

## DISEÑO Y PUESTA A PUNTO DE UNA NUEVA TECNOLOGIA DE FUNDICION SEMI-SÓLIDA PARA COMPOSITES METALICOS EN COLOMBIA

### Design and implementation of a new semi-solid casting technology for metal matrix composites production in Colombia

#### RESUMEN

Se reporta el diseño de un equipo automático para la fundición de partes a partir de composites metálicos. La técnica que ha sido desarrollada, se fundamenta en la combinación del Compocasting para la producción de composites metálicos reforzados con partículas y el Tixoforado. Este último para la fundición bajo presión.

El equipo permite la manipulación de las variables de proceso mediante una interfaz que opera las señales en tiempo real.

Finalmente, para asegurar la calidad de las piezas fundidas y la mejor geometría de los moldes, se han implementado simulaciones del proceso mediante Flow-3D.

**PALABRAS CLAVES:** Compoforjado, nuevos materiales, nuevos procesos, Simulación

#### ABSTRACT

*The design of an automatic device for the production of metal matrix composites is reported. The casting technique is the combination of compocasting and thixocasting. This last one for the die-casting process.*

*The device allows manipulation of the process variables through the instrumentation and design of software which handles the signals in real time.*

*Finally, to assure the quality of the cast parts and the best mold geometry, simulations in Flow-3D have been performed.*

**KEYWORDS:** *Compoforging, new materials, new process, simulation*

### 1. INTRODUCCIÓN

Hace un poco más de 30 años que se originó la metalurgia semi-sólida o el procesamiento en estado semi-sólido de aleaciones, SSP (SSP: Semi-solid processing of alloys, o SSM: Semi-solid metallurgy), el cual se entiende al nivel de un conjunto de procesos, que para una aleación parcialmente solidificada, combinan las ventajas de los métodos tradicionales de forja y fundición. En dichos procesos, como consecuencia del estado semi-sólido, a nivel macroscópico se presentan condiciones de flujo laminar, mejorando con ello ciertas propiedades de cara al uso y aplicación posterior de diferentes técnicas de fundición tradicional. Mucho más antiguo que el SSP, el desarrollo de los Composites de Matriz Metálica (CMMs) se ha visto favorecido desde la metalurgia semi-sólida, con la posibilidad de fabricar

materiales compuestos, reforzados principalmente con partículas, de suerte que hoy día estos materiales ubican sus aplicaciones en el conjunto de elementos de medianas prestaciones y de alto volumen de mercado.

En la última década, los sectores que más se han favorecido del uso de composites metálicos han sido el automotriz y el electrónico. El primero, motivado por la necesidad de materiales de alta resistencia y bajo peso, ha encontrado su protagonista en las aleaciones de Aluminio y Magnesio, las cuales poseen un elevado índice de resistencia peso [1-3].

La consolidación de un metal reforzado requiere de un correcto control de los parámetros de proceso [4], la implementación de procesos no es por lo tanto una tarea sencilla. De esta manera, la metodología consistió en el

#### ALEJANDRO MORALES\*

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

#### SAMUEL SANCHEZ

Estudiante de Ingeniería  
Electrónica  
Universidad Pontificia Bolivariana  
[samusan83@yahoo.com](mailto:samusan83@yahoo.com)

#### MARCO FIDEL VALENCIA

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

#### CARLOS ZULUAGA

Ingeniero Electrónico, M. Sc.  
Docente-Investigador  
Universidad Pontificia Bolivariana  
[caz@upb.edu.co](mailto:caz@upb.edu.co)

#### LUIS JAVIER CRUZ RIAÑO\*

Ingeniero Mecánico, Ph.D.  
[luis.cruz@upb.edu.co](mailto:luis.cruz@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

diseño, construcción y puestas a punto de un equipo, capaz de procesar tanto materiales en estado semi-sólido, como partes a partir de composites metálicos de tipo particulado. La selección de componentes fue realizada mediante una profunda revisión de la literatura científica y una posterior adecuación a las condiciones experimentales.

