C	4.83	16.05
O	12.04	30.00
Si	2.67	3.79
Cu	79.27	49.75
Sn	1.19	0.40
Total	100.00	

Tabla 2. Composición química de los puntos señalados en la Figura 7b (%wt)

La Figura 6a es igualmente una imagen de partículas modificadas. A partir del análisis puntual por EDS en tres zonas diferentes (Figura 6b), se halla una composición química rica en C, Si, Sn y Cu, este último con

contenidos promedios de 79.27%wt (Tabla 2). De acuerdo a la composición química, es posible argumentar que el tratamiento de modificación es efectivo.

### 3.2 Morfología del composite

La Figura 7 corresponde al composite Al-Si7-Mg0.3/ $\beta$ -SiCp/15<sub>wt</sub> tratado térmicamente. Por otro lado, en el composite se resalta la presencia de las partículas de  $\beta$ -SiC en la fase eutéctica, que, siendo la última en solidificar, alberga el refuerzo sólido durante el curso del proceso.

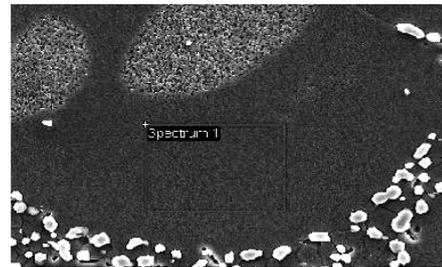


Figura 7. Composite Al-Si7-Mg0.3/ $\beta$ -SiCp/15<sub>wt</sub> con T.T

### 3.3 Comportamiento mecánico

En la Tabla 3 se listan las propiedades mecánicas de los materiales procesados por Compoforjado. Claramente se evidencia un aumento en la resistencia mecánica y una reducción del porcentaje de elongación, como producto de una mayor rigidez por parte del composite en relación a la aleación fundida.

Propiedad	Al-Si7-Mg0.3	Al-Si7-Mg0.3-T6/ $\beta$ SiC
Esfuerzo último MPa	220	300
Esfuerzo de cedencia MPa	180	265
% de elongación	18	10
Dureza HB	90	110

Tabla 3. Propiedades mecánicas de la aleación y del composite con tratamiento térmico

## 4. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES

Un composite metálico Al-Si7-Mg0.3-T6/ $\beta$ -SiC/15wt, ha sido procesado por Compoforjado. Para este material se ha conseguido además aumentar su resistencia gracias al fenómeno de solidificación bajo presión que tiene lugar en este proceso novedoso, además del uso de tratamientos térmicos. En tal sentido, la precipitación de compuestos intermetálicos, sumada al efecto de las pequeñas partículas cerámicas de  $\beta$ -SiC, contribuye a generar mayores barreras para el flujo de dislocaciones. Este mecanismo de reforzamiento dependerá sin embargo

del espaciamiento entre partículas, así como de una correcta distribución en la matriz.

De otra parte, la combinación directa de fundir y formar una pieza en un solo proceso, tal como el que aquí se menciona, permite reducir etapas en producción, así como consumos de tiempo y de energía.