Al no existir información concreta y disponible sobre equipos semejantes, ya que cada investigador reporta un sistema diferente, sin que ninguno llegue a ser completamente ideal, este trabajo es además un resumen de las condiciones tecnológicas que debe cumplir un equipo experimental para la síntesis de CMRPs, lo cual es de especial interés para la difusión de los CMRPs en países donde el desarrollo de composites metálicos no está aún posicionado.

## 2. TÉCNICA DE PROCESAMIENTO

El método de fabricación es ilustrado en la Figura 1. El detalle de la fabricación de un composite Al-Si7-Mg0.3/ $\beta$ -SiCp/15<sub>wr</sub> ha sido reportado en un trabajo paralelo [5]. El proceso consiste en calentar la aleación matriz por encima de su temperatura de fusión y proceder luego con un proceso de agitación mecánica sostenida. A continuación, se disminuye la temperatura del sistema hasta un valor en el intervalo de solidificación de la aleación, de manera que se garantice una fracción de sólido determinada. En éste estado, en lugar de una morfología dendrítica, el fenómeno de transporte convectivo provocado en la aleación semi-sólida por efecto de agitación mecánica, sumado en algunos casos a operaciones previas de modificación y afinado microestructural, garantizan una morfología de tipo globular para la fase sólida primaria [1]



Figura 1. Método de producción de CMRPs por Compoformado

A nivel macroscópico, dicha morfología se traduce en un flujo más laminar, previniendo el transporte y migración por diferencia de densidad entre la matriz y las partículas de refuerzo que son adicionadas posteriormente. Además, la acción de mezclado y agitación sostenida, favorecen el contacto y la mojabilidad del refuerzo sólido por parte de la aleación parcialmente fundida.

Finalmente, luego de asegurar una homogénea distribución de las fases que se procesan, se procede a

vaciar la pasta de composite en las cavidades de una prensa, donde tiene lugar una operación de forjado-solidificación, asegurando así la geometría de la pieza.

## 3. DISEÑO Y COMPONENTES

### 3.1 Calentamiento y fusión

El sistema de calentamiento tiene como funciones la fusión del material matriz, el control de la temperatura de trabajo y permitir una alta velocidad de enfriamiento, desde liquidus hasta la temperatura en el intervalo semi-sólido, con el fin de minimizar el crecimiento dendrítico. En principio, una gran variedad de métodos y equipos de calentamiento pueden ser usados; i.e. hornos de inducción, hornos a gas o eléctricos. El control de la temperatura en hornos a gas es menos eficaz a pesar de su economía. Con el calentamiento por inducción de otro lado, se consigue una buena precisión de la temperatura por lo que es el preferido para el procesado por Compoformado. Estos hornos son además bastante comunes y pueden utilizarse con o sin atmósfera protectora. Sin embargo, la inversión inicial es mucho más elevada al compararla con un horno eléctrico.

Sobre la atmósfera de proceso es importante anotar que el calentamiento en hornos de atmósfera normal puede ser útil únicamente para la obtención de subproductos o lingotes de composite, que luego de ser almacenados, puedan ser sometidos a una técnica secundaria de procesado (como forja o extrusión), de manera que se pueda subsanar apropiadamente la defectología obtenida por el atrapamiento de gases u óxidos [6]. Teóricamente, la capa de óxido metálico que normalmente se forma sobre la superficie del metal actúa como una barrera que impide que los gases penetren dentro de la mezcla, pero al mismo tiempo, a menos que el régimen de mezcla no sea laminar, dicha capa se puede convertir en una fuente potencial de contaminación, si la misma es tragada hacia el fundido durante la mezcla. Es por tal motivo que se prefiere hacer uso de una atmósfera controlada [7].

En el desarrollo de ésta investigación se dispuso un horno eléctrico de 6KW para 8Kg de aluminio (Figura 2), el cual permite una reducida histéresis en el control de temperatura y adicionalmente presenta condiciones económicas atractivas. En cuanto a la atmósfera de proceso, se optó por trabajar con admisión de gas inerte (Ar) a través de dos canales; uno de ellos utilizado para la extracción del aire y evitar la oxidación del fundido.

### 3.2 Alimentación de refuerzo

El segundo canal está conectado al alimentador de partículas, de manera que con el flujo de gas se permita controlar la alimentación del refuerzo mediante una pistola neumática. La Tabla 1 lista de forma comparativa las ventajas y desventajas de diferentes sistemas de

alimentación de material de refuerzo desarrollados hasta la fecha [8]. Como se observa, mediante el uso de pistolas o tuberías de inyección, es posible alimentar las partículas a la mezcla a través de una corriente de gas inerte, bien sea por la parte superior o inferior del crisol [9]. Para el caso que aquí concierne, el extremo de la pistola es inmerso dentro de la mezcla y la presión del gas es ajustada para conseguir una inmersión correcta (Figura 2).

### 3.3. Agitación, mezclado y dispersión

El mayor problema existente a la hora de fabricar un CMRP es la no mojabilidad que se presenta entre el metal líquido y el material de refuerzo. Por tal motivo, se hace necesario utilizar algún tipo de fuerza externa como agitación mecánica o electromagnética para inducir el contacto y en el mejor de los casos lograr la unión entre los constituyentes

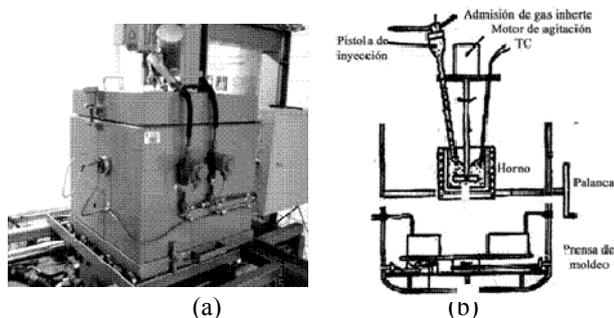


Figura 2. Detalle del horno de calentamiento: (a) Horno Eléctrico y sistema de alimentación de gas inerte, (b) Esquema General.

En particular sobre la agitación mecánica es posible agregar ventajas como reducción de rutas de proceso, uso a nivel experimental y economía [1,8]. Sobre este último aspecto, es importante resaltar que la agitación mecánica resulta en general mucho más económica, debido a que es posible utilizar agitadores de diversos tipos que no se comparan en costo a los generadores de campos magnéticos requeridos por una agitación magnética o a los sistemas de atomización utilizados en Spray-casting.

Sin embargo, cuando se examina el tema de la mezcla de metales semi-sólidos y/o CMRPs, se hallan alrededor de unos 30 sistemas diferentes lo que dificulta la selección del sistema de mezclado [10]. De otro lado, en lo que a la aleación semi-sólida se refiere, para garantizar un alto índice de cizallamiento, que permita obtener microestructuras de tipo globular, se debe considerar la relación de diámetros entre el crisol y el agitador ( $ca$ ), la cual puede variar desde 0.6 a 0.8 en el caso de agitadores de paletas [11].

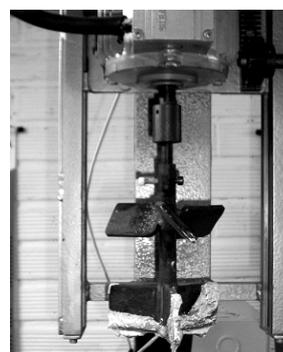


Figura 3. Sistema de agitación y mezclado: (a) Agitador, (b) Mecanismo para la introducción y control de posición del agitador

Técnica	Ventajas				Desventajas				
	Favorece la dispersión del reforzante	Aumenta la posibilidad de mojado	Economía	Sencillez	Atrapamiento de gases	Alta reactividad química	Formación de clústeres	Atrapamiento de impurezas	Inversión
Alimentación por gravedad	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Pistola con gas inerte	↑↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑↑	↑
Alimentación mecánica	↑↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Alimentación a través del eje del mezclador	↑↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Perforación de lingotes de metal matriz	↑	↑↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Disposición del reforzante en el fondo del crisol	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑

Tabla 1. Comparación entre diferentes sistemas de alimentación de partículas de refuerzo (el número de flechas indica una mayor ventaja comparativa. [8])

Aunque es un requerimiento, el alto índice de cizallamiento puede ocasionar el atrapamiento de impurezas, ya que favorece la formación del vórtice, aumentando de este modo la potencia necesaria y los esfuerzos en el eje de agitación [12]. Así las cosas, el sistema de agitación empleado en este estudio consiste de un crisol en forma de cilindro recto y de un agitador de doble paleta (Figura. 3), con una relación  $ca=0.8$ . 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 de éste 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.

De otra parte, la agitación no está presente durante la totalidad de un ciclo de proceso (Figura 1). La misma termina con el vaciado de la pasta de composite desde el

horno. Para tal efecto fue diseñado un mecanismo de entrada y salida del agitador.

### 3.4. Forja semi-sólida

El Squeeze-Casting (SC) es un término genérico para especificar una técnica de fabricación de partes metálicas, donde la solidificación es ejecutada paralelamente bajo la acción de una alta presión en un dado o molde reutilizable. En ella no se requiere por tanto de mazarotas y demás elementos para la compensación de contracción, canales de alimentación, bebederos y otros, que provocan

El procesamiento típico por SC de una parte metálica involucra los siguientes pasos [13]: i). Inicialmente una cantidad precisa de metal fundido es vaciada dentro de una cavidad (molde) precalentada y localizada en la cama de una prensa hidráulica, ii). En segundo lugar, la presión es activada para cerrar la cavidad y comprimir el líquido metálico. Este cierre es llevado a cabo muy rápidamente, permitiendo la solidificación del metal bajo presión, iii). La presión es mantenida hasta que se complete la solidificación, incrementando la razón de flujo de calor. Debido a que la nucleación de poros llenos de gas es dependiente de la presión, la formación de poros debida a la presencia de gases disueltos en el metal es entonces restringida, iv). Finalmente, un punzón es movido y la pieza es retirada del equipo.

Para el caso que aquí se reporta, la etapa inicial del proceso de SC es ligeramente modificada mediante la preparación in-situ de la pasta de CMRP por agitación mecánica. Luego de obtener un composite homogéneo, se procede a vaciarlo en un pre-molde para formar un tocho, mediante la aplicación de una leve presión neumática durante un tiempo de 12 a 15s. La forja semi-sólida del tocho de composite y la continuación del proceso de solidificación, tienen lugar cuando se aplica posteriormente una presión entre 50 y 100 MPa. (Figura 4).

## 4 SIMULACIÓN DEL PROCESO

Finalmente, los objetivos de la investigación científica en el tema del procesamiento semi-sólido de metales y composites versan sobre el estudio más profundo del fenómeno de transformación dendrítica [14], el desarrollo y aplicación de modelos útiles en la simulación de procesos [15] y el desarrollo de aleaciones especialmente adaptadas para el procesamiento semi-sólido (aleaciones que posibiliten una alta fracción de sólidos y altas tasas de producción [16].

En relación al segundo de éstos objetivos, el proceso de forja semi-sólida de una pieza tipo fue inicialmente simulado mediante el uso de herramientas CFD (Software Flow-3D de la compañía Flow Science). La

Figura 5 es una imagen CAD de la pieza que ha sido procesada.