## 5. REFERENCIAS

- [1] D. J. B. D. Brabazon, A. J. Carr, "Mechanical stir casting of aluminium alloys from the mushy state: process, microstructure and mechanical properties", *Materials Science and Engineering*, A326, pp 370–381, 2002.
- [2] Xu and et al, "Thermal conductivity of SiC fine particles reinforced Al alloy matrix composite with dispersed particle size", *Journal of applied physics*, 95, pp 722-726, 2004.
- [3] D. B. S. Naher., L. Looney, "Simulation of the stir casting process", *Journal of Materials Processing Technology*, 143–144 pp 567–571, 2003.
- [4] B. Molinas, "Tecnologías innovativas para la fundición de aleaciones no ferrosas", *jornadas sam/ conamet/ simposio materia*, 2003.
- [5] M. L. Yalin Lu, W. Huang and H Jiang, "Deformation behavior and microstructural evolution during the semi-solid compression of Al-4Cu-Mg alloy", *Materials Characterization* 54, pp 423-430, 2005.
- [6] B. N. P. Falak, "Rheocasting of an Al-Si alloy", *Scripta Materialia*, 53, pp 53–57, 2005.
- [7] T. Basner, "Rheocasting of Semi-Solid A357 Aluminum", *sae technical paper series*, 2000.
- [8] K.O. Umit Cocen, "The production of Al-Si alloy-SiCp composites via compocasting: some microstructural aspects", *Materials Science and Engineering*, 221, pp 187-191, 1996.
- [9] G. R. P. A.M. Gokhale, "Analysis of variability in tensile ductility of a semi-solid metal cast A356 Al-alloy", *Materials Science and Engineering A*, 392, pp 184–190, 2005.
- [10] J. Prohaszka, "Some of the technologies, which can improve the properties of anisotropic materials", *Journal of Materials Processing Technology*, 161, pp 181–185, 2005.
- [11] N. Altinkok, "Microstructure and Tensile Strength Properties of Aluminium Alloys Composites Produced by Pressure-assisted Aluminium Infiltration of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiC Preforms", *Journal of composite materials*, 38, pp 1533-1543, 2004.
- [12] P. A. K. J. X. Dong, G. Durrant and B. Cantor, "The Effect of Sr and Fe Additions on the Microstructure and Mechanical Properties of a Direct Squeeze Cast Al-7Si-0.3Mg Alloy", *Metallurgical and materials transactions A*, 30, pp 1341-1356, 1999.
- [13] J. Coletto, "Fabricación y caracterización de un material compuesto base aluminio reforzado con fibras cortas de carbono por las técnicas de mezcla en estado líquido/semisólido y forja líquida sobre preformas porosas", *Ph.D. tesis, Universidad Complutense de Madrid*, Madrid, 2000.
- [14] L. K. S. Balasivanandha, S. Kathiresan and B. Mohan, "Influence of stirring speed and stirring time on distribution of particles in cast metal matrix composite", *Journal of Materials Processing Technology*, 171, pp 268–273, 2006.
- [15] A. Morales, S. Sánchez, M. F. Valencia, C. Zuluaga, J. Cruz y H. V. Martínez. "Diseño y puesta a punto de una nueva tecnología de fundición semi-sólida para composites metálicos en Colombia", *IV Congreso Internacional de Materiales*. Grupo de Investigación en Materiales Avanzados (GIMAV). Universidad Tecnológica de Pereira (UTP). Facultad de Ingeniería Mecánica. Pereira-Colombia. 2007. A ser publicado en: Scientia et Technica.
- [16] N. Eustathopoulos, M. G. Nicholas and B. Drevet, "Wettability at high temperatures", *Pergamon Materials Series* 3, 1999, 419p.
- [17] S.Y. OH and et al, "Wetting of ceramics particulates with liquid aluminum alloys: part II. Study of wettability", *Metallurgical transactions*, 20A, pp 533-541, 1989.
- [18] G. Wang and J.J. Lannutti, "Static wetting of a liquid drop on a solid", *Journal of Materials Science*, 30, pp 3171-3176, 1995.
- [19] C. A. Leon and R. A. L. Drew, *J. Mater. Sci.* 35 (2000) 4763.
- [20] W. S. Chung, and. Chang and S. J. Lin, *Plat. Surf. Finish.* 83 (1996) 68.
- [21] M. Arroyave, M. F. Valencia, J. Cruz y H. V. Martínez, "Síntesis de composites Cu/ $\beta$ -SiC, mediante Electroless Plating", *IV Congreso Internacional de Materiales*. Grupo de Investigación en Materiales Avanzados (GIMAV). Universidad Tecnológica de Pereira (UTP). Facultad de Ingeniería Mecánica. Pereira-Colombia. 2007. A ser publicado en: Scientia et Technica.
- [22] R. Sharma, R.C. Agarwala and V. Agarwala, "Development of copper coatings on ceramic powder by electroless technique", *Applied Surface Science*, 2006 (en prensa).

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Colciencias el financiamiento del proyecto No. 12100817302, del cual hizo parte este trabajo. Igualmente a la Universidad Pontificia Bolivariana por el financiamiento de los proyectos: 882-05/06-S21 y 802-11/05-S21.