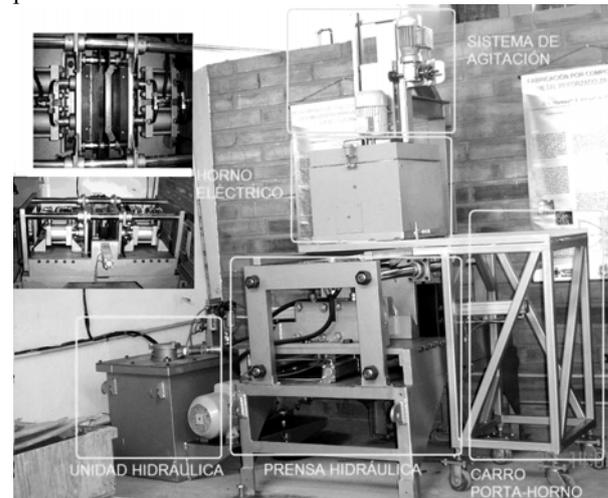


Figura 4. Equipo de Compoforjado

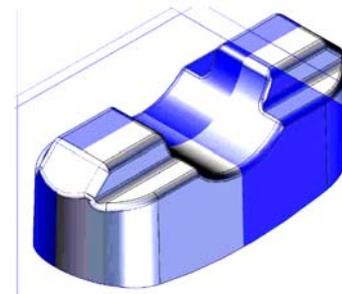


Figura 5. Pieza objetivo a ser fabricada por Compoforjado (grapa de conector eléctrico)

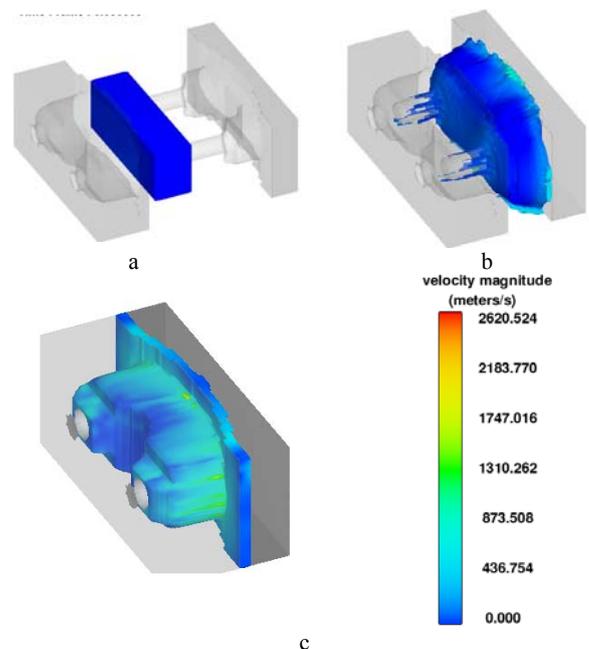


Figura 6 (a) Posición inicial de tocho y moldes

(b) Prensado de la pasta de composite. (c) Perfiles de velocidad

En las Figuras 6a-c se ilustra un apartado de la simulación utilizada en la determinación del perfil de velocidad del flujo de material en el sistema de moldeo durante el proceso de forja semi-sólida. Mediante dicha simulación ha sido posible identificar zonas donde posiblemente pueden ocurrir defectos instantáneos y diferencias interlaminares de velocidad que provocan flujos irregulares y turbulentos.

La misma figura muestra el perfil de velocidad en tres instantes de tiempo para una pieza tipo. Se observa que en la parte externa del molde se presenta un incremento en la velocidad del flujo. A pesar de la alta velocidad, el frente de material dentro del molde presenta divisiones en instantes de tiempo que posteriormente, por efecto de la presión, son eliminados evitando así la formación de defectos por inclusiones de gases.

## 5 CONCLUSIONES

Los sistemas de forja semi-sólida para la obtención de piezas desde Materiales Compuestos de Matriz Metálica, buscan entre otros fines, generar cambios microestructurales, así como obtener piezas con cero defectos. Esto se consigue gracias a las altas presiones que son inducidas, con lo cual se promueve la densificación y la eliminación de porosidad.

Se ha diseñado y puesto a punto una técnica novedosa la manufactura de partes desde Composites Metálicos Particulados (CMRPs). Debido a que en general el equipo y rutas de procesamiento son muy similares a las que convencionalmente se utilizan en el sector de fundición, es posible argumentar que frente a la implementación de los CMRPs en Latinoamérica, la agitación mecánica en combinación con la forja semi-sólida, presentan ventajas interesantes para el desarrollo de elementos diversos, debido a su economía y facilidad de implementación.

## 6. REFERENCIAS

- [1]. H. V. Martínez, "Metalurgia Semisólida de Aleaciones y Composites Metálicos Procesados por Agitación Mecánica", *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, vol. 27 (1): pp. 13-27, Junio 2007.
- [2]. Y. Sahin. "Preparation and some properties of SiC particle reinforced Aluminium alloy composites". *Materials and Design*, vol. 24 pp. 671-679, 2003.
- [3]. G P. Fernández. "Estudio de las propiedades mecánicas de los conectores de alta tensión bajo efectos de temperatura elevada". *Maestría en Ingeniería*, Universidad Pontificia Bolivariana. Medellín. 2005.
- [4]. H. V. Martínez, M. F. Valencia, F. Chejne y J. Cruz, "Procesado por Compocasting y caracterización de composites metálicos reforzados con fibrillas de  $\beta$ -SiC obtenidas desde la cascarilla de arroz". Parte II. Fabricación de composites, *MATCOMP-2005, VI Congreso nacional de materiales compuestos, Asociación Española de Materiales Compuestos*, Universidad de Valencia, Valencia, España, pp. 27-29, Junio 2005.
- [5]. M. F. Valencia, A. Morales y H. V. Martínez. "Compoformado de Materiales Compuestos base Al-Si, Reforzados con  $\beta$ -SiC". *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*.
- [6]. H. V. Martínez, J. Cruz. F. Chejne. "Síntesis de composites base zinc por técnicas en estado semi-sólido". *IBEROMET VIII*. Escuela Politécnica Nacional, Universidad Politécnica Salesiana, Departamento de Materiales y Procesos de Fabricación, Centro de Estudios para la Comunidad CEC, Quito, pp. 97-102, 2004.
- [7]. S. Ray. "Porosity in foundry composites prepared by vortex method, Cast reinforced metals composites". *Proceedings of the international symposium on advanced in cast reinforced metal composites*, Chicago, pp. 24-30, pp. 33-38. Sept. 1998
- [8]. H. V. Martínez. "Síntesis en estado semi-sólido de composites metálicos base ZA-27 reforzados con  $\beta$ -SiC". *Tesis Doctoral. Facultad de Formación Avanzada. Universidad Pontificia Bolivariana*, p 169. Sept de 2005.
- [9]. F. A. Badia y P. K. Rohatgi. "Dispersion of graphite particles in aluminium castings through injection of the melt". *AFS Transactions*, vol 77, p. 402. 1969.
- [10]. D. Brabazon, D. J. Browne, and A. J. Carr. "Mechanical stir casting of aluminum alloys from the mushy state: process, microstructure and mechanical properties". *Materials Science and Engineering A*. Vol. 326, pp. 370-381, 2002.
- [11]. L. J. Cruz Riaño. "Fabricación de un material compuesto base Zamak reforzado con residuos carbonosos de origen petroquímico mediante la técnica de reocolado". *Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid*. Madrid, p. 263. 1997.
- [12]. P. K. Biswas, et al. "Effect of some design parameters on the suspension characteristics of a mechanically agitated sand-water slurry system". *Materials and Design*. Vol. 20, pp. 253-265, 1999.
- [13]. M. R. Ghomashchi, A. Vikhrov. "Squeeze casting: an overview". *Journal of materials Processing Technology*, vol. 101, pp. 1-9. 2000.
- [14]. M. C. Flemings, et al. "Semi-Solid Forming: the process and the path forward". *Metallurgical Science and Technology*, vol. 18. No. 2, 2000.

- [15]. M. Modigell, et al. "Rheological modelling on semi-solid metal alloys and simulation of thixocasting processes". *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 111, 2001.
- [16]. A. Maciel, A. et al. "Thermodynamic predictions of wrought alloy compositions amenable to semi-solid processing". *Acta Materialia*, vol. 51, No. 8, pp. 2319-2330, 2003.

#### **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 del proyecto 802-11/05-S21